

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ระบบลีน

ระบบลีน (Lean) เป็นหนึ่งในเครื่องมือของการบริหารจัดการที่ได้รับการกล่าวขานว่าพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหา คำว่า “ลีน” (Lean) แปลว่าผอมหรือบาง ในที่นี้มีความหมายในแง่บวก ถ้าเปรียบเทียบกับคนก็หมายถึงคนที่มีร่างกายสมส่วนปราศจากชั้นไขมัน แข็งแรง ว่องไว กระฉับกระเฉง แต่ถ้าเปรียบเทียบกับองค์กรจะหมายถึง องค์กรที่ดำเนินการโดยปราศจากการสูญเปล่าในทุกๆ กระบวนการ มีความสามารถในการปรับตัว ตอบสนองความต้องการของตลาดได้ทันทั่วทั้ง และมีประสิทธิภาพเหนือคู่แข่ง เราเรียกองค์กรนี้ว่า วิสาหกิจแบบลีน (Lean Enterprise)

วิสาหกิจแบบลีนที่มีชื่อเสียงโด่งดังในฐานะผู้คิดค้น และเป็นผู้นำการปฏิบัติ ก็คือบริษัทโตโยต้า (Toyota) ผู้ผลิตรถยนต์อันดับ 1 ของญี่ปุ่น ที่ผู้ผลิตรถยนต์ในอเมริกาและยุโรปจับตามอง พัฒนาการอันรวดเร็ว จากการใช้ระบบการผลิตแบบลีนภายใต้ชื่อ “ระบบการผลิตแบบ Toyota” (Toyota Production System, TPS) ทั้งนี้ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา มีผลกำไรรายปีสูงกว่าผู้ผลิตรถยนต์รายใดในโลก หรือแม้แต่อดีตกลุ่มผู้ผลิตรถยนต์ระดับโลก 3 อันดับแรก ที่มักจะถูกเรียกว่า “Big Three” (ประกอบด้วย GM., Ford และ Chrysler) รวมกันเสียอีกความสำเร็จดังกล่าวเกิดจากการจัดการกระบวนการแบบลีน ซึ่งทำให้โตโยต้าสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็วผลิตสินค้าที่มีคุณภาพสูง สร้างความน่าเชื่อถือแก่ลูกค้าในตัวสินค้า และการบริการ ภายใต้ปรัชญาการบริหารที่โตโยต้าเรียกว่า “วิถีแห่ง Toyota” (Toyota Way) ซึ่งมุ่งเน้นความสำคัญของการพัฒนาบุคลากรทั้งในส่วนของผู้บริหาร และพนักงานทุกระดับ การทำงานเป็นทีม การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง และการปรับตัวเป็นองค์กรแห่งการเรียนรู้

การจัดการกระบวนการแบบลีนเริ่มต้นจากการพิจารณาคุณค่าในการดำเนินงานมุ่งตอบสนองความต้องการของลูกค้า สร้างคุณค่าในตัวสินค้าและบริการ ให้มีความสำคัญกับการผลิตสินค้าที่มีคุณภาพ และจำกัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นตลอดทั้งกระบวนการอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการติดต่อสื่อสารกับลูกค้า การออกแบบผลิตภัณฑ์ การพัฒนาเครือข่ายผู้รับเหมาช่วงการผลิต ตลอดจนการบริหารงานประจำวัน อันจะนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต เพื่งผลกำไร และผลลัพธ์ที่ดีทางธุรกิจที่สุดในที่สุด

ราบเรียบ และทำการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างคุณค่าให้แก่ระบบอยู่เสมอ โดยอาศัยแนวคิดการเพิ่มผลผลิตสินค้าหรือการบริการเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าให้ดียิ่งขึ้นโดยใช้ทรัพยากรการผลิตน้อยกว่า (Doing More with Less) เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงองค์กร

สิ่งที่เป็นอุปสรรคในการเพิ่มผลผลิต ซึ่งเป็นพื้นฐานของระบบลีนก็คือ ความสูญเปล่าภายในกระบวนการผลิต ถ้าหากองค์กรดำเนินงานโดยมีความสูญเปล่ามากเกินไปโดยผลผลิตภาพขององค์กรก็จะยิ่งถูกกดให้ลดลงต่ำเท่านั้นจะเห็นได้ดังสมการที่ 2.2

$$\text{ผลิตภาพ (Productivity)} = \frac{\text{ผลผลิตที่ได้} - \text{ความสูญเปล่า}}{\text{ปัจจัยการผลิตที่ใช้} + \text{ความสูญเปล่า}} \quad (2.2)$$

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเมื่อเกิดความสูญเปล่าขึ้นจะทำให้ปริมาณผลผลิตที่ได้คุณภาพลดลง ผลิตสินค้าหรือบริการได้น้อยกว่าที่วางแผนไว้ และต้องใช้ปัจจัยที่มากยิ่งขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองเงินทุน แรงงานทางตรง วัตถุดิบ เครื่องจักร เครื่องมือ พลังงาน หรือแม้แต่เวลาการทำงานเกินความจำเป็น

Womack และ Jones (1994) จากหนังสือ Lean Thinking ได้กล่าวถึงขั้นตอนหลักการสร้างระบบการผลิตแบบลีน โดยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1: การระบุคุณค่า ของสินค้าและบริการในมุมมองของลูกค้าไม่ว่าจะเป็นลูกค้าภายในหรือภายนอก (Specified Value)

- ระบุคุณค่า (Value) ของผลิตภัณฑ์จากมุมมองของลูกค้า
- ไม่ควรกำหนดคุณค่าจากมุมมองของบริษัท องค์กร หน่วยงาน หน้าที่ หรือเทคโนโลยีปัจจุบัน
- ไม่ว่าจะเป็นสินค้าหรืองานบริการ จำไว้ว่า “ลูกค้าต้องการแค่เพียงสิ่งที่ตอบสนองความต้องการหรือแก้ไขปัญหาให้พวกเขาได้เท่านั้น”

ขั้นตอนที่ 2: สร้างกระแสคุณค่า (Value System) ในทุกขั้นตอนการดำเนินงาน เริ่มตั้งแต่การออกแบบ การวางแผน และการผลิตสินค้า การจัดจำหน่าย ฯลฯ เพื่อพิจารณาว่ากิจกรรมใดที่ไม่เพิ่มคุณค่าและเป็นความสูญเปล่า

- กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ก่อนวางจำหน่าย
- ขั้นตอนการสั่งซื้อสินค้าของลูกค้าจนกระทั่งจัดส่งสินค้าให้แก่ลูกค้า

- การรับวัตถุดิบจากผู้ส่งมอบมาผลิตจนกระทั่งจัดส่งสินค้าสำเร็จรูปถึงมือ

ลูกค้า

ขั้นตอนที่ 3: ทำกิจกรรมต่างๆ ที่มีคุณค่าเพิ่มดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง (Flow)

พยายามทำให้กระบวนการดำเนินไปได้โดยปราศจาก

- การอ้อม (Detours)
- การย้อนกลับ (Back Flow)
- การรอคอย (Waiting)
- ของเสีย (Scrap)

ขั้นตอนที่ 4: ใช้ระบบดึง (Pull) โดยให้ความสำคัญเฉพาะสิ่งที่ลูกค้าต้องการ

เท่านั้น

- ทำเฉพาะสิ่งที่มีความต้องการ ตามปริมาณที่ต้องการ ภายในเวลาที่ต้องการ

เท่านั้น

ขั้นตอนที่ 5: สร้างคุณค่า และจำกัดความสูญเปล่า โดยค้นหาส่วนเกินที่ถูกซ่อนไว้

ซึ่งเป็นความสูญเปล่า และกำจัดออกไปอย่างต่อเนื่อง (Perfection) โดย

- ทำการกำจัดความสูญเปล่า (Wastes/Muda) ในทุกๆ กิจกรรมและสินทรัพย์ ที่ใช้งานโดยพิจารณาความจำเป็นของลูกค้าเป็นเป้าหมาย
- ดำเนินการโดยใช้เครื่องมือ การปรับปรุงงาน (Evaluation/Kaizen) และ นวัตกรรม (Renovation/Kaikaku)

2.1.2 มุมมองแบบระบบลีน

Allen และคณะ (2001) ได้ให้คำจำกัดความของการผลิตแบบลีนไว้ว่าเป็นการติดตามความสูญเปล่าเพื่อกำจัดให้หมดไปจากระบบอย่างไม่มีที่สิ้นสุดโดยความสูญเปล่านั้นคือทุกๆ สิ่งที่ไม่เกิดคุณค่าแก่ผลิตภัณฑ์

National Institute of Standards and Technology Manufacturing Extension Partnership (NIST-MEP) ได้ให้คำจำกัดความของระบบการผลิตแบบลีนไว้ว่า เป็นระบบที่มุ่งเน้นการจำแนกและกำจัดความสูญเปล่าในกิจกรรมตลอดจนการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยทำให้การไหลของผลิตภัณฑ์เกิดมาจากการดึงดูดของลูกค้า เพื่อการตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้าอย่างสูงสุด (Spann และคณะ, 1997)

Production System Design Laboratory at the Massachusetts Institute of Technology ให้คำจำกัดความของการผลิตแบบลีนไว้ คือการกำจัดความสูญเปล่า ในทุกๆ ส่วนของการผลิตซึ่งรวมทั้งส่วนความสัมพันธ์ของลูกค้า ส่วนการออกแบบผลิตภัณฑ์ ส่วนการเชื่อมโยงกับซัพพลายเออร์ และในส่วนของบริหารโรงงาน (Feld, 2001)

การออกแบบและการจัดการอย่างถูกต้องเหมาะสม ในครั้งแรกที่ดำเนินการและมุ่งเน้นถึงกระบวนการที่เพิ่มคุณค่าซึ่งวิธีการนี้ เป็นวิธีการทำงานที่ป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์แบบ และเป็นแนวทางที่ก่อให้เกิดความปรับตัวในสภาวะการแข่งขันที่ขึ้นอยู่กัเวลา (Time-Based Competition) เพื่อให้องค์กรมีความคล่องตัว (Agility) ใช้ทรัพยากรอย่างจำกัด สะดวก รวดเร็ว ลดต้นทุน ลดเวลาที่ไม่จำเป็น และเพิ่มคุณภาพในระบบการผลิต โดยวิธีการแบบลีนที่เป็นองค์การรวม (Holistic) แบ่งออกเป็น 2 แบบ (Allen และคณะ, 2001) แบบแรก การผลิตแบบลีนจะเน้นทางด้านการผลิต ส่วนที่แบบที่สอง วิสาหกิจแบบลีนจะประสานรวมระบบการผลิตที่เกี่ยวข้องกับโซ่อุปทาน โดยมีหลักการเดียวกันคือ การกำจัดความสูญเปล่าเพื่อสร้างคุณภาพ

การผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) เป็นปรัชญาการผลิต ที่มีพื้นฐานความแตกต่างของแนวคิดการผลิต จากการไหลในการผลิตตั้งแต่วัตถุดิบจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ และตั้งแต่การออกแบบผลิตภัณฑ์จนถึงการบริการลูกค้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสูญเปล่า และผลิตสินค้าให้ตรงกับความต้องการของลูกค้า (Allen และคณะ, 2001)

2.1.3 โครงสร้างของระบบลีน

องค์ประกอบของระบบลีน เปรียบเสมือนกับโครงสร้างของวิหารดังภาพที่ 2.2 มีส่วนแรกคือรากฐานของวิหารซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญมากที่สุดส่วนหนึ่งเปรียบเสมือนกับแนวคิดแบบลีน (Lean Thinking) ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อให้พนักงานทุกคนในองค์กรเกิดความตระหนักถึงความสูญเปล่า สามารถแยกแยะงานที่เพิ่มคุณค่า และไม่เพิ่มคุณค่าออกจากกัน (Initiated Awareness) สามารถจัดการกับความเปลี่ยนแปลง (Change Management) และปรับเปลี่ยนทัศนคติของพนักงานทุกระดับด้วยการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังพิจารณานำเอานวัตกรรมและเทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้ เพื่อให้พนักงานทุกคนเกิดความมุ่งมั่นร่วมมือกันกำจัดความสูญเปล่าและพัฒนาคุณค่าของงานที่ทำ

องค์ประกอบส่วนที่สองคือบริเวณพื้นของวิหาร ก่อนการนำเครื่องมือต่างๆ ของ ลีน มาใช้จะต้องดำเนินการวิเคราะห์และวางแผนงาน (Analysis and Planning) โดยประเมินผลการจัดการกระบวนการในสภาพปัจจุบันตามแนวทางระบบของลีน (Lean Assessment) และ

วิเคราะห์ปัญหาของกระบวนการเพื่อหาจุดปรับปรุงและวางแผนการปรับปรุงด้วยแผนภาพกระแสคุณค่า (Value Stream Mapping) ขณะเดียวกันทุกฝ่ายในองค์กรจะต้องร่วมมือกันกำหนดนโยบาย ตัวชี้วัด และเป้าหมายให้สอดคล้องกับแผนการดำเนินงาน แล้วสื่อสารถ่ายทอดไปทั่วทั้งองค์กร (Policy Deployment) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการติดตามความคืบหน้า ปัญหา และอุปสรรคของการปรับปรุง

ถ้าหากวิหารดังกล่าวมีรากฐาน และพื้นที่แข็งแรงมั่นคง ก็ส่งผลให้เสาซึ่งเป็นโครงสร้างส่วนถัดมาของวิหารทุกต้นแข็งแรงไปด้วยเช่นกัน เสาแต่ละต้นในที่นี้ก็คือองค์ประกอบส่วนที่สามซึ่งเป็นกิจกรรม หรือเครื่องมือในหารลดหรือกำจัดสิ่งที่ไม่เพิ่มคุณค่าในกระบวนการ และเน้นการสร้างคุณค่าในกระบวนการอย่างเป็นระบบ ประกอบด้วย

เสาต้นที่ 1: การพัฒนาบุคลากรโดยการฝึกอบรมพื้นฐานความรู้ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบการผลิตแบบลีน ให้แก่พนักงานในระดับต่างๆ ตามความเหมาะสม การสนับสนุนให้พนักงานรวมกลุ่มในรูปแบบต่างๆ เพื่อร่วมมือกันปรับปรุงงาน (Small Group Activity) การสร้างช่องทางให้พนักงานแต่ละคนสามารถแสดงความคิดเห็น และแรงจูงใจส่งเสริมและการปรับปรุงงานด้วยกิจกรรมข้อเสนอแนะ (Suggestion) ตลอดจนการพัฒนาความสามารถของพนักงานให้สามารถทำงานได้หลายหน้าที่ (Multi Skill Operator)

เสาต้นที่ 2: การประกันคุณภาพสินค้า (Quality Assurance) โดยดำเนินการแก้ไขปัญหาคุณภาพในกระบวนการ (Problem Solving) และสร้างระบบการควบคุมคุณภาพของพนักงานและเครื่องจักรอัตโนมัติได้แก่ ระบบการควบคุมด้วยสายตา (Visual Control) และระบบป้องกันการผิดพลาดของพนักงาน หรือเครื่องจักร (Poka-Yoke หรือ Mistake Proofing)

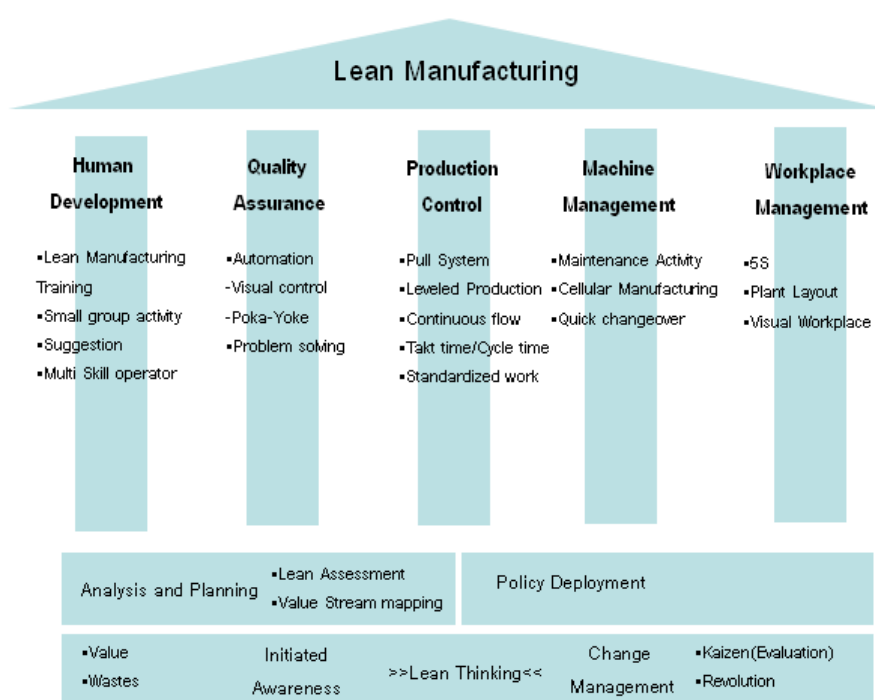
เสาต้นที่ 3: การควบคุมการผลิต (Production Control) โดยการสร้างมาตรฐานการทำงาน (Standardized Work) การกำหนดจังหวะในการผลิตตามความต้องการของลูกค้าด้วยการกำหนดรอบเวลามาตรฐานในการทำงานจริง (Takt Time) การปรับปรุงรอบเวลาในการทำงานจริง (Cycle Time) การผลิตอย่างต่อเนื่อง (Continuous Flow) การปรับเรียบการผลิต (Leveled Production) การใช้ระบบการดึง (Pull System) โดยใช้เครื่องมือระบบคัมบัง (Kanban) มาช่วยในการควบคุมการผลิต

เสาต้นที่ 4: การจัดการเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ (Machine Management) โดยทำการลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร (Quick Changeover) การเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่กระบวนการการผลิตด้วยการจัดสายการผลิตแบบเซลล์ (Cellular Manufacturing) กิจกรรมการ

บำรุงเครื่องจักร (Maintenance Activity) เช่น การบำรุงรักษาด้วยตนเอง การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เป็นต้น

เสาต้นที่ 5: การจัดการสถานการทำงาน (Workplace Management) โดยปรับปรุงพื้นที่ทำงานด้วยกิจกรรม 5ส ซึ่งเป็นพื้นฐานของการปรับเปลี่ยนทัศนคติของพนักงานให้เข้าใจ ยอมรับการเปลี่ยนแปลง และให้ความร่วมมือ การปรับปรุงการวางผังโรงงาน (Plant Layout) ตามแนวทางของระบบลีน และพัฒนาประสิทธิภาพในการสื่อสารภายในสถานที่ทำงาน (Visual Workplace)

เมื่อองค์ประกอบทุกอย่างที่กล่าวมาได้รับการจัดวางอย่างลงตัว วิสาหกิจแบบลีน จึงจะมีความมั่นคงแข็งแรงดังวิหารดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2

ส่วนประกอบของระบบการผลิตแบบลีน

ที่มา : Lean วิธีการสร้างคุณค่าสู่องค์กรที่เป็นเลิศ (เกียรติขจร โสมานะสิน, 2007)

2.1.4 วิวัฒนาการผลิตสู่ระบบการผลิตปัจจุบัน

วิวัฒนาการผลิตเริ่มจากการผลิตแบบงานฝีมือ (Craft Production) มาเป็นแบบผลิตแบบจำนวนมาก (Mass Production) แต่ในปัจจุบันการผลิตได้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 2.1 (Spann และคณะ, 1997) จะเห็นได้ว่าภายใต้การผลิตในยุคปัจจุบันการผลิตแบบลีนจะ

เหมาะสมตรงกับลักษณะการผลิตที่ลูกค้าต้องการมากที่สุดโดยมีการลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตและมีการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Continuous Improvement)

ตารางที่ 2.1

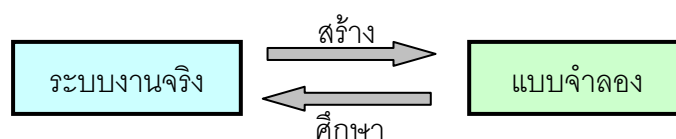
การเปรียบเทียบลักษณะการผลิตแบบต่างๆ

ลักษณะ	การผลิตแบบงานฝีมือ	การผลิตแบบจำนวนมาก	การผลิตในปัจจุบัน
ผลิตภัณฑ์	หลากหลายหรือตามความต้องการของลูกค้า	แบบเดียวกัน	หลากหลายหรือตามความต้องการของลูกค้า
การควบคุมการผลิต	ผลิตตามสั่ง	ผลิตตามพยากรณ์	ผลิตตามความต้องการของลูกค้า
เทคโนโลยีการผลิต	ทักษะของช่างฝีมือ	ความแม่นยำของเครื่องจักร ทักษะย่อยๆ ของแรงงาน	การควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ความแม่นยำของเครื่องจักรสูง ทักษะย่อยๆ ของแรงงาน
วิธีการผลิต	ด้วยมือ	การใช้ส่วนที่แทนกันได้ เครื่องจักรอัตโนมัติ แรงงานสายพาน	การใช้ส่วนที่แทนกันได้ เครื่องจักรอัตโนมัติ แรงงานหุ่นยนต์
ความต้องการของตลาด	มืออย่างจำกัด	ตลาดนำหน้าความสามารถในการผลิต	ตลาดมีความสำคัญน้อยกว่าความสามารถในการผลิต
ความต้องการของลูกค้า	มีเพียงพอให้ไปใช้งาน	มีเพียงพอให้ไปใช้งาน คุณสมบัติของสินค้า ต้นทุน	คุณภาพตามความต้องการของลูกค้า คุณสมบัติของสินค้า ต้นทุน เวลาในการส่งมอบ

ที่มา: Transferring Lean Manufacturing to Small Manufacturers (Spann และคณะ, 1997)

2.2 ทฤษฎีการจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ (Simulation) หมายถึง การสร้างภาพของเหตุการณ์ หรือสถานการณ์ โดยมีคุณลักษณะของความเป็นจริงปรากฏอยู่เสมือนเหตุการณ์หรือสถานการณ์นั้นเกิดขึ้นจริง แต่เมื่อได้รับความสนใจมากขึ้นเมื่อมีความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ ได้ให้คำจำกัดความเกี่ยวกับการจำลองสถานการณ์ว่า “การจำลองสถานการณ์ (Simulation) เป็นกระบวนการออกแบบตัวแบบจำลอง (Model) ของระบบจริง (Real system) แล้วดำเนินการใช้ตัวแบบจำลองนั้นเพื่อเรียนรู้พฤติกรรมของระบบ หรือประเมินผลการดำเนินการใช้แผนต่างๆ ในการดำเนินงานของระบบภายใต้ขอบเขตที่วางไว้” เป็นการแทนความเข้าใจเหตุการณ์ หรือสถานการณ์นั้นๆ เพื่อทำการศึกษาหรือทดลองหาคำตอบที่ต้องการ การจำลองสถานการณ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการบรรยายหรือพรรณนา คุณสมบัติหรือองค์ประกอบของเหตุการณ์ หรือสถานการณ์ที่มีความแตกต่างกัน การทำความเข้าใจคุณสมบัติหรือองค์ประกอบของเหตุการณ์เหล่านั้น จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์สามารถทำการทดลองสร้างประสบการณ์กับคุณสมบัติเหล่านั้นได้นับครั้งไม่ถ้วน เสมือนหนึ่งอยู่ในเหตุการณ์จริงๆ ผลที่ได้จากการทดลองนั้น จะช่วยนำไปสู่บทสรุปของคำตอบของปัญหาในเหตุการณ์ หรือสถานการณ์นั้นๆ การจำลองแบบ (Simulation) คือ กระบวนการออกแบบแบบจำลอง (Simulation) ของระบบจริง (Real system) แล้วดำเนินการทดลองใช้แบบจำลองเพื่อเรียนรู้พฤติกรรมของระบบงาน หรือเพื่อประเมินผลการใช้กลยุทธ์ (Strategies) ต่างๆ ในการดำเนินงานของระบบภายใต้ข้อกำหนดที่วางไว้ และ Davies and Goldsmith ได้ให้คำจำกัดความไว้ว่า เป็นการใช้แบบจำลอง (Model) เพื่อที่จะแสดงพฤติกรรม (Behavior) ในสถานการณ์จริงของวัตถุ หรือระบบ



ภาพที่ 2.3

การใช้แบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบงานจริง

จากภาพที่ 2.3 จะพบว่าแบบจำลองถูกสร้างขึ้นมาเพื่อเลียนแบบพฤติกรรมหรือกระบวนการทำงานของระบบงานจริง โดยจะมีคุณสมบัติและองค์ประกอบที่เหมือนกันหรือคล้ายคลึงกันกับระบบจริง เพื่อที่จะใช้แบบจำลองนั้นเป็นตัวแทนของระบบในการศึกษา โดยการ

จำลองระบบนั้นอาจจะเป็นการจำลองระบบที่มีอยู่แล้ว (เพื่อศึกษาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ) หรืออาจจะเป็นการจำลองระบบที่ยังไม่เกิดขึ้น (เพื่อศึกษาแนวทางในการพัฒนาระบบ) ก็ได้

การจำลองระบบอาจนำไปใช้ในหลายลักษณะ ได้แก่

1. การจำลองระบบการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม
2. การจำลองระบบงานด้านบริหารธุรกิจ และเศรษฐศาสตร์ เช่น ศึกษาสถานะตลาดพฤติกรรมผู้บริโภค เป็นต้น
3. การศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอาวุธ และเทคนิควิธีในการทำสงคราม เช่น การทดสอบอานุภาพของอาวุธนิวเคลียร์ การกำหนดแผนการรบ เป็นต้น
4. การจำลองปัญหาด้านการจราจร
5. การออกแบบและการควบคุมระบบการขนส่ง เช่น การจราจร สนามบิน หรือท่าเรือ เป็นต้น
6. การศึกษาและออกแบบรูปแบบของการให้บริการต่างๆ เช่น โรงพยาบาล ที่ทำการ ไปรษณีย์ ธนาคาร ร้านอาหาร เป็นต้น
7. การจำลองผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจ เมื่อมีการตัดสินใจใช้นโยบายต่าง

2.2.1 ระบบงาน (System)

ระบบงาน (System) หมายถึง กลุ่มขององค์ประกอบ (Element or Entity) ที่มีความสัมพันธ์กัน ทำงานร่วมกันเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของระบบงานนั้นๆ แต่เนื่องจากการจำลองสถานการณ์นั้นเป็นการศึกษากระบวนการทำงานของระบบทั้งระบบ จึงจำเป็นต้องทราบรูปแบบที่ชัดเจนของระบบงานที่กำลังศึกษา โดยทำการกำหนดขอบเขตของระบบงานนั้น (System Boundary) ในบางครั้งการปฏิบัติงานของระบบงานอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปัจจัยภายนอก ซึ่งเรียกว่า สิ่งแวดล้อมของระบบ (Environment System) โดยองค์ประกอบภายในระบบ และสิ่งแวดล้อมของระบบจะมีลักษณะเฉพาะตัว (Attributes) และองค์ประกอบเหล่านี้จะก่อให้เกิดกิจกรรม (Activities) และกิจกรรมภายใต้เงื่อนไขบางประการจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบงาน (System Status) ดังนั้นนอกจากการกำหนดขอบเขตของระบบงานแล้วยังต้องกำหนดลักษณะเฉพาะตัวขององค์ประกอบ กิจกรรมที่จะเกิดขึ้นจากองค์ประกอบเหล่านั้น และการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบงานอันเนื่องมาจากกิจกรรมขององค์ประกอบ

2.2.1.1 ประเภทของระบบงาน

การจำแนกประเภทของระบบงานนั้นสามารถจำแนกตามการนำไปใช้งานได้หลายแบบ ในการจำลองสถานการณ์นั้นจำแนกโดยอาศัยลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบ (System Status) ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 ประเภท คือ

1) ระบบงานต่อเนื่อง (Continuous System)

ระบบงานต่อเนื่อง (Continuous System) คือ ระบบงานที่เปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบต่อเนื่องตลอดเวลา เช่น ระดับน้ำภายหลังเขื่อน ซึ่งจะเกิดการเพิ่ม – ลดตลอดเวลา ระบบการจราจร รวมไปถึงระบบการฝาก – ถอนเงินของธนาคาร

2) ระบบงานไม่ต่อเนื่อง (Discrete System)

ระบบงานไม่ต่อเนื่อง (Discrete System) คือ ระบบงานที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบเป็นช่วงๆ ระยะเวลาใดระยะเวลาหนึ่ง เช่น ระบบการทำงานห้องจ่ายยา 1 ฝ่ายเภสัชกรรมโรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบระหว่าง 08.00 – 16.00 น.

3) ระบบแน่นอน (Deterministic System)

ระบบแน่นอน (Deterministic System) คือ ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบ แต่สามารถบอกได้แน่นอนว่าเป็นเช่นไร เช่น ระบบปฏิบัติงานหนึ่งจะมีผลลัพธ์ออกมาทุก 15 นาที

4) ระบบไม่แน่นอน (Stochastic System)

ระบบไม่แน่นอน (Stochastic System) คือ ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบที่ไม่สามารถบอกได้แน่นอนว่าจะเกิดอะไรขึ้น

5) ระบบสถิต (Static System)

ระบบสถิต (Static System) คือ ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบไม่เกี่ยวข้องกับเวลา

6) ระบบพลวัต (Dynamic System)

ระบบพลวัต (Dynamic System) คือ ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะภาพของระบบโดยมีความเกี่ยวข้องกับเวลา

2.2.2 การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation)

การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เป็นการศึกษาปัญหาของระบบงานด้วยแบบจำลองซึ่งอยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์นี้เป็นที่นิยมที่สุดของการใช้การจำลองสถานการณ์ เพราะสามารถประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาของระบบงานได้มากมายหลายประเภท และปัจจุบันการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์นับว่าเป็นเทคนิคที่ได้รับการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย

ในอดีตการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์นั้นจะใช้ภาษาทางคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นภาษาสำหรับเขียนโปรแกรมสำหรับการจำลองสถานการณ์ แต่ในปัจจุบันนี้มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการจำลองสถานการณ์โดยเฉพาะ เช่น โปรแกรม ProModel โปรแกรม Arena โปรแกรม Extend เป็นต้น ซึ่งจะช่วยให้ผู้ที่ต้องการทำการจำลองสถานการณ์นั้นไม่ต้องยุ่งยากกับการเขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และการแสดงผลด้วยภาพกราฟฟิค (Graphic) นั้นทำให้ผู้ที่ทำการจำลองสถานการณ์สามารถเข้าใจในระบบได้ง่ายกว่าการแสดงผลด้วยตัวเลขหรือตัวอักษรเพียงอย่างเดียว

ก่อนการทำการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เราต้องทำการวิเคราะห์ระบบที่ต้องการจำลอง เพื่อหาองค์ประกอบหลักของระบบนั้นก่อน สิ่งที่ต้องคำนึงถึง 2 ประการที่สำคัญ คือ ลักษณะของระบบที่ต้องการศึกษา และลักษณะ (รูปแบบ) ของการศึกษา

ประการแรก ลักษณะของระบบที่ต้องการศึกษา การจำลองแบบของระบบนั้นต้องใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุด การใช้เครื่องหมายหรือสัญลักษณ์แทนสิ่งต่างๆ นั้นต้องสามารถแสดงความหมายและพฤติกรรมของสิ่งนั้นๆ อย่างมีความถูกต้องและเหมาะสม ประการต่อมา ลักษณะของการศึกษาซึ่งประกอบไปด้วย วัตถุประสงค์ของการศึกษา จุดที่ต้องการทำการจำลอง และผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้องค์ประกอบทั้งสองนี้ทำให้เราสามารถตัดสินใจได้ว่าแบบจำลองควรมีระดับความถูกต้องเท่าใด ส่วนประกอบที่เหมาะสมและจำเป็นต้องใช้คืออะไร

รูปแบบของการจำลองแบบที่ต้องการศึกษานั้น สามารถแบ่งออกได้เป็นสองลักษณะ คือ การจำลองแบบแบบต่อเนื่อง (Continuous) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ซึ่งในการจำลองนั้นต้องสามารถระบุได้ว่าแบบที่จะทำการจำลองนั้นเป็นรูปแบบใด

การเปลี่ยนแปลงแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง (Continuous and Discrete Change)

ในการจำลองแบบ ของระบบหนึ่งๆ นั้น ปัจจัยที่เป็นตัวแปรสำคัญซึ่งทำให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงก็คือ เวลา และเราควรมองให้ระบบ เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะหนึ่ง

สู่อีกสถานะหนึ่งผ่านช่วงเวลาตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบสามารถคิดให้อยู่ในรูปของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณนี้ ได้กล่าวถึง 4 รูปแบบ คือ

1. แบบต่อเนื่อง ณ ทุกๆ จุดเวลา (Continuously at Point of Time) ปริมาณในรูปแบบนี้จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาอย่างราบเรียบ (Smoothly) และค่าต่างๆ สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ทุกๆ จุดของเวลา
2. แบบต่อเนื่องเฉพาะจุดของเวลา (Continuously but only Discrete Time Point) ปริมาณจะเปลี่ยนแปลงอย่างราบเรียบ (Smoothly) แต่ช่วงที่เปลี่ยนแปลงไปจะเกิดขึ้นเฉพาะเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้าเท่านั้น
3. แบบไม่ต่อเนื่อง ณ ทุกๆ จุดของเวลา (Discrete at Any Point of Time) การจำลองแบบนี้ปริมาณจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด ซึ่งเกิดขึ้นได้ ณ ทุกๆ จุดของเวลา
4. แบบไม่ต่อเนื่องเฉพาะจุดของเวลา (Discrete but only at Discrete of Time) ปริมาณรูปแบบนี้จะเปลี่ยนแปลงทันที ณ จุดของเวลาที่กำหนดไว้

2.2.2.1 กระบวนการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

ในการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์นั้นมีขั้นตอนและรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. การศึกษา วิเคราะห์ และกำหนดปัญหา (Problem Formulation)
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการจำลองสถานการณ์ โดยเป็นการศึกษารูปแบบ และองค์ประกอบของระบบจริง เพื่อกำหนดวัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขต และข้อจำกัดต่างๆ รวมถึงการวัดผลของระบบงานนั้น
2. การออกแบบแบบจำลอง (Model Design)
ข้อมูลและรายละเอียดที่ได้จากการศึกษา วิเคราะห์ และกำหนดปัญหา จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบงานตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา
3. การสร้างแบบจำลอง (Model Formulation)
เป็นขั้นตอนในการแปลงแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4. การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม (Verification)

เป็นขั้นตอนของการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ว่ามีความถูกต้องหรือไม่ สามารถรันโปรแกรมได้หรือไม่

5. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation)

เป็นการตรวจสอบว่าแบบจำลองนั้นเชื่อถือได้ สอดคล้องกับการทำงานของระบบงานจริง และสามารถใช้เพื่อการศึกษากระบวนการตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาได้ ซึ่งอาจจะมีการแก้ไขปรับปรุงแบบจำลองในกรณีที่โปรแกรมนั้นทำงานไม่ถูกต้อง หรือได้ผลลัพธ์ไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่กำหนด

6. การดำเนินการทดลอง (Experimentation)

เป็นการใช้แบบจำลองมาทำการทดลองกับข้อมูลที่จัดเตรียมไว้ โดยอาจมีการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

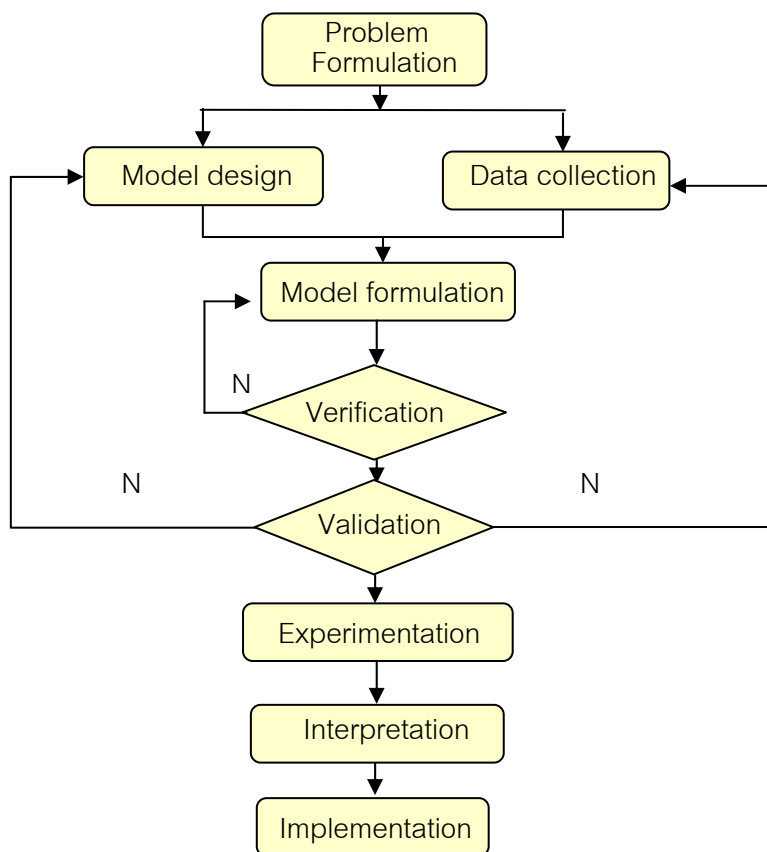
7. การอธิบายผลการทดลอง (Interpretation)

เป็นขั้นตอนในการตีความหมายของผลการทดลองที่เกิดขึ้น เพื่อค้นหาว่าระบบงานจริงมีปัญหายังไง และจะแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างไร

8. การนำไปใช้งาน (Implementation)

เป็นขั้นตอนของการนำผลการทดลอง และแนวทางการแก้ไขปัญหาไปประยุกต์ใช้กับระบบงานจริง

โดยขั้นตอนในการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์นั้นสามารถเขียนเป็นแผนผังแสดงการทำงานได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4

ขั้นตอนในการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

2.2.2.2 ประโยชน์ของการจำลองสถานการณ์ (Advantage of Simulation)

เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ (Simulation) เป็นการสร้างแบบจำลอง (Model) จากระบบงานจริง (Real System) เพื่อทำการศึกษา ทำนาย หรือทดลองระบบ ดังนั้นการจำลองแบบ (Simulation) จึงมีประโยชน์หลายด้าน คือ

1. ไม่สร้างความเสียหายกับระบบที่ทำการศึกษา เนื่องจากการทดลองใดๆ กับ แบบจำลองจำไม่ต้องยุ่งเกี่ยวกับระบบจริง และไม่ส่งผลกระทบต่อระบบจริงทำให้สามารถที่จะศึกษาได้ตามที่ต้องการ
2. ประหยัดค่าใช้จ่ายในการจำลองแบบเป็นการสร้างสถานการณ์ขึ้นภายในแบบจำลองดังนั้นจึงไม่เกิดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนระบบจริง

3. ประหยัดเวลา บางการทดลองอาจต้องการผลที่เกิดจากการทดลองในระยะยาวซึ่งต้องใช้เวลามากหากศึกษาจากระบบจริงทำให้ไม่ทันต่อความต้องการแต่อาจใช้เวลาเพียงเล็กน้อยในแบบจำลอง

4. สามารถควบคุมเงื่อนไขได้ การศึกษาจากแบบจำลองทำให้สามารถควบคุม ผลกระทบต่างๆ ทั้งภายนอกและภายในได้ ในขณะที่ระบบจริงไม่สามารถทำได้

5. สามารถทดลองได้หลายรูปแบบเงื่อนไข เพราะการศึกษาจากระบบจริงจะทำให้ ระบบเปลี่ยนแปลงไปทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองหลายๆ แบบได้ ในขณะที่การจำลองสามารถทำได้หลายรูปแบบตามที่ต้องการ

6. ทฤษฎีการจำลองนั้นเป็นสิ่งที่ตรงไปตรงมา เข้าใจง่าย

7. ช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนเกินกว่าที่จะได้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียวได้สะดวก โดยเฉพาะกรณีที่มีความน่าจะเป็น (Stochastic Model) เข้ามาเกี่ยวข้อง

8. การที่คุณสมบัติของการจำลองเป็นลักษณะของการบรรยาย จึงทำให้การทดลองเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร หรือความสัมพันธ์ของตัวแปรไปเป็นอย่างอื่น เพื่อศึกษาหาผลกระทบในรูปของตัวแปรสถานะ (State Variable) ทำได้ง่าย

2.2.2.3 ข้อจำกัดของการจำลองแบบ (Disadvantage of Simulation)

1. ในการสร้างแบบจำลอง (Model) ที่ดีและมีประสิทธิภาพนั้น อาจต้องใช้ เวลา และค่าใช้จ่ายจำนวนมาก รวมถึงต้องอาศัยความสามารถและความเข้าใจในระบบของ ผู้สร้างแบบจำลอง

2. การบอกว่า แบบจำลองที่ได้สามารถเป็นตัวแทนของระบบที่ทำการจำลอง เป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญที่คุ้นเคยกับระบบ หรือใช้การทดลองต่างๆ เพื่อช่วย ยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง

3. เนื่องจากข้อมูลต่างๆ ในแบบจำลองมักจะเป็นตัวเลข ดังนั้นผลที่ได้จาก แบบจำลองจึงมักเป็นค่าประมาณ

4. ไม่มีการรับรองผลที่ได้รับ แต่จะเป็นการให้ทางเลือกกับผู้ทำการจำลอง นำไปใช้ ในการตัดสินใจ

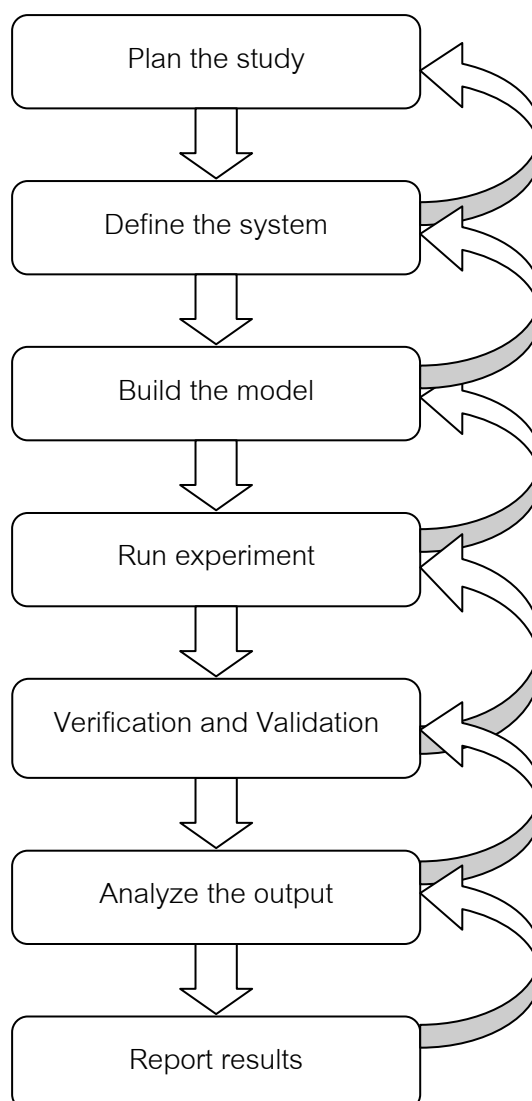
5. มีความเฉพาะเจาะจงกับปัญหามาก ทำให้การโอนย้ายไปใช้กับปัญหาอื่น กระทำได้ยาก

2.2.3 ขั้นตอนการทำแบบจำลอง

การดำเนินการจำลองแบบจำลองสถานการณ์จำเป็นต้องมีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับข้อมูลของผลิตภัณฑ์ความสัมพันธ์ต่างๆ ในแต่ละงาน ตลอดจนข้อมูลแวดล้อมต่างๆ ที่จำเป็น มีการวางแผนระบบด้วยความเข้าใจและคำนึงถึงความต้องการ วัตถุประสงค์และสมมติฐานของการดำเนินงานนั้นๆ โดยการดำเนินการสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. การวางแผนการศึกษางาน (Plan the Study)
2. การกำหนดรายละเอียดของระบบ (Define the System)
3. การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Build the Model)
4. การทดลองแบบจำลองสถานการณ์ (Run Experiment)
5. การทดสอบและตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลองสถานการณ์ (Model Verification and Validation)
6. วิเคราะห์ผล (Analyze the Output)
7. สรุปและรายงานผล (Report Results)

ในทางปฏิบัติ การดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนอาจมิได้เสร็จสมบูรณ์ในการดำเนินงานครั้งแรก หากในขั้นตอนใดเกิดปัญหาไม่สามารถดำเนินงานต่อไปในขั้นตอนต่อไปได้ อาจจำเป็นต้องย้อนกลับขึ้นไปดำเนินงานในขั้นตอนก่อนหน้า เพื่อทบทวน ปรับปรุง หรือเสนอเปลี่ยนแปลงข้อมูลบางส่วน เพื่อให้สามารถดำเนินงานต่อไปได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสถานการณ์

ขั้นตอนที่ 1 การวางแผนการศึกษางาน (Plan the Study)

หลายครั้งการจำลองแบบเกิดความล้มเหลว ไม่ประสบความสำเร็จ อันเป็นเหตุมาจากการวางแผนที่ไม่ดีตั้งแต่เริ่มแรก เช่น การกำหนดวัตถุประสงค์ที่ผิดพลาด, การวางแผนงานที่ไม่ชัดเจน คลุมเครือ เป็นต้น ดังนั้น ขั้นตอนการวางแผนจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งผู้ใช้โปรแกรมต้องคำนึงถึงอย่างมาก

การวางแผนการศึกษางาน สามารถแบ่งได้เป็นขั้นตอนย่อย ได้ดังนี้

1. กำหนดวัตถุประสงค์ (Defining Objective)
2. บ่งชี้ข้อจำกัด และเงื่อนไขต่างๆ ในระบบ (Identifying Constraints)
3. เตรียมรายละเอียดการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ (Preparing Simulation Specification)
4. ตั้งงบประมาณและตารางการดำเนินงาน (Developing a Budget and Schedule)

ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดรายละเอียดในระบบ (Defining the System) สามารถทำตามขั้นตอนย่อยได้ดังนี้

1. พิจารณาข้อมูลที่ต้องการ (Determine Data Requirements)
2. จัดหาแหล่งข้อมูลที่เหมาะสม (Use Appropriate Data Sources)
3. ตั้งสมมติฐาน
4. แปลงข้อมูลดิบให้เป็นข้อมูลสำเร็จรูป เพื่อนำไปใช้ในโปรแกรม (Convert Data into a Useful Form)
5. จัดทำเอกสารและรับรองข้อมูล (Document and Approve the Data)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างแบบจำลอง (Building the Model) หลังจากที่ได้ข้อมูลเพียงพอแล้ว ขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดองค์ประกอบ และความสัมพันธ์ขององค์ประกอบที่ก่อให้เกิดเป็นปัญหาขึ้น จำแนกว่าองค์ประกอบใดเป็นองค์ประกอบที่แน่นอนสามารถกำหนดค่าได้อย่างชัดเจน องค์ประกอบใดไม่มีความแน่นอนการกำหนดค่าต่างๆ จะขึ้นกับความน่าจะเป็นในการกำหนดค่านั้นๆ ในกรณีที่มีองค์ประกอบที่มีความไม่แน่นอนจะต้องหาการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution) ขององค์ประกอบนั้นๆ ซึ่งอาจจะทำได้โดยการเก็บข้อมูลในอดีตที่มีสภาพการณ์คล้ายกับที่เกิดขึ้นในปัจจุบันมาทำการแจกแจงความน่าจะเป็น หรือถ้าเป็นเรื่องใหม่หรือเหตุการณ์ที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน ก็อาจจะเทียบเคียงได้จากสิ่งที่คล้ายๆ กับที่ผู้อื่นกำลังทำอยู่ในปัจจุบัน

ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการเริ่มกำหนด การดำเนินการของแบบจำลองสถานการณ์เพื่อให้บรรลุตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่วางไว้ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลที่รายงานออกมาเป็นสถิติหรือกราฟ ว่าได้ผลลัพธ์ที่เราต้องการหรือไม่ เมื่อผลที่รายงานออกมาเป็นไปตามต้องการ ทำการทบทวนและขัดเกลาระบบให้ดำเนินการด้วยความรวดเร็วและง่ายต่อการพบและแก้ไขข้อผิดพลาด เพิ่มเติมรายละเอียดอื่นๆ ตามความเหมาะสม ต่อจากนั้น

ตรวจสอบการทำงานและข้อผิดพลาดอื่นๆ ของแบบจำลองอีกครั้ง เมื่อเสร็จสิ้นจึงรับรองและประกาศใช้แบบจำลองสถานการณ์ในสถานการณ์จริง

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการจำลองแบบ (Run Experiments)

การทดลองแบบจำลองสถานการณ์เป็นพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้กับการดำเนินงานจริง เมื่อปรับปรุงให้ได้ผลการดำเนินการที่ดียิ่งขึ้น โดยในการทำการทดลองโปรแกรม (Run) ควรทำการทดลองซ้ำกันหลายๆ ครั้งเพื่อดูข้อผิดพลาด และผลลัพธ์ต่างๆ ที่เราต้องการ

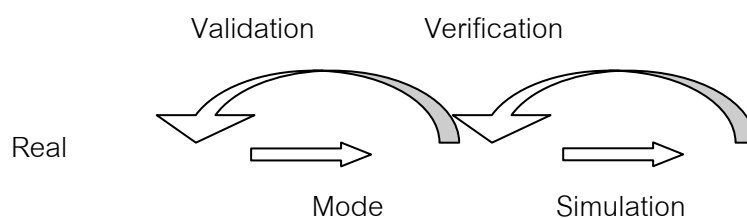
การจำลองแบบอาจแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. Terminating Simulations คือ ลักษณะของการทดลองแบบจำลองสถานการณ์ที่มีการกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง มีการระบุจุดเวลาที่เริ่มต้นและจบลงไว้อย่างชัดเจน เช่น 1 วัน, 1 สัปดาห์ หรือ 1 เดือน

2. Non – Terminating Simulations คือ ลักษณะการจำลองแบบจำลองสถานการณ์ ซึ่งดำเนินการจำลองไปเรื่อยๆ อาจไม่ได้ระบุจุดสิ้นสุดการจำลอง และผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาผ่านไป

ขั้นตอนที่ 5 การทดสอบและตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Verification and Validation)

ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดก่อนที่จะนำแบบจำลองสถานการณ์ที่ทำการจำลองแบบไปใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ก็คือการยืนยันและหาความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือเพียงพอต่อการใช้งาน โดยการ Validation ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่าแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นมา มีความถูกต้องทั้งด้านพฤติกรรมและข้อมูลที่ตรงกับระบบจริง (Real System) และในการยืนยันว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถทำการจำลองสถานการณ์ของระบบได้อย่างถูกต้องก็คือการ Verification นั่นเอง



ภาพที่ 2.6

ลักษณะของการจำลองสถานการณ์

Model Validation

Sagent (1996) ได้มีการเสนอเทคนิคในการวัดความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์ในด้านของที่น่าเชื่อถือ ความเป็นเหตุเป็นผล ระดับความมั่นใจในความเชื่อถือ และผลของข้อมูลซึ่งมีทั้งหมด 4 เทคนิค ดังนี้

1. การสอบถามผู้เชี่ยวชาญ (Face Validation) เป็นวิธีในการตรวจสอบความถูกต้องจากการถามผู้เชี่ยวชาญ หรือผู้ที่มีความคุ้นเคยและทำงานกับระบบนั้นๆ จากนั้นจึงทำการปรับปรุงค่า หรือตัวแปรต่างๆ จนผู้เชี่ยวชาญยอมรับในแบบจำลองสถานการณ์ว่าสามารถเชื่อถือได้จริง

2. การกำหนดค่า (Fixed Valued) เป็นการกำหนดค่าค่าหนึ่งเพื่อให้เป็นค่า Input ของแบบจำลองสถานการณ์ จากนั้นจึงคำนวณผลที่น่าจะเกิดขึ้นโดยใช้ความเป็นเหตุเป็นผล และพฤติกรรมของระบบมาช่วย แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า Output ของแบบจำลองสถานการณ์ถ้าค่าที่ได้ตรงกันก็ถือว่าแบบจำลองสถานการณ์นั้นมีความถูกต้อง

3. การทดสอบค่าเสื่อม (Degenerate Test) สามารถทำได้โดยการเลือกค่า Input จากการทดลอง เทคนิคนี้จะประยุกต์การทดลองและการเปรียบเทียบในแต่ละขบวนการหรือทั้งหมดของแบบจำลองสถานการณ์ ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสถานการณ์จำเกิดขึ้นหากผลที่แสดง Output นั้นตรงกัน

4. การทดสอบในสภาวะที่ผิดปกติ (Extreme - Condition) การกำหนด Input ในระบบที่ผิดปกติหรือระบบที่ไม่สัมพันธ์กัน จะถูกทดสอบโดยในสมการหลักๆ ภายในแบบจำลองสถานการณ์นั้นๆ ผลของแบบจำลองที่มีการแปรผัน ตัวอย่างเช่น การคิดค่าจ้างแรงงานโดยหากเพิ่มสายการผลิต หรือเพิ่มเครื่องจักรที่ต้องมีคนควบคุมค่าจ้างแรงงานจึงจำเป็นต้องมีค่าจ้างมากขึ้น แต่หากว่าค่าในแบบจำลองแสดงผลลดลง จะแสดงให้เห็นว่ามีการคำนวณผิดพลาดที่สมการค่าจ้างแรงงาน

Model Verification

วิธีการหรือเทคนิคในการ Verification ทำให้แน่ใจว่าแบบจำลองสถานการณ์มีพฤติกรรมอย่างที่ต้องการให้เป็น โดยมีวิธีการใช้ในขั้นตอนนี้ ดังนี้

1. การทดสอบความถูกต้องของกลไกภายในแบบจำลองสถานการณ์ (Internal Validation)
2. การถามความเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ (Face)
3. การทดสอบความถูกต้องของสมมติฐาน (Hypothesis Validity)
4. การทดสอบความถูกต้องของตัวแปรและพารามิเตอร์ (Variable Parameters validity)

ขั้นตอนที่ 6 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Analyze the Output)

ผลลัพธ์ที่รายงานออกมามีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากผลลัพธ์ที่แสดงออกมาทำให้ทราบว่าระบบจำลองสถานการณ์มีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ยังสามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาทางปรับปรุงรายละเอียดต่างๆ เพื่อให้ระบบจำลองสถานการณ์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 7 สรุปและรายงานผล (Report Results)

ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการรายงานข้อแนะนำต่างๆ เช่น ข้อแนะนำในการปรับปรุงระบบให้ดีขึ้น โดยข้อแนะนำควรเข้าใจง่ายและชัดเจน สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการตัดสินใจในการเปลี่ยนแปลงระบบการดำเนินการจริงได้ นอกจากนี้ยังอาจเสนอแนะข้อควรระวังหรือเงื่อนไขต่างๆ ในการใช้แบบจำลองสถานการณ์

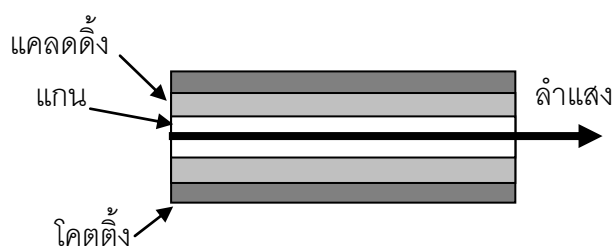
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเส้นใยแก้วนำแสง

อุตสาหกรรมการผลิตตัวขยายสัญญาณที่ทำจากเส้นใยแก้วนำแสงนั้นผู้ใช้งานจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อความเข้าใจในการใช้งาน และสามารถนำเส้นใยแก้วนำแสงไปใช้งานได้ถูกต้องโดยไม่สร้างปัญหาในกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้นจากความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ในการปฏิบัติงานของพนักงาน ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดโดยทั่วไป ดังนี้

2.3.1 นิยามและหลักการของเส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้ว หมายถึง เส้นใยโปร่งแสงทรงกระบอกตันขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้งเส้นประมาณ 125 ไมโครเมตร (μm) หรือ 0.125 มิลลิเมตร โดยทั่วไปวัสดุที่ใช้ทำเส้นใย

แก้วมักเป็นสารประกอบประเภทซิลิกา หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งก็คือแก้วบริสุทธิ์ โดยเนื้อแก้วนี้อาจถูกเจือ (Doped) ด้วยสารหรือวัสดุบางอย่างที่สามารถควบคุมอัตราการเจือได้เพื่อให้แก้วมีค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index) ตามต้องการโครงสร้างของใยแก้วนำแสงประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นแกน (Core) ซึ่งจะอยู่ตรงกลางหรือชั้นใน ส่วนกลางของเส้นใยแก้วนำแสงและเป็นส่วนนำแสง ลำแสงที่ผ่านไปในแกนจะถูกขังหรือเคลื่อนที่ไปตามแกนของเส้นใยแก้วนำแสงด้วยกระบวนการสะท้อนกลับหมดภายในแกนจะถูกหุ้มด้วยส่วนห่อหุ้มที่เรียกว่าแคลดดิ้ง (Cladding) โดยส่วนนี้จะมีดัชนีหักเหต่ำกว่าส่วนของแกนเพื่อให้แสงที่เดินทางภายในและเกิดการสะท้อนอยู่ภายในแกนตามกฎของการสะท้อนด้วยการสะท้อนกลับหมดโดยใช้หลักของมุมวิกฤติ แล้วถูกห่อหุ้มด้วยส่วนป้องกันหรือโคตติ้ง (Coating/ Buffer) อีกชั้นหนึ่งซึ่งเป็นชั้นที่ต่อจากแคลดดิ้ง ทำหน้าที่กันแสงจากภายนอกเข้าเส้นใยแก้วนำแสง และยังใช้ประโยชน์เมื่อมีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง โครงสร้างอาจจะประกอบไปด้วยชั้นของพลาสติกหลาย ๆ ชั้น นอกจากนั้นส่วนโคตติ้งยังทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันจากแรงกระทำภายนอกอีกด้วย ตัวอย่างของค่าดัชนีหักเห เช่น แกนมีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.48 ส่วนของแคลดดิ้งและโคตติ้งซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแสงจากแกนไปภายนอกและป้องกันแสงภายนอกกรบกวน จะมีค่า ดัชนีหักเหเป็น 1.46 และ 1.52 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7

โครงสร้างของเส้นใยแก้ว หรือเส้นใยนำแสง (Optical Fibre)

ที่มา : Optics Communications (Raikar และคณะ, 2007)

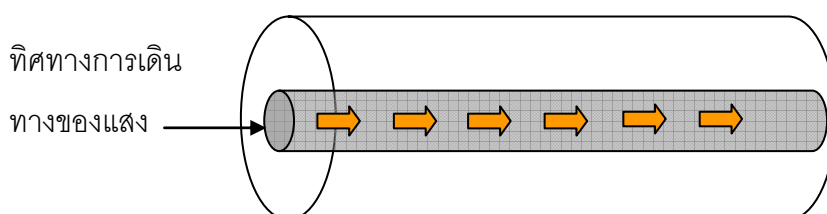
ส่วนของเส้นใยแก้วที่เป็นเนื้อแก้วนี้เรียกว่า เส้นใยแก้วเปลือย (Bare Fibre) จะมีความเปราะบางมากเนื่องจากมีขนาดเล็กเท่าเส้นผม จึงต้องทำการเคลือบผิวของมันด้วยสารประเภทซิลิโคนโพลีเมอร์ หรือพลาสติกบางๆ ซึ่งส่วนนี้มักเรียกทับศัพท์ว่าโคตติ้ง (Coating) หรือแจ็กเก็ต (Jacket) เส้นใยแก้วที่เคลือบผิวด้วยโคตติ้งจะมีความแข็งแรงมาก สามารถรับน้ำหนักและแรง

กระแทกธรรมดาได้พอสมควร กล่าวคือ สามารถจับโยนและดัดโค้งงอเป็นวงเล็กๆ ได้โดยไม่ทำให้เส้นใยแก้วแตกหรือหักเลย

2.3.2 ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสง

เส้นใยแก้วนำแสงสามารถแบ่งตามความสามารถในการนำแสงออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single Mode Optical Fibres, SMF) เป็นการใช้ตัวนำแสงที่บีบลำแสงให้พุ่งตรงไปตามท่อแก้ว โดยมีการกระจายแสงออกทางด้านข้างน้อยที่สุด เส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวจึงเป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีกำลังสูญเสียทางแสงน้อยที่สุดเหมาะสำหรับในการใช้กับระยะทางไกลๆ การเดินสายใยแก้วนำแสงกับระยะทางไกลมาก เช่น เดินทางระหว่างประเทศ ระหว่างเมือง เส้นใยแก้วชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนประมาณ 4-10 ไมครอน และส่วนที่เป็นแคลดดิ้งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 80-125 ไมครอน ข้อดีของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวคือ แสงจะไม่เกิดการแตกกระจาย (Modal Dispersion) ซึ่งเกิดขึ้นกับเส้นใยแสงชนิดหลายโหมด ดังนั้นจึงทำให้การรับสัญญาณที่ปลายทางดีกว่า ทำให้ส่งสัญญาณได้ไกลกว่า ภาพที่ 2.8 อธิบายการเดินทางของแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว ซึ่งจะเห็นว่าเส้นทางการเดินทางของแสงจะเป็นแนวเดียวตามลูกศร



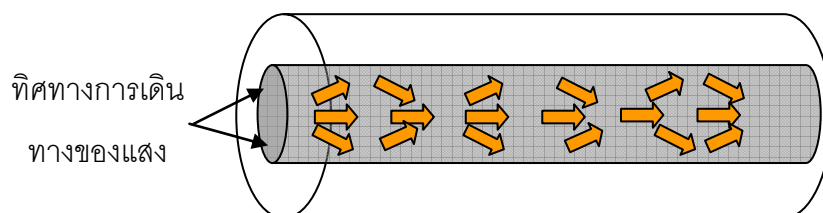
ภาพที่ 2.8

ลักษณะการเดินทางของแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

ที่มา : Optics Communications (Raikar และคณะ, 2007)

2. เส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดหรือโหมดรวม (Multimode Optical Fibres, MMF) เป็นเส้นใยแก้วนำแสงที่มีลักษณะการกระจายแสงออกด้านข้างได้ ดังนั้นจึงต้องสร้างให้มีดัชนีหักเหของแสงกับอุปกรณ์ฉาบผิวที่สัมผัสกับแคลดดิ้งให้สะท้อนกลับหมดหากการให้ดัชนีหักเหของแสงมีลักษณะทำให้แสงเลี้ยวเบนทีละน้อย เราเรียกว่าแบบเกรดอินเด็กซ์ (Grade Index) หากใช้แสงสะท้อนโดยไม่ปรับคุณสมบัติของแท่งแก้วให้แสงค่อยเลี้ยวเบนก็เรียกว่าแบบสเตปอินเด็กซ์

(Step index) โครงสร้างของเส้นใยแก้วชนิดนี้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนมากขึ้นถึงประมาณ 62.5 ไมครอน ภาพที่ 2.9 อธิบายการเดินทางของแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดหรือ โหมดร่วม ซึ่งจะเห็นว่าเส้นทางการเดินทางของแสงจะกระจายออกหลายทิศทางตาม



ภาพที่ 2.9

ลักษณะการเดินทางของแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดหรือโหมดร่วม

ที่มา : Optics Communications (Raikar และคณะ, 2007)

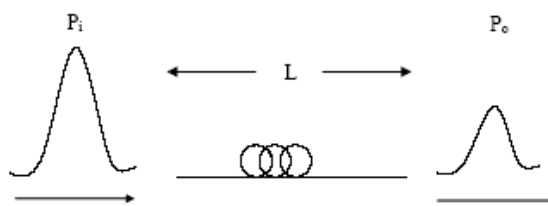
2.3.3 การสูญเสียของสัญญาณแสงในเส้นใยแก้วนำแสง (Attenuation)

การส่งสัญญาณข้อมูลในเส้นใยแก้วนำแสงจะเกิดการเพี้ยนหรือผิดรูปไปตามระยะทางที่แสงเดินทางลักษณะที่แสงเกิดการเพี้ยน (Distortion) ในเส้นใยแก้วมีสองลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่ เกิดการสูญเสียสัญญาณ (Attenuation, Loss) และเกิดดิสเพอร์ชัน (Dispersion) ซึ่งอย่างหลังนี้จะมีผลเห็นได้ชัดเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลโดยจะเป็นตัวกำหนดปริมาณข้อมูลหรืออัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของระบบเส้นใยแก้ว

2.3.3.1 นิยามของการสูญเสียสัญญาณ

พิจารณาการส่งสัญญาณแสงเข้าไปในเส้นใยแก้ว เมื่อ P_i หมายถึง ค่าความเข้มแสงที่ถูกส่งเข้าไปในเส้นใยแก้วด้านขาเข้า มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt: W) P_o หมายถึง ความเข้มแสงที่ออกจากเส้นใยแก้วที่ปลายทาง มีหน่วยเป็นวัตต์ และ L หมายถึง ความยาวของเส้นใยแก้วที่แสงเดินทาง มีหน่วยเป็นกิโลเมตร (km) ค่าการสูญเสียสัญญาณ (Loss) หรือการลดทอนสัญญาณในเส้นใยแก้วต่อหน่วยความยาวมักแทนด้วยสัญลักษณ์อัลฟา (α) และมักมีหน่วยเป็น เดซิเบลต่อกิโลเมตร (dB/km) จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 และอธิบายได้ดังภาพที่ 2.10

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \quad \text{dB} \quad (2.3)$$



ภาพที่ 2.10

กำลังงานของแสงหรือความเข้มแสงในระบบเส้นใยแก้ว

ที่มา : เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น (อิศม์ ฤกษ์บุตร, 2002)

ค่าการลดทอนสัญญาณของเส้นใยแก้วเป็นตัวแปรสำคัญที่ช่วยกำหนดระยะห่างระหว่างสถานีส่งและสถานีรับในระบบสื่อสาร และใช้เป็นตัวพิจารณาในการเลือกชนิดของเส้นใยแก้วที่จะใช้ในระบบสื่อสาร ตัวอย่างเช่น หากเส้นใยแก้วมีค่าการลดทอนสัญญาณน้อยก็จะสามารถใช้กับสถานีที่ห่างไกลมากได้ เป็นต้น นอกจากนี้ ค่าการลดทอนของเส้นใยแก้วยังมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ใช้ในระบบอีกด้วย

2.3.3.2 กลไกการสูญเสียสัญญาณแสงในเส้นใยแก้ว

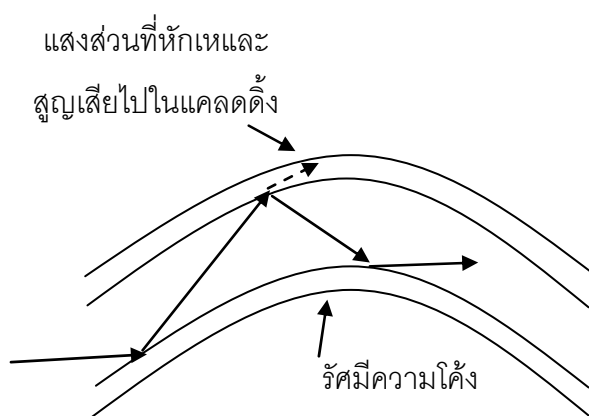
เมื่อแสงเดินทางในเส้นใยแก้ว ค่าความเข้มแสงจะมีค่าลดทอนตามระยะทางที่แสงเดินทางเรียกว่า การเกิดการสูญเสียสัญญาณหรือเกิดการลดทอนสัญญาณขึ้น กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ ได้แก่ดังต่อไปนี้

1. การดูดซับพลังงานจากวัสดุตัวกลาง (Absorption) เป็นการลดทอนสัญญาณแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วเนื่องมาจากการดูดซับพลังงานแสงจากโมเลกุลของวัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้วเอง เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวมัน ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานแสงขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางโมเลกุลและความบริสุทธิ์ของเนื้อสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว

2. การกระเจิงของแสง (Scattering of Light) เมื่อแสงเดินทางกระทบกับโมเลกุลของสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้ว พลังงานของแสงบางส่วนที่มีค่าน้อยๆ จะเกิดการกระเจิงหรือการกระจายออกไปทุกทิศทางทำให้พลังงานหรือความเข้มของแสงที่เดินทางต่อไปข้างหน้ามีค่าลดลง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการกระเจิงแบบเรย์เลย์ (Rayleigh Scattering) อย่างไรก็ตามค่าความเข้มที่สูญเสียไปเนื่องจากการกระเจิงนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่เกิดการกระเจิง รวมทั้งสิ่งแปลกปลอมที่เจือปนอยู่กับเนื้อสารที่ใช้ทำเส้นใยแก้วด้วย การกระเจิงของแสงทำให้เกิดการ

กระจายพลังงานออก (Radiation Losses) ซึ่งเป็นการสูญเสียสัญญาณแสงเนื่องมาจากโครงสร้างหรือลักษณะการจัดวางของเส้นใยแก้วเอง ทำให้พลังงานแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วเล็ดลอดออกมาในส่วนของแคลดดิงและไม่สามารถกลับคืนสู่แกนได้ เหมือนกับการแผ่รังสี (Radiation) ของแสงออกนอกเส้น ทาง ลักษณะของเส้นใยแก้วที่ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณในรูปแบบนี้ มักมีลักษณะเป็นการโค้งงอ (Bending) ของเส้นใยแก้วโดยสามารถอธิบายได้ในภาพที่ 2.11 ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบ คือ

2.1 ความโค้งขนาดใหญ่ (Macro Bending) เกิดจากการจัดวางเส้นใยแก้วที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรง แต่ต้องจัดโค้งงอไปมา ซึ่งถือเป็นสิ่งจำเป็นที่ยากจะหลีกเลี่ยงในทางปฏิบัติ จากภาพที่ 9 ซึ่งแทนแนวการเดินทางของแสงด้วยเส้นตรง เมื่อแสงเดินทางไปถึงจุดที่เส้นใยแก้วเกิดการโค้งงอ แสงอาจเดินทางไปกระทบรอยต่อระหว่างแกนกับแคลดดิงในลักษณะมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหตามกฎของสเนลล์ หากเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้งน้อยๆ หรือกล่าวคือ มีรัศมีมีความโค้งมากๆ แสงหักเหที่จุดนี้อาจไม่เกิดขึ้นและปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดยังคงมีอยู่ทำให้ไม่มีการสูญเสียความเข้มแสงได้ แต่ถ้าเส้นใยแก้วมีลักษณะความโค้ง มากๆ หรือมีรัศมีมีความโค้งน้อยๆ จนทำให้เกิดการหักเหของแสงเข้าไปในแคลดดิง แสงที่สะท้อนและเดินทางต่อไปในแกนของเส้นใยแก้วจะมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่เสียไปกับแสงหักเห



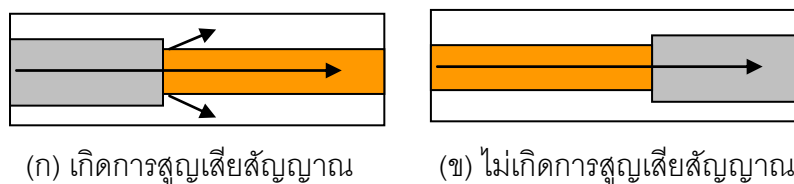
ภาพที่ 2.11

การกระจายพลังงานแสงออกจากความโค้งขนาดใหญ่ของเส้นใยแก้ว
ที่มา : เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น (อริคม ฤกษ์บุตร, 2002)

2.2 ความโค้งขนาดเล็ก (Micro Bending) ลักษณะความโค้งของเส้นใยแก้วแบบนี้อาจเกิดจากโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างแกนกับเคลดดิ้งซึ่งควรจะเรียงเป็นแนวเส้นตรง แต่กลับมีลักษณะไม่เรียบเป็นลอนหรือหักคล้ายกับการเกิดความโค้งที่มีรัศมีน้อยมาก ไม่ต่อเนื่องกัน ทำให้แสงที่เดินทางผ่านเกิดการสูญเสียเช่นเดียวกับกรณีของความโค้งขนาดใหญ่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เส้นใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนไม่คงที่ในช่วงระยะสั้นๆ เมื่อแสงเดินทางมากระทบรอยต่อระหว่างแกนกับเคลดดิ้งในช่วงนี้ จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแสงส่วนหนึ่งเกิดหักเหเข้าไปในเคลดดิ้ง โดยปกติ ความบกพร่องของใยแก้วในลักษณะนี้ มักจะเกิดจากกระบวนการดึงเส้นใยแก้วซึ่งสามารถบรรเทาลงได้โดยการเคลือบโคตติงที่มีความหนาเพิ่มขึ้น ค่าการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากความโค้งขนาดเล็กนี้จะแปรผันตามขนาดความยาวคลื่นของแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วและมีค่าผกผันกับค่านิวเมอริกอลอะเพอร์เจอร์ (Numerical Aperture, NA) ของเส้นใยแก้ว

2.3.3.3 การสูญเสียที่เกิดจากโครงสร้างทางกายภาพ (Fibre Related Loss)

สาเหตุของการสูญเสียสัญญาณในรูปแบบนี้ อาจพิจารณาได้คือการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนของเส้นใยแก้วไม่เท่ากัน (Diameter Mismatch) ในทางปฏิบัติการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วที่มีคุณลักษณะหรือคุณสมบัติต่างกันอาจมีความเป็นไปได้สูงในห้องปฏิบัติการหรือในระบบสายส่งพิเศษส่วนในระบบ สื่อสารโทรคมนาคม เส้นใยแก้วที่ใช้ต่อเชื่อมใยระหว่างสถานีหรือที่อยู่ในระบบเดียวกันมักเป็นเส้นใยแก้วชนิดเดียวกันหรือควรมีคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกันด้วย จึงไม่ควรเกิดปัญหาการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากความไม่เหมือนกันทางกายภาพ แต่ในความเป็นจริง คุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแก้วเส้นเดียวกันไม่ได้มีค่าคงที่ตลอดความยาว แต่อาจมีค่าคลาดเคลื่อนแตกต่างกันได้บ้าง เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้วเส้นเดียวกันที่จุดหนึ่ง อาจมีค่าแตกต่างจากจุดอื่นไปบ้างแม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม แต่ก็อาจเป็นสาเหตุของการสูญเสียสัญญาณได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 นั่นคือเส้นใยแก้ว เส้นซ้ายทำหน้าที่ส่งแสงและเส้นใยแก้วเส้นขวาทำหน้าที่รับแสง หากแกนของเส้นที่ทำหน้าที่ส่งแสงมีขนาดใหญ่กว่าเส้นรับแสง แสงบางส่วนจะเดินทางเข้าสู่เคลดดิ้งของเส้นใยแก้วที่รับแสง ทำให้สูญเสียสัญญาณไป แต่ถ้าขนาดแกนของเส้นส่งมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับแกนของเส้นรับ กำลังงานแสงก็สามารถส่งผ่านกันระหว่างแกนได้หมดทำให้ไม่เกิดการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากความไม่เท่ากันทางกายภาพเกิดขึ้น



ภาพที่ 2.12

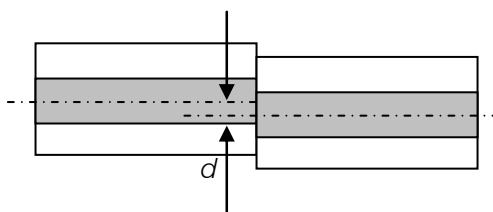
การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนไม่เท่ากัน

ที่มา : Optics Communications (Leproux และคณะ, 2000)

2.3.3.4 การสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากลักษณะการเชื่อมต่อ (Technical-Related Loss)

สาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณเมื่อมีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้ว มักเกิดจากทักษะความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานเอง ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก แม้ว่าการเชื่อมต่อจะใช้เครื่องมือที่มีคุณภาพดีเหมือนกัน ผู้เชื่อมที่มีทักษะประสบการณ์และความชำนาญสูงกว่า จะทำการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วโดยเฉพาะวิธีการสไปลซ์ได้ดีกว่า (เกิดการสูญเสียของสัญญาณต่ำกว่า) ผู้ที่มีทักษะต่ำเนื่องจากผู้ที่มีทักษะสูงจะสามารถจัดลักษณะการเรียงกันของเส้นใยแก้วได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ลักษณะการสูญเสียสัญญาณที่เกิดจากลักษณะการเชื่อมต่อนี้ พอจำแนกออกได้เป็น

1. การเชื่อมต่อของแนวแกนกลาง (Lateral Displacement) หรือที่นิยมเรียกสั้นๆ ว่าออฟเซต (Offset) ดังแสดงในภาพที่ 2.13 การเหลื่อมกันของแนวแกนกลางเส้นใยแก้วนี้ ทำให้พื้นที่หน้าตัดบางส่วนของแกนของเส้นใยแก้วที่ส่งแสงอยู่ในแนวเดียวกับแคลดดิงของเส้นใยแก้ว ที่รับแสง ทำให้แสงบางส่วนเกิดการสูญเสียไปในแคลดดิงได้



ภาพที่ 2.13

การจัดวางเส้นใยแก้วในลักษณะที่ทำให้แนวแกนกลางเหลื่อมกัน

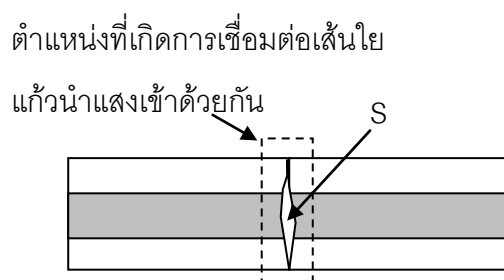
ที่มา : Optics Communications (Leproux และคณะ, 2000)

ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดขึ้น (Loss) ในกรณีของออฟเซตนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Loss = 10 \log \left(1 - \frac{d}{2a} \right) \quad dB \quad (2.4)$$

เมื่อ d เรียกว่า ระยะออฟเซตซึ่งเป็นระยะห่างของแนวแกนกลางของเส้นใยแก้วที่นำมาเชื่อมต่อกัน และ a เป็นค่ารัศมีของแกนของเส้นใยแก้ว

2. การแยกกันของปลายสัมผัส (Longitudinal Separation, S) ของเส้นใยแก้ว นำแสงสองเส้นหลังการเชื่อมต่อ ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจาก ฟองอากาศ, คราบสกปรกที่หน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสง หรือผลกระทบจากการตั้งค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการเชื่อมต่อไม่เหมาะสม ภาพที่ 2.14 แสดงลักษณะของช่องว่างที่เกิดขึ้น ส่งผลให้กำลังงานแสงบางส่วนกระเจิงออกนอกเส้นใยแก้วได้ อันจะก่อให้เกิดการสูญเสียสัญญาณในที่สุด



ภาพที่ 2.14

การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วที่มีช่องว่างเกิดขึ้นตรงจุดเชื่อมต่อ

ที่มา : Optics Communications (Leproux และคณะ, 2000)

ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดขึ้น (Loss) ในกรณีของออฟเซตนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Loss = 10 \log \left(\frac{a}{a + S \tan \theta_c} \right)^2 \quad dB \quad (2.5)$$

โดยที่

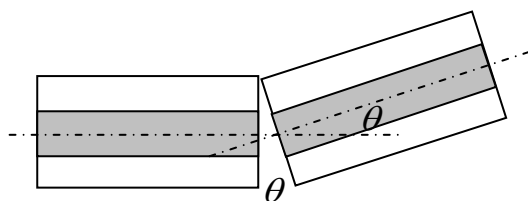
S เป็นระยะห่างของหน้าสัมผัสทั้งสองของเส้นใยแก้วนำแสงตรงจุดเชื่อมต่อ

a เป็นค่ารัศมีของแกน และ

$\theta_c = \cos^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ เมื่อ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของแกนและเคลดดังตาม

ลำดับ

3. การเกิดมุมเอียงในแนวแกนกลางของเส้นใยแก้ว (Angular Misalignment หรือ Tilt) เป็นลักษณะการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วสองเส้นที่มีได้ถูกจัดให้อยู่ในแนวเส้นตรง แต่เกิดเป็นมุมเอียงกับแนวแกนกลางของเส้นใยแก้ว ดังแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15

การเกิดมุมเอียงในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วสองเส้น

ที่มา : เส้นใยแก้วและการประยุกต์ใช้งานเบื้องต้น (อริคม ฤกษ์บุตร, 2002)

ค่าการสูญเสียสัญญาณที่เกิดขึ้น (Loss) ในกรณีของออฟเซตนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Loss = \log\left(1 - \frac{\theta}{2\theta_c}\right) \quad dB \quad (2.5)$$

โดยที่

θ เป็นมุมเอียงที่เกิดจากการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วและ

$\theta_c = \cos^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$ เมื่อ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของแกนและเคลดดังตาม

ลำดับ

2.3.4 การเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง

การส่งสัญญาณแสงไปในสายใยแก้วนำแสงจะต้องทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณให้เป็นสัญญาณแสงก่อนจึงจะสามารถส่งสัญญาณผ่านไปในสายใยแก้วนำแสงได้ระบบ สื่อสารใยแก้วนำแสงโดยทั่วไป จะต้องมีการเชื่อมต่อในส่วนของใยแก้วนำแสงเสมอโดยการเชื่อมต่อ สายใยแก้วนำแสงนี้ อาจมีการคลาดเคลื่อน ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียสัญญาณได้จากลักษณะต่างๆ ของใยแก้ว เช่น จากการที่ตำแหน่งของแกนวางไม่ตรงกันหรือการมีระยะห่างระหว่างแกนเป็นต้น จึงได้มีการคิดค้นวิธีการต่างๆ ที่นำมาใช้เชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเพื่อให้มีการสูญเสียที่น้อยที่สุดสไปลซ์ (Splice) เป็นเทคนิคการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วแบบถาวรแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การสไปลซ์เชิงกล (Mechanical Splice) และการสไปลซ์แบบหลอมรวมหรือฟิวชั่นสไปลซ์ (Fusion Splice) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.4.1 การเชื่อมต่อเชิงกล

การเชื่อมต่อเชิงกลก็คือ การวางเส้นใยแก้วนำแสงให้อยู่ในแนวแกนเดียวกัน โดยใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมและพยายามทำให้ปลายทั้งสองของเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ชิดกันมากที่สุด ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ในการเชื่อมต่อนี้ จะช่วยลดสูญเสียแสงเนื่องจากการติดตั้งจากการเบี่ยงเบนในแนวต่างๆ ลง ตัวอย่างเช่น การที่จะส่งผ่านสัญญาณแสงจากเส้นใยแก้วเส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่งให้มีการสูญเสียน้อยที่สุด ตรงรอยต่อระหว่างเส้นใยแก้วทั้งสองอาจมีการใช้เจลเชื่อมต่อด้วย (Index Matching Gel) เป็นของเหลวใสที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง การเชื่อมต่อนี้ อาจทำให้เกิดการสูญเสียอยู่ในช่วง 0.1- 0.5 เดซิเบล หัวเชื่อมต่อ (Connectors) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงเข้าด้วยกันทำให้ผู้ใช้มีความสะดวกสามารถถอดเปลี่ยนได้ตามความจำเป็น ในปัจจุบันมีการผลิตหัวเชื่อมต่อสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงออกมาหลายแบบ ซึ่งการเลือกใช้แบบใดก็ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานเป็นหลักโดยทั่วไปแล้ว หัวเชื่อมต่อได้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยให้ปลายเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ใกล้กันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ นอกจากนี้หัวเชื่อมต่อยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆ อีก เช่น แข็งแรงทนทาน เมื่อใช้งานทำให้เกิดการสูญเสียของแสงต่ำและมีราคาถูก

2.3.4.2 การเชื่อมต่อด้วยวิธีหลอมรวม

การเชื่อมต่อด้วยวิธีหลอมรวมเป็นการเชื่อมต่อปลายเส้นใยแก้วสองเส้นโดยการหลอมด้วยความร้อนให้วัสดุที่ใช้ทำเส้นใยแก้วกลายเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากเส้นใยแก้วมาตรฐาน

ที่ใช้ในระบบสื่อสารโทรคมนาคมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเท่ากับ 125 ไมครอน การหล่อหลอมเส้นใยแก้วเพื่อให้ส่วนของแกนและเคลดติ่งกลายเป็นเนื้อเดียวกันโดยยังคงสภาพส่วนของแกนและเคลดติ่งแยกออกจากกันเหมือนเดิม ต้องกระทำด้วยความร้อนที่เหมาะสม นั้นหมายถึง ขนาดของอุณหภูมิและเวลาที่ป้อนความร้อนต้องมีความแน่นอน มิฉะนั้นส่วนของแกนและเคลดติ่งอาจหลอมละลายกลายเป็นเนื้อแก้วเดียวได้ เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการเช่นนี้ เรียกว่า เครื่องสไปลเซอร์ หรือ สไปลเซอร์ (Splicer) การเชื่อมต่อด้วยวิธีการหลอมรวมเป็นวิธีการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงสองเส้นด้วยการใช้ความร้อนที่ปลายเส้นใยแก้ว จากนั้นปลายเส้นใยแก้วก็จะถูกดันมาเชื่อมต่อกัน การเชื่อมต่อในลักษณะนี้เป็นการเชื่อมต่อแบบถาวร เส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกันแล้วดูเหมือนว่าเป็นเส้นเดียวกับการสูญเสียที่เกิดจากการเชื่อมต่อด้วยวิธีนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.01- 0.2 dB ในขั้นตอนของการเชื่อมต่อนั้น ความร้อนที่ทำให้ปลายเส้นใยแก้วนำแสงอ่อนตัวนั้นมาจากประกายไฟที่เกิดจากการอาร์ก (Arc) ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในการหลอมรวม สำหรับการเชื่อมต่อแบบหลอมรวมแบบเดิมนั้น การปรับตำแหน่งการ วางตัวของเส้นใยแก้วนำแสง 2 เส้น อาศัยวิธีการปรับฐานรองด้วยการสังเกตผ่านกล้องขยาย แต่ในปัจจุบันมีการใช้วิธีการทางแสงมาช่วยในการจัดวางดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่าง อัตโนมัติ วิธีการนี้มีชื่อว่า แอลไอดี (Light Injection and Detection, LID) โดยอาศัยหลักการตรวจวัดปริมาณแสงที่ได้จากเส้นใยแก้วนำแสงเส้นที่สองซึ่งส่งผ่านมาจากเส้นใยแก้วเส้นที่ 1 ถ้าพบว่าการวาง ตัวของเส้นใยแก้วทั้งสองอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมปริมาณแสงที่ตรวจวัดได้จะให้อาณาเขตที่มากที่สุดพร้อมที่จะทำการหลอมรวม แสงที่ใช้ในการตรวจสอบมาจากการส่งผ่านแสงของแอลไอดีเข้าไปในบริเวณที่เส้นใยแก้วถูกทำให้โค้ง โดยท่อทรงกระบอกซึ่งมีรัศมีเล็ก (ประมาณ 2-3 มิลลิเมตร) และการตรวจวัดแสงก็อาศัยอุปกรณ์รับแสงซึ่งวางชิดกับบริเวณที่ถูกทำให้โค้งของเส้นใยแก้วนำแสง วิธีการตรวจวัดแสงดังกล่าวอาศัยคุณสมบัติของใยแก้วนำแสงเกี่ยวกับการโค้งงอของเส้นใยแก้วที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น

ขั้นตอนแรกก่อนที่จะเริ่มการเชื่อมต่อนั้น จะมีการทำความสะอาดตรวจสอบปรกของหน้าตัดแกนของเส้นใยแก้วนำแสงอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า (Arc Current) สำหรับเครื่องมือในการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วบางชนิด กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกันกับกระบวนการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสง ขั้นตอนต่อไป เรียกว่า การให้ความร้อนก่อนการหลอมรวมหรือพรีฟิวชั่น (Pre-Fusion) ซึ่งในระหว่างกระบวนการนี้ หน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกให้ความร้อนเพื่อให้เส้นใยแก้วเกิดการอ่อนตัวและง่ายต่อการเชื่อมต่อ อุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนก่อนการหลอมรวมที่มากเกินไปจะเป็นสาเหตุให้หน้าตัดของเส้นใยแก้วเกิดการเสียรูปที่มากจนเกินไปซึ่งอาจทำให้คุณสมบัติเฉพาะตัวของแก้วนั้นเปลี่ยนแปลงไป ผลที่ตามมานั้นก็คือทำให้คุณภาพที่ได้

จากการเชื่อมต่อในทางกลับกัน อุณหภูมิในการให้ความร้อนก่อนการหลอมรวมที่ต่ำเกินไปก็อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลของหน้าตัดเส้นใยแก้วนั้นมีการเปลี่ยนรูปซึ่งจะทำให้เกิดการโค้งงอของหน้าตัดของเส้นใยแก้วในระหว่างกระบวนการเชื่อมต่อในขั้นตอนต่อไป อุณหภูมิของเส้นใยแก้วนำแสงที่เหมาะสมนั้นมีผลกระทบต่อทั้งสองกระบวนการ นั่นคือกระบวนการให้ความร้อนก่อนการหลอมรวมและตัวแปรที่ทำให้เกิดประกายไฟฟ้าในกระบวนการฟิวชั่นขั้นตอนสุดท้าย (กระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการทำให้เกิดประกายไฟฟ้า) รวมถึงช่วงเวลาที่หน้าตัดของเส้นใยแก้วทั้งสองเคลื่อนตัวมาสัมผัสกัน สำหรับวิธีการของการให้ความร้อนก่อนการหลอมรวมนั้นขึ้นอยู่กับเครื่องมือแต่ละชนิดซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ นั่นคือ การที่ความร้อนค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อย และการให้ความร้อนอย่างทันทีทันใด วิธีการให้ความร้อนก่อนการหลอมรวมนั้นทำให้เกิดการกระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัดของเส้นใยแก้วนำแสง

การตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการให้ความร้อนก่อนการหลอมรวม ซึ่งได้แก่ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอาร์ก หรือการทำให้เกิดประกายไฟ ช่วงเวลาที่ทำให้เกิดประกายไฟ ระยะห่างระหว่างเส้นใยแก้วทั้งสองเส้นในการจัดวาง ทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องสไปดเซอร์ ชนิดของเส้นใยแก้วนำแสงและลักษณะของกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในสายการผลิต ทั้งนี้สภาวะแวดล้อมขณะทำการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วนำแสงในสายการผลิตก็มีผลกระทบด้วยเช่นกัน ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และความกดดันอากาศ ลักษณะของการเชื่อมต่อเส้นใยแก้วที่ทำให้เกิดการสูญเสียมากตรงบริเวณรอยเชื่อมต่อ

2.4 สถิติในเปรียบเทียบการทดลอง

2.4.1 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing)

สมมติฐานทางสถิติ คือ การกำหนดพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของมัธยฐานสองมัธยฐานขึ้นไป เพื่อทดสอบความแตกต่างหรือเท่ากันของมัธยฐาน ตัวอย่างเช่น ในการทดสอบมัธยฐานที่หนึ่งว่ามีค่าเท่ากับมัธยฐานที่สองหรือไม่ จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

โดยที่ μ_1 เป็นมัธยฐานของสิ่งตัวอย่างกลุ่มที่หนึ่ง และ μ_2 เป็นมัธยฐานของสิ่งตัวอย่างกลุ่มที่สอง ประโยคที่ว่า $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ เรียกว่า “สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis)” และ

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ เรียกว่า “สมมติฐานรอง (Alternative Hypothesis)” การทดสอบในที่นี้เป็น การทดสอบแบบ 2 ด้าน เนื่องจาก $\mu_1 < \mu_2$ หรือ $\mu_1 > \mu_2$ ก็ได้

ในการทดสอบสมมติฐานอาศัยวิธีการในการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสม และทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ H_0 นอกจากนี้ยังต้องมีการกำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปสู่การปฏิเสธ H_0 ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า “พื้นที่วิกฤต” หรือ “พื้นที่ของการปฏิเสธ” ของการทดสอบ

ในการทดสอบสมมติฐานอาศัยวิธีการในการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสม และทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ H_0 นอกจากนี้ยังต้องมีการกำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปสู่การปฏิเสธ H_0 ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า “พื้นที่วิกฤต” หรือ “พื้นที่ของการปฏิเสธ” ของการทดสอบ

ความผิดพลาด 2 ประเภทสามารถเกิดขึ้นได้ขณะทดสอบสมมติฐาน ถ้าหากค่า H_0 ถูกปฏิเสธทั้ง ๆ ที่ H_0 ถูกต้อง จะเกิดความผิดพลาดประเภท 1 (Type I Error) ขึ้น แต่ถ้าหาก H_0 ไม่ถูกปฏิเสธ ทั้ง ๆ ที่ H_0 นั้นไม่ถูกต้อง ความผิดพลาดประเภท 2 (Type II Error) ก็เกิดขึ้น ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทก่อให้เกิดสัญลักษณ์พิเศษ

$$\alpha = P(\text{type I error}) = P(\text{Reject } H_0 / H_0 \text{ is true})$$

$$\beta = P(\text{type II error}) = P(\text{Fail to reject } H_0 / H_0 \text{ is false})$$

บางครั้งเป็นการสะดวกกว่าที่จะใช้อำนาจของการทดสอบ (Power) ของการทดสอบเป็นตัวบอก กล่าวคือ

$$\text{Power} = 1 - \beta = P(\text{Reject } H_0 / H_0 \text{ is false})$$

ขั้นตอนทั่วไปในการทดสอบสมมติฐาน คือ การกำหนดค่าของความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภท 1 หรือ α ซึ่งเรียกว่า ระดับนัยสำคัญของการทดสอบ แล้วหลังจากนั้นก็ออกแบบวิธีการทดสอบให้มีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภท 2 หรือ β ให้มีค่าน้อยตามที่เห็นว่าเหมาะสม

2.4.2 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด ตัวอย่างเช่น เราสามารถบอกได้ว่า $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ ถูกปฏิเสธที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คำกล่าวสรุปมักจะไม่เพียงพอ เพราะไม่ได้บอก

ให้ผู้ตัดสินใจรู้ว่าค่าทดสอบทางสถิติที่คำนวณได้ตกอยู่ที่ใดบนพื้นที่วิกฤต ยิ่งกว่านั้นการหาผลลัพธ์โดยวิธีนี้อาจจะไม่เป็นที่พึงพอใจ เนื่องจากผู้ทำการทดลองบางคนอาจไม่ต้องการใช้ระดับความเสี่ยงที่ $\alpha = 0.05$

วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากดังกล่าว P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติ จะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกต ในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่น ๆ ได้นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้

ปกติแล้วนิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้วผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณมือนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

2.4.3 ช่วงความเชื่อมั่น

ถึงแม้ว่าการทดสอบสมมติฐานจะเป็นวิธีที่ดี แต่บางครั้งไม่ได้บอกถึงรายละเอียดทั้งหมด ดังนั้น จึงเป็นการดีกว่าที่จะมีการกำหนดช่วงของค่าของพารามิเตอร์ ช่วงที่พูดถึงก็คือ “ช่วงความเชื่อมั่น” ในทางวิศวกรรมมีหลายครั้งที่ผู้ทดลองทราบแล้วว่า μ_1 และ μ_2 แตกต่างกัน ดังนั้นการทดสอบสมมติฐาน $\mu_1 - \mu_2$ จึงน่าสนใจเพียงเล็กน้อย แต่ผู้ทดสอบจะให้ความสนใจกับช่วงของความเชื่อมั่นของความต่างระหว่าง $\mu_1 - \mu_2$ มากกว่า

ในการนิยามหรือกำหนดช่วงความเชื่อมั่น กำหนดให้ θ เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า และเพื่อที่จะหาค่า θ นี้จำเป็นต้องหาค่าสถิติ L และ U ที่จะทำให้สมการข้างล่างเป็นจริง

$$P(L \leq \theta \leq U) = 1 - \alpha \text{ และช่วง } L \leq \theta \leq U$$

เรียกว่า “ช่วงความเชื่อมั่น $100(1 - \alpha) \%$ ” สำหรับพารามิเตอร์ θ ความหมายของช่วงนี้คือ ในการสุ่มตัวอย่างซ้ำ ๆ กัน แล้วนำมาสร้างช่วงความเชื่อมั่นลักษณะนี้ขึ้นมาเป็นจำนวนมาก จะพบว่า $100(1 - \alpha) \%$ ของช่วงความเชื่อมั่นนี้จะมีค่าที่แท้จริงของ θ อยู่ ค่าสถิติ L และ U เรียกว่า “ค่าล่างและค่าบนของขีดจำกัดความเชื่อมั่น” ตามลำดับ และ $1 - \alpha$ เรียก “สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น” ถ้า $\alpha = 0.05$ เราจะเรียกว่าเป็น ช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับ θ

ในการหาช่วงความเชื่อมั่น $100(1 - \alpha)\%$ ของค่าความแตกต่างที่แท้จริงของ $\mu_1 - \mu_2$ ค่าของช่วงความเชื่อมั่นสามารถหาได้จากสถิติ แบ่งเป็น กรณี $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ และ กรณี $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ทราบค่า

ถ้าหากประชากรทั้งคู่เป็นแบบปกติ หรือมีขนาดใหญ่พอ ดังนั้น Central Limit Theorem สามารถนำมาใช้ได้ การแจกแจงของ Z_0 คือ $N(0, 1)$ ถ้าสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น พื้นที่วิกฤตควรจะหาโดยการแจกแจงปกติมากกว่าการแจกแจง t และจะปฏิเสธ H_0 ถ้า $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ โดย $Z_{\alpha/2}$ คือค่าบนของ $\alpha/2\%$ ของการแจกแจงปกติมาตรฐาน

2.5 การออกแบบการทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD)

2.5.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

เป็นการศึกษาปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว ซึ่งจำนวนระดับที่สนใจศึกษาของปัจจัยนี้เท่ากับ a ระดับ เพื่อดูว่าระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนั้น จะมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่อย่างไร ซึ่งมีลักษณะข้อมูลเป็นดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2

แผนการเก็บข้อมูลแบบสุ่มสมบูรณ์

ลำดับที่	วิธีปฏิบัติ						
	1	2	3	4	...i...	a	
1	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	Y_{41}	$\dots Y_{i1} \dots$	Y_{a1}	
2	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	Y_{42}	$\dots Y_{i2} \dots$	Y_{a2}	
3	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	Y_{43}	$\dots Y_{i3} \dots$	Y_{a3}	
.							
.							
j	Y_{1j}	Y_{2j}				Y_{aj}	
.							
.							
n	Y_{1n}	Y_{2n}	Y_{3n}	Y_{4n}	Y_{in}	Y_{an}	
ผลรวม(T_i)	$T_{1.}$	$T_{2.}$	$T_{3.}$	$T_{4.}$	$T_{i.}$	$T_{a.}$	$T_{..}$
(ผลรวม) $^2(T_i^2)$	$T_{1.}^2$	$T_{2.}^2$	$T_{3.}^2$	$T_{4.}^2$	$T_{i.}^2$	$T_{a.}^2$	$\sum T_{i.}^2$

$$\begin{aligned}
\text{โดย } T_i &= \text{ผลรวมของข้อมูลจากวิธีปฏิบัติที่ } i; i = 1, 2, \dots, a \\
&= \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}; n_i = \text{จำนวนข้อมูลในวิธีปฏิบัติที่ } i \\
T_{..} &= \text{ผลรวมข้อมูลทั้งหมด} = \sum \sum Y_{ij} \\
N &= \text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด} = \sum_{i=1}^a n_i
\end{aligned}$$

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ CRD นี้จะทำการวิเคราะห์ส่วนของความแปรปรวนได้จากสมการต้นแบบ ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned}
\text{จาก } Y_{ij} &= \mu + T_i + \varepsilon_{ij} \\
\text{โดย } Y_{ij} &= \text{ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม} \\
\mu &= \text{ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่} \\
T_i &= \text{ที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A หรือวิธีปฏิบัติ} \\
\varepsilon_{ij} &= \text{ค่าที่เกิดจากอิทธิพลค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่ยธิบายไม่ได้}
\end{aligned}$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนคือเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความแปรผัน (Variance) ที่เกิดในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน ความแปรผันที่เกิดขึ้นในข้อมูล เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ความแปรผันทั้งหมด} = \text{ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย} + \text{ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล}$$

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้นไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่ยธิบายไม่ได้ของข้อมูล แต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะได้มีแค่ค่าเดียวแต่จะมีหลายๆ ค่าซึ่งเรียกว่าระดับของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลองกำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับ

ความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง จึงมักจะต้องการทวนซ้ำให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัยถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบคงที่ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่มรูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

จาก

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล
หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SST = SSA + SSE$$

โดย

SST = ผลบวกกำลังสองทั้งหมดที่ปรับแล้ว

SSA = ผลบวกกำลังสองของปัจจัย A หรือวิธีปฏิบัติ

SSE = ผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่อธิบายไม่ได้

การวัดความแปรผันจากข้อมูลในการทดลองนั้น จะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรผัน (Variance) ที่ดีที่สุดคือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS - Mean Square) โดยที่ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองสามารถคำนวณได้จาก

$$MS = SS / DF$$

โดย

SS = ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

DF = ชั้นของความอิสระ (Degree of freedom)

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบกับค่าความแปรผันคือ

$$F = MSA / MSE$$

โดย

MSA = ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย A หรือวิธีปฏิบัติ

MSE = ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่อธิบายไม่ได้

การเปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า F_{α, V_1, V_2}

ถ้า $F \geq F_{\alpha, V_1, V_2}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, V_1, V_2}$ ยอมรับ H_0

เมื่อ α คือ ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

V_1 = ชั้นของความอิสระปัจจัย A หรือวิธีปฏิบัติ

V_2 = ชั้นของความอิสระของค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่อธิบายไม่ได้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีการสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) หรือการจำแนกทางเดียว (One Way ANOVA) สามารถเขียนตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองและค่าคาดคะเนของค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง E (MS) ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีจำแนกทางเดียว

แหล่งที่มา (Source)	องศาเสรี (D.F.)	ผลบวกกำลังสอง (Sum Square)	ค่าเฉลี่ย SS (Mean Square)	ค่าสถิติ (F)
วิธีปฏิบัติงาน	a-1	SSA	MSA=SSA/(a-1)	F=MSA/MSE
ความผิดพลาด	N-a	SSE=SST-SSA	MSE=SSE/(N-a)	
ทั้งหมดที่ปรับแล้ว	N-1	SST		

2.5.2 ข้อสมมติของความเหมาะสมของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในการพิจารณาระดับต่างๆ ของตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล หรือผลตอบสนองที่ได้รับจากการทดลองด้วยตัวแบบสถิติเชิงเส้น (Linear Statistical Model) เพื่อการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อต้องการนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้งานจริงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบของข้อมูลที่สมมติขึ้นว่า มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยข้อสมมติสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวว่า หากค่าความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนในการทดลองมีการกระจายแบบปกติ และมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าความแปรปรวนคงที่แต่ไม่ทราบค่า ($\varepsilon_{ij} \approx NID(0, \sigma^2)$) มี

ความถูกต้องตรงตามข้อสมมติ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถนำไปใช้ได้ โดยมีวิธีการตรวจสอบ ดังนี้

1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

ในการตรวจสอบข้อสมมติทางด้านการกระจายแบบปกติของข้อมูล ที่ได้รับจากการทดลองสามารถทำได้โดยใช้การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าความผิดพลาด (Residuals) ถ้าข้อสมมติมีความถูกต้อง การนำเสนอข้อมูลด้วยกราฟดังกล่าวควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง

2. การตรวจสอบการแจกแจงที่เป็นอิสระต่อกัน

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกัน เป็นการพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาด (Residuals) กับ ลำดับที่ของการทดลองจากการทดลองสุ่ม ค่าความผิดพลาดจึงมีทั้งค่าลบและค่าบวก หากเงื่อนไขของข้อสมมติของความเป็นอิสระต่อกันเป็นจริง ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายเมื่อลำดับที่ของการทดลองเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากเกิดลักษณะของ แนวโน้มในทิศทางเดียวไม่ว่าจะเป็นเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อลำดับที่ของการทดลองเพิ่มขึ้น ย่อมแสดงว่าข้อสมมติดังกล่าวเกิดความผิดพลาดขึ้น การออกแบบที่ใช้ในการทดลองอย่างสุ่มที่เหมาะสมจะมีส่วนสำคัญในการทำให้ข้อมูลที่ได้รับมีลักษณะตรงตามข้อสมมติ

3. การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่

การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ เป็นการพล็อตระหว่างค่าความผิดพลาด (Residuals) กับค่าประมาณการทดลองที่ระดับ i ใดๆ ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายเมื่อพิจารณาที่ค่าประมาณการทดลองที่ระดับต่างๆ อย่างไรก็ตามหากเกิดแนวโน้มของรูปทรงเช่น ลักษณะลำโพง ย่อมแสดงว่าข้อสมมติดังกล่าวเกิดความผิดปกติขึ้น

2.6 วรรณกรรมปริทัศน์

2.6.1 Armour: 2506 ได้ศึกษาถึงวิธีการอิมพูนเมนต์อัลกอริทึม (Improvement Algorithms) โดยจะให้การสลับสถานะผลิตเป็นคู่ๆ (Computerized Relative Allocation of Facilities Technique : CRAFT) เพื่อให้เกิดผังโรงงานที่เหมาะสมที่สุดจากผังโรงงานที่สุ่ม (Random) ขึ้นครั้งแรกซึ่งจะเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดที่สามารถนำไปใช้งานได้แต่คำตอบที่ได้ก็ยังไม่ถูกต้องมากนักเนื่องจากวิธีการนี้ไม่ได้นำปัจจัยทางด้านพื้นที่เข้ามาเกี่ยวข้องดังนั้นอาจจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการนำผังโรงงานที่ได้ไปสร้างจริงๆ ถ้าสถานะผลิตต่างๆ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในการจัดวางได้

2.6.2 Heragu, et al.: 2533 ได้ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการจัดวางเครื่องจักรในโรงงาน (Knowledge Based System for Machine Layout: KBML) และได้ใช้ EXSYS จะได้แบบของการวางเครื่องจักรที่ส่งผลให้ได้เกิดประโยชน์สูงสุดทั้งในแง่ของการลงทุนและการผลิต

2.6.3 Abdou : 2533 ได้ศึกษาถึงวิธีการออกแบบผังโรงงานที่เหมาะสมมากขึ้น (Expert Layout System : EXSYS) โดยวิธีการนี้จะพิจารณาถึงปริมาณการผลิตกับผลผลิตหลายๆ ชนิดความถี่ของการเปลี่ยนแปลงสายการผลิต (Frequency of Flexibility) ระบบการขนส่งในสายการผลิตสิ่งแวดล้อมของโรงงาน

2.6.4 นายณัฐพงษ์ สุวรรณรงค์ 2544 : ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบเกมการผลิตแบบลีนด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์ โดยมีแนวคิดในการปรับปรุงการทำงานเพื่อให้สามารถแข่งขันคู่แข่งได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจากการผลิตแบบเดิม (Mass Production) ไปสู่การผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพการผลิตพื้นฐานความแตกต่างของแนวคิดในการผลิตเพื่อเพิ่มความต้องการของลูกค้า ความสัมพันธ์ของพนักงานและกำจัดความสูญเปล่า (Waste : Muda) ซึ่งในการอธิบายให้เข้าใจระบบการผลิตจึงจำเป็นกับพนักงานดังนั้นวัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้ จะเปรียบเทียบการออกแบบการผลิตแบบจำนวนมากและการผลิตแบบลีน โดยการปรับเปลี่ยนระบบการผลิตที่ใช้การรวมเครื่องจักรและสร้างการไหลขึ้นเดียว (One Piece Flow) ที่เป็นกลุ่มชิ้นส่วนที่คล้ายกันที่ทำให้เกิดประสิทธิผลเนื่องด้วยองค์ประกอบของการผลิตแบบลีนที่มีความซับซ้อนของระบบ (Complex System) การเลือกวิธีการสื่อความเข้าใจจะต้องสามารถที่จะตอบสนองต่อจุดมุ่งหมาย เกมเป็นวิธีการอธิบายที่ได้รับการยอมรับ และการที่จะทำให้เกมนั้นมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีการออกแบบที่ดี ดังนั้นเครื่องมือที่จะใช้คือโปรแกรมการจำลองสถานการณ์ พร้อมกับแบบจำลองการประกอบชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ ซึ่ง

ได้ทำการออกแบบเกมกระบวนการผลิตแบบลีนเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบเดิมโดยการทดสอบการออกแบบด้วยส่วนตัวต่อ เพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของกระบวนการผลิตในแต่ละกระบวนการให้เป็นรูปธรรมยิ่งขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า ระบบการผลิตแบบลีนมีข้อแตกต่างกับการผลิตแบบเดิมในเรื่องของการลดรอบเวลา (Cycle Time) การหมุนเวียนของสินค้าคงเหลือ (Turn Over) สินค้าคงเหลือระหว่างกระบวนการผลิต (Work In Process, WIP) การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของทรัพยากร (Utilization) และจากผลการวิเคราะห์แบบสอบถามของผู้ศึกษามีความเข้าใจในความแตกต่างระหว่างระบบการผลิตทั้งสองแบบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

2.6.5 นายอรรคพรณ วนะชกิจ 2545 : ได้ทำการวิจัยโดยการนำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองอ้างอิงกระบวนการการผลิตแบบลีน (A Process Reference Module for Lean Manufacturing) เพื่อเป็นแนวทางการนำแนวคิดแบบลีนไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตในส่วนของการผลิตตามสั่ง โดยทำการพัฒนาแบบจำลองอ้างอิงกระบวนการที่มีลักษณะเชิงลำดับขั้นตามกระบวนการหลักแนวคิดของลีน แสดงถึงกิจกรรมภายในกระบวนการ ระบุปัจจัยนำเข้า ผลลัพธ์ที่ได้ รวมทั้งกำหนดตัวชี้วัดสมรรถนะของกระบวนการ (Key Performance Indicators) โดยมีพื้นฐานมาจาก Supply Chain Operations Reference (SCOR) model ซึ่งเป็นเครื่องมือในการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการจัดการโซ่อุปทาน เพื่อตอบสนองแนะขั้นตอนการออกแบบ ควบคุม เปรียบเทียบและปรับปรุงระบบผลิต โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับโรงงานกรณีศึกษาตัวอย่างโปรแกรมจำลองกระบวนการธุรกิจ (QPR Process Guide) และตรวจสอบความถูกต้องรวมถึงความเป็นได้ของแบบจำลองกระบวนการธุรกิจ ผู้เชี่ยวชาญการผลิตแบบลีนจากโรงงานที่มีแนวคิดนี้ไปประยุกต์ใช้ พบว่าแบบจำลองอ้างอิงกระบวนการสำหรับการผลิตแบบลีนนี้มีประโยชน์ต่อการนำไปใช้ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตได้จริง ซึ่งจากกรณีศึกษาตัวอย่างพบว่าแบบจำลองอ้างอิงนี้สามารถช่วยในการออกแบบ ควบคุม เปรียบเทียบและปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตได้จริง โดยจะทำให้เห็นภาพรวมของกระบวนการผลิตทั้งหมด และเสนอแนะแนวทางสำหรับกระบวนการผลิตในอนาคตที่ดีได้อีกด้วย

2.6.6 นายพฤทธิพงศ์ โพธิ์ราพรณ 2548 : ศึกษาและประยุกต์ใช้การผลิตแบบลีนในอุตสาหกรรมผสม (แบบต่อเนื่อง-แบบช่วง) กรณีศึกษาโรงงานผลิตเหล็กรูปพรรณ จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ คือ ช่วยเป็นแนวทางของการประยุกต์ใช้การผลิตแบบลีนในอุตสาหกรรมที่มีทั้งการผลิตแบบต่อเนื่องและแบบช่วง หรือเรียกอีกอย่างว่าอุตสาหกรรมผสม ซึ่งการวิจัยนี้ได้เลือกอุตสาหกรรมผลิตเหล็กรูปพรรณเป็นกรณีวิจัย เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตแบบผสม ใช้เครื่องมือการผลิตแบบลีน คือ แผนภูมิสายธารคุณค่าจะช่วยจำแนกคุณค่าของกระบวนการผลิต

และแบบจำลองสถานการณ์จะใช้วิเคราะห์ทางเลือก, ประเมิน และพัฒนาแผนภูมิสายธารคุณค่า งานวิจัยนี้จะใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มแบบ 23 โดยใช้แบบจำลองสถานการณ์วิเคราะห์ปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ระบบการผลิต, การบำรุงรักษาแบบทุกคนมีส่วนร่วม และการลดเวลาปรับเปลี่ยนเครื่องจักร จากผลของการจำลองขจัดความสูญเปล่าสามารถลดระยะเวลาการผลิตรวมจาก 16.24 วัน มาเป็น 8.56 วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 47.30 และลดสินค้าคงคลังระหว่างกระบวนการจาก 96.35 ตันต่อวัน เหลือ 10.62 ตันต่อวัน หรือคิดเป็นร้อยละ 88.98 จากนั้นนำมาสร้างแผนภูมิสายธารคุณค่าสถานะอนาคต

2.6.7 นางสาวยุพา กลอนกลาง 2548 : ศึกษาแบบจำลองพลวัตของระบบ (System Dynamics Modeling) ของระบบการผลิตแบบลีนในระดับกลยุทธ์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเครื่องมือของลีน (Lean Tool) และประสิทธิภาพของระบบสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์พร้อมทั้งศึกษาลำดับการประยุกต์ใช้เครื่องมือของลีนและสัดส่วนความสำคัญของเครื่องมือแต่ละตัวที่เหมาะสมที่สุดโดยมีบริบทกรณีศึกษาคือ บริษัททางกอกอีเกิลวิง จำกัด ผลการวิจัยพบว่าในการคัดเลือกเครื่องมือของลีนมาใช้นั้นควรพิจารณาจากเป้าหมายที่ต้องการและผลประโยชน์ที่ได้รับจากการนำเครื่องมือเหล่านั้นมาใช้และลำดับในการประยุกต์ใช้นั้นควรพิจารณาจากเครื่องมือที่มีความคงที่คือ เครื่องมือที่เมื่อมีการจัดทำในครั้งแรกแล้วหลังจากนั้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอะไรมากนัก และมีจุดประสงค์เพื่อสร้างมาตรฐานในการทำงานให้แก่พนักงานและระบบแล้วจึงค่อยนำเครื่องมือที่มีความเป็นพลวัตคือ เครื่องมือที่ต้องมีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงและจัดทำใหม่ตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อลดเวลาในกระบวนการผลิตมาประยุกต์ใช้เป็นลำดับต่อไป สำหรับสัดส่วนความสำคัญของเครื่องมือของลีนแต่ละตัวนั้นจะแตกต่างกันไปตามกระบวนการผลิตคือ เครื่องมือบางตัวอาจมีความสำคัญสำหรับสายการผลิตหนึ่งแต่อาจไม่มีความสำคัญกับอีกสายการผลิตหนึ่ง

2.5.8 สุรศักดิ์ ลลิตเกียรติกุล : 2550 ได้ศึกษาถึงระบบลีนและประยุกต์ใช้หลักการแบบลีนเพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต ส่วนงานขัดเตรียมผิว ชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ ด้วยการขจัดลดความสูญเสีย สูญเปล่าต่างๆ ให้เกิดการใช้ทรัพยากรทั้งหมดที่มีให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยประโยชน์ทางอ้อมที่จะได้ คือ สามารถใช้หลักการต่างๆ ที่ดำเนินการปรับปรุงในครั้งนี้เป็นตัวอย่างแนวทางสำหรับการประยุกต์หลักการของการผลิตของลีนในส่วนงานผลิตอื่นๆ โดยขั้นตอนการดำเนินการแก้ไขปัญหา จะเริ่มจากการศึกษาหลักทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคิดค้น ประยุกต์ใช้เครื่องมือสนับสนุนการผลิตแบบลีน จากนั้นทำการศึกษาเก็บข้อมูล วิเคราะห์ ขั้นตอนการทำงานขัดผิวงานต่างๆ ในปัจจุบัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาจัดกลุ่ม

ตามลักษณะขั้นตอนการขัดผิว นำมาวิเคราะห์ จัดตั้งเครื่องจักร ให้สอดคล้องกับกลุ่มกระบวนการทั้งหมด นำข้อมูลความสูญเสีย และกระบวนการที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม มาใช้ปรับปรุงการทำงาน เครื่องมือช่วย อุปกรณ์ขนถ่าย รวมไปถึงจำนวนการไหลของชิ้นงานที่เหมาะสมกับกระบวนการใหม่ โดยสร้างดัชนีชี้วัดขึ้นมาช่วยบ่งชี้ถึงปัญหาและวัดประเมินผลของการทำงานรวม