บทที่ 2
ทฤษฎีและงานศึกษาที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ จะประกอบด้วยการปรับปรุงคุณภาพ การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ส่วนงานศึกษาที่เกี่ยวข้อง จะประกอบด้วยงานวิจัยและเอกสารทางวิชาการทั้งจากตำราและบทความ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษาครั้งนี้ จะประกอบด้วย แนวคิดเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพ การออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการโปรแกรมเชิงเส้นตรง ซึ่งจะใช้เป็นพื้นฐานและทฤษฎีอ้างอิงสำหรับการศึกษาครั้งนี้

2.1.1 การปรับปรุงคุณภาพ

แรงกดดันจากการแข่งขันในระดับโลก เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้องค์กรธุรกิจต่าง ๆ ต้องหาแนวทางที่ดีกว่าเสมอในการสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า รวมทั้งการพยายามลดต้นทุนและการเพิ่มผลิตผลให้สูงขึ้น แนวทางหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว คือการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งในปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพอย่างต่อเนื่องได้กลายเป็นสิ่งจำเป็นหรือส่วนสำคัญของการกำหนดกลยุทธ์ในการดำเนินธุรกิจขององค์กร โดยเป้าหมายการดำเนินการปรับปรุงคุณภาพจะเกิดขึ้นในทุก ๆ ขั้นตอนของการทำงาน ตั้งแต่การรับวัตถุดิบไปจนถึงการส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้า

การปรับปรุงคุณภาพ จะเริ่มจากการแจกแจงความต้องการในอนาคตของลูกค้าผ่านการวิจัยทางการตลาด โดยในการออกแบบหรือการออกแบบใหม่ ผลิตภัณฑ์หรือบริการจะถูกออกแบบให้สอดรับกับความต้องการที่ดีขึ้น รวมทั้งกระบวนการผลิตก็จะถูกออกแบบเพื่อผลิตสินค้าหรือบริการนั้น ๆ ซึ่งกิจกรรมพื้นฐานโดยสรุปของการปรับปรุงคุณภาพ จะประกอบด้วย

(1) การออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่

(2) การออกแบบใหม่สำหรับผลิตภัณฑ์เดิม

(3) การออกแบบกระบวนการผลิตใหม่ (รวมทั้งการบริการ)

(4) การออกแบบใหม่ สำหรับกระบวนการผลิตเดิม

กิจกรรมทั้งสี่ประเภท จะมีอยู่ในส่วนต่าง ๆ ขององค์กร ซึ่งจะต้องมุ่งเน้นการประสานงานและชัดเจนในวัตถุประสงค์พื้นฐาน โดยขจัดอุปสรรคระหว่างหน่วยงานที่อาจจะเกิดขึ้น บุคลากรที่อยู่ในส่วนต่าง ๆ ทั้งงานวิจัย งานออกแบบ งานขาย รวมทั้งงานผลิต จะต้องทำงานเป็นทีมผ่านกิจกรรมพื้นฐานทั้งสี่ประเภท โดยที่ฝ่ายบริหารจะต้องให้การสนับสนุนทั้งเวลาและทรัพยากรให้กับคณะทำงานเพื่อแลกเปลี่ยนประสบการณ์สำหรับการสร้างเทคโนโลยีใหม่ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการปรับปรุงกระบวนการผลิต

ตัวอย่างของคำถามที่ใช้สำหรับการกำหนดบทบาทของวิศวกร นักวิจัย หรือผู้บริหาร

- จะแปลงแนวคิดที่เหมาะสมและสอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าเป็น ผลิตภัณฑ์ได้อย่างไร
- จะเลือกคุณลักษณะที่สำคัญ 2-3 อย่าง สำหรับการออกแบบจากจำนวนมากได้อย่างไร
- จะเลือกแนวคิดที่ดีที่สุดที่ตอบสนองความต้องการลูกค้าได้อย่างไร จากแนวคิดที่เกิดขึ้นทั้งหมด
- จะออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อสามารถสอดรับกับเงื่อนไขที่เกิดขึ้นในการผลิตและการใช้งานของลูกค้าได้อย่าไร
- จะเลือกเงื่อนไขในการการทำงานที่ดีที่สุด สำหรับกระบวนการผลิต จากทางเลือกจำนวนมากได้อย่างไร

เป้าหมายของการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิต ก็เพื่อต้องการให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีความแข็งแรง (robust) ซึ่งการที่ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง (robustness) นั้นหมายถึงการที่คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์นั้นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างง่าย เนื่องมาจากปัจจัยรบกวน (noise factor) โดยในการออกแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ประกอบด้วย

1. System Design ในขั้นตอนนี้สำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์จะหมายถึงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบให้มีหน้าที่การใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ รวมทั้งการเลือกกำหนดวัตถุดิบที่จะใช้ในการผลิต ชิ้นส่วน องค์ประกอบ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง แต่ถ้าเป็นการออกแบบกระบวนการผลิต จะเป็นการพิจารณาถึงกระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด และค่าเผื่อที่เหมาะสมภายใต้ต้นทุนที่น้อยที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นหน้าที่ของผู้ควบคุมการผลิตในโรงงานหรือวิศวกรโรงงาน

2. Parameter Design เมื่อทำการออกแบบในขั้นตอน System Design แล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ที่จะทำให้ความแปรปรวนของคุณลักษณะในการใช้งานของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นน้อยที่สุด หรือเป็นการหาระดับที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตที่จะทำให้ความแปรปรวนของปัจจัยมีน้อยที่สุดเช่นกัน ซึ่งในกระบวนการผลิตตัวอย่างของความแปรปรวนของระดับการปฏิบัติงาน เช่น ความแปรปรวนของอุณหภูมิขณะทำงาน ความแปรปรวนของวัตถุดิบ ความแปรปรวนของกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งความแปรปรวนเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุให้กระบวนการผลิตมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด

3. Tolerance Design ขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบ คือการออกแบบค่าเผื่อที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย การพิจารณาช่วงที่ยอมรับได้ของปัจจัยเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากถ้าช่วงที่ยอมรับได้ยิ่งแคบ ต้นทุนของผลิตภัณฑ์ก็ยิ่งสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าขอบเขตของการยอมรับได้ยิ่งกว้างโอกาสของความผันแปรของผลิตภัณฑ์ในการนำไปใช้งานยิ่งกว้างขึ้นด้วย ดังนั้นขั้นตอน Tolerance Design จึงเป็นการพิจารณาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ที่ต้นทุนผลิตภัณฑ์ที่น้อยที่สุดภายใต้ความผันแปรของค่าเผื่อจากเกณฑ์กำหนดที่ยอมรับได้ เช่นเดียวกันในการออกแบบ Tolerance Design ในกระบวนการผลิต จะเป็นการออกแบบค่าเผื่อที่ยอมรับได้ของสภาพแวดล้อมในการทำงานโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาช่วงที่เหมาะสมที่สุดของสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ทำให้ต้นทุนผันแปรและต้นทุนผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยที่สุด

2.1.2 การออกแบบการทดลอง

ในการปรับปรุงคุณภาพโดยการออกแบบการทดลอง (experiment) สามารถดำเนินการได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ หรือเป้าหมายของการทดลอง โดยรูปแบบในการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 5 ลักษณะ ประกอบด้วย

(1) การทดลองเดี่ยว (Single experiment) จะใช้เมื่อต้องการศึกษา เพื่อให้มีความเข้าใจในการทำงานของกระบวนการให้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ รวมทั้งสาเหตุที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

(2) การทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous experiment) ใช้ในกระบวนการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะขึ้นอยู่กับความรู้ปัจจุบันเกี่ยวกับการทำงานของกระบวนการ ในกรณีที่ทราบถึงความแปรปรวนภายในกระบวนการ และพยายามที่จะลดความแปรปรวนดังกล่าว ซึ่งอาจจะเกิดจากการศึกษาความสามารถของกระบวนการที่ไม่เป็นที่ยอมรับ ค่า Cpk ที่ต่ำเกินไป หรือเกิดจากการกำหนดขอบเขตของแผนภูมิที่กว้างจนเกินไป แต่ถ้าในกรณีที่ไม่ทราบถึงขนาดความแปรปรวนที่เกิดขึ้น แต่ทราบถึงปริมาณของสิ่งที่ไม่ยอมรับ เช่น งานที่ต้องทำซ้ำใหม่มีมาก

เกินไป หรือของเสียมีจำนวนมาก และพยายามที่จะลดปริมาณดังกล่าว ซึ่งการดำเนินการ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องลดปริมาณลงอย่างมาก เพื่อให้ครอบคลุมความแปรปรวนที่เกิดขึ้นและไม่ทราบค่า

(3) การทดลองแบบแจกแจง (Screening experiment) กระบวนการนี้จะพบในกระบวนการติดตั้ง หรือพบในขั้นตอนระหว่างการออกแบบ สร้างขึ้นใหม่ ซึ่งมีความรู้ปัจจุบันในกระบวนการน้อยมาก เมื่อเทียบกับความใหญ่หรือความซับซ้อนของกระบวนการ โดยในกระบวนการที่มีความซับซ้อนนี้จะประกอบไปด้วยตัวแปรที่มีความสำคัญจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องแจกแจงรายการของปัจจัยของกระบวนการให้สามารถดำเนินการควบคุมได้ นอกจากนั้นยังเพื่อหาค่ากำหนดที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุด

(4) การทดลองแบบมุ่งเน้น (Focusing experiment) วัตถุประสงค์ของการทดลองแบบนี้ จะใช้เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ รวมทั้งการพิจารณาความผิดปกติที่เกิดขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงกระบวนการหรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์

(5) การทดลองแบบลำดับขั้น (Sequential experiment) การทดลองรูปแบบนี้ จะใช้ในกระบวนการที่ประกอบด้วยหลาย ๆ ขั้นตอน โดยในแต่ละขั้นตอนจะประกอบด้วยปัจจัยจำนวนมาก ในการศึกษาจะทำการแบ่งกระบวนการออกเป็นขั้นตอนย่อย ๆ จากนั้นจึงทำการศึกษาทีละขั้นตอนจนถึงขั้นตอนสุดท้าย

ในการทดลองบนกระบวนการผลิต หรือการทดลองบนผลิตภัณฑ์ ถือเป็นสภาพปกติโดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งขอบเขตของการทดลองจะเริ่มตั้งแต่การค้นหาอย่างไม่เป็นทางการ ไปจนถึงการศึกษาอย่างเป็นรูปแบบ มีการวางแผนอย่างดี

เครื่องมือที่สำคัญในการทดลอง ประกอบด้วย

ก. รูปแบบการทดลอง

ข. การจัดกลุ่มการวางแผน

ค. การดำเนินการสุ่ม

ง. การดำเนินการซ้ำ

(1) รูปแบบการทดลอง

รูปแบบการทดลอง จะหมายถึงลำดับของการทดลอง หรือบางครั้งเรียกว่า แผนการทดลอง (Test Plan) โดยทั่วไป จะพิจารณาร่วมกันกับเครื่องมือในการทดลองอื่น ๆ (การจัดกลุ่ม การสุ่ม และการซ้ำ)

ในการเลือกรูปแบบการทดลองที่เหมาะสม จะเป็นเครื่องมือพื้นฐาน เพื่อให้แน่ใจว่าจะบรรลุวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยรูปแบบจะเป็นการแจกแจงองค์ประกอบของปัจจัยและระดับของปัจจัยในการศึกษา การเลือกรูปแบบการทดลองที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่ดีให้กับการทดลอง ดังนี้

- ระดับความน่าเชื่อถือของการศึกษา
- รูปแบบที่เหมาะสม จะช่วยในการประมาณการผลกระทบที่สำคัญได้
- ช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้
- จะสามารถควบคุมต้นทุน หรือทรัพยากรอื่น ๆ ที่จะใช้ในการศึกษา

รูปแบบการทดลองมีอยู่หลายลักษณะ ซึ่งชื่อเรียกจะอธิบายถึงรูปแบบของการทดลองนั้น ๆ ด้วย รูปแบบการทดลองที่นิยมใช้กันทั่วไป คือการออกแบบการทดลองแบบปัจจัย (Factorial Design) ซึ่งการทดลองจะกระทำกับหลาย ๆ ตัวแปรในแต่ละการทดลอง

(2) การจัดกลุ่มการวางแผน

การจัดกลุ่มการวางแผน ถือเป็นเครื่องมือที่อิสระ ในการกำหนดตัวแปรประกอบทั่วไป (Background Variable) ที่จะศึกษา ซึ่งจะมีวิธีการอยู่ 3 ลักษณะ ประกอบด้วย

ก. กำหนดให้เป็นค่าคงที่ในขณะศึกษา
ข. ทำการวัดและปรับค่า จากผลกระทบที่เกิดจากการศึกษา
ค. ใช้การจัดกลุ่ม เพื่อทำการบล็อก (Block)

เมื่อนำการจัดกลุ่มมาประยุกต์ใช้ในการทดลอง รูปแบบการทดลองนั้นจะเรียกว่า การทดลองแบบจำกัด (Block Design) ตัวอย่างของตัวแปรประกอบทั่วไปที่ใช้ในการศึกษา เช่น เวลาในแต่ละวัน พนักงาน เครื่องจักร กะผลิต หรือฤดูกาล

การจัดกลุ่มการวางแผน จะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลที่ได้จากการทดลอง นอกจากนั้น รูปแบบการทดลองบางประเภท จะกำหนดชื่อตามการจัดกลุ่มการวางแผนโดยใช้ตัวแปรประกอบทั่วไป เช่น การทดลองแบบเปรียบเทียบเป็นคู่ (Paired - Comparison Experiment) จะเป็นการทดลอง

1 ตัวแปรที่ 2 ระดับ และมีตัวแปรประกอบทั่วไป 1 ตัวแปร การดำเนินการทดลองที่แตกต่างกันทั้ง 2 หน่วยการทดลอง จะเกิดขึ้นภายในบล๊อกหรือตัวแปรประกอบทั่วไปเหมือนกัน

(3) การดำเนินการสุ่ม

การดำเนินการสุ่ม (Randomization) จะเป็นการใช้ตัวเลขสุ่ม (Random Number) ในการกำหนดลำดับขององค์ประกอบของปัจจัยในแต่ละการทดลอง ถ้าการกำหนดรูปแบบการทดลองเป็นการเลือกตัวแปรต่าง ๆ มาเป็นปัจจัยที่จะศึกษา การจัดกลุ่มการวางแผน เป็นการใช้ตัวแปรประกอบทั่วไปมาเพิ่มในการศึกษา ส่วนการดำเนินการสุ่มจะเป็นเครื่องมือในการกำหนดปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) ปัจจัยรบกวน จะหมายถึงตัวแปรในกระบวนการที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) แต่ไม่ถูกนำมาพิจารณาในการทดลอง โดยทั่วไปเป็นเรื่องปกติ ที่จะมีตัวแปรที่ไม่ทราบแต่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองในขณะทำการทดลอง ตัวอย่างของตัวแปรรบกวน ได้แก่ ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือตำแหน่งต่าง ๆ ในห้องบ่ม

การสุ่ม จะช่วยป้องกันการแปรปรวนอันเนื่องมาจากตัวแปรรบกวน ไม่ให้มีผลประทบต่อผลกระทบต่อการทดลองอันเนื่องมาจากปัจจัยที่จะศึกษา หรือตัวแปรประกอบทั่วไป การสุ่มจะกระทำต่อหลาย ๆ ระดับที่แตกต่างกันในขณะทำการทดลอง เช่น ในการทดลองเพื่อประเมินปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตในโรงงาน กระบวนการสุ่มจะนำมาใช้ในการเลือกวัตถุดิบที่จัดเก็บในคลังสินค้า ใช้ในการเลือกลำดับขององค์ประกอบของปัจจัยในการพิจารณาและทำการสุ่มลำดับของการดำเนินการทดลอง

(4) การดำเนินการซ้ำ

การดำเนินการซ้ำ (Replication) จะมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินการทดลอง ใช้เป็นเครื่องมือเบื้องต้นสำหรับการศึกษาความมีเสถียร (Stability) ของผลกระทบที่เกิดขึ้นและช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผลลัพธ์ที่ได้ รูปแบบการดำเนินการซ้ำมีอยู่หลายรูปแบบ อาทิ

- ทำการวัดซ้ำ ๆ ในแต่ละการทดลอง
- ทำการทดลองซ้ำในแต่ละกลุ่มของปัจจัย
- ทำการซ้ำในบางส่วนของรูปแบบการทดลอง
- ทำการซ้ำทั้งหมดของรูปแบบการทดลอง

ในแต่ละรูปแบบการดำเนินการซ้ำ จะให้ความหมายในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันไปต่อผลการทดลอง การดำเนินการสุ่มจะช่วยในการดำเนินการวัดขนาดของความผันแปรในการทดลองอัน

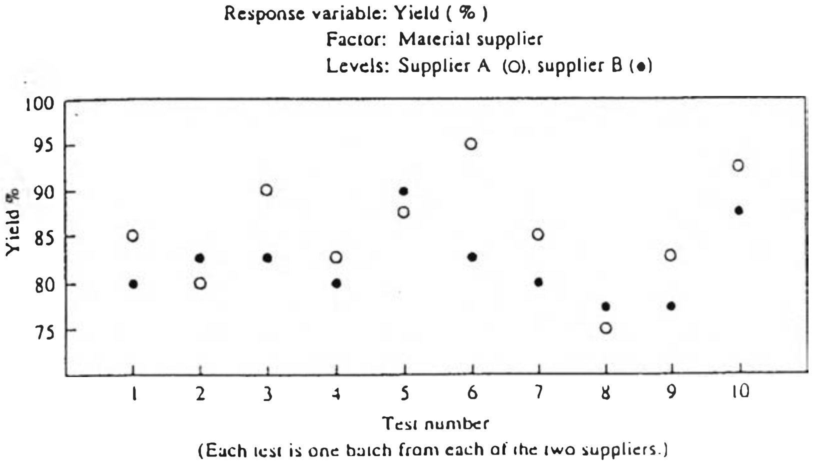
เนื่องมาจากตัวแปรรบกวน นอกจากนั้นยังช่วยในการลดผลกระทบจากตัวแปรรบกวนต่อปัจจัยที่ศึกษาได้

2.1.2.1 การออกแบบการทดลองปัจจัยเดี่ยว

Ronald D Moen และคณะ (1991) อธิบายว่าในการทดลองโดยการใช้ปัจจัยเพียงตัวเดียว โดยมีตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัวหรือมากกว่า ภายใต้ระดับของปัจจัยที่แตกต่างกัน ระดับของปัจจัยอาจเป็นในรูปเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร ก , ข และ ค หรือในรูปเชิงปริมาณ เช่น ระดับของอุณหภูมิ 60 , 70 หรือ 80 องศาเซลเซียส ในการดำเนินการทดลองจะต้องดำเนินการซ้ำ อย่างน้อย 1 ครั้งในการทดลองในแต่ละระดับ การเพิ่มจำนวนในการซ้ำจะช่วยให้การทดลองมีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพดีขึ้น ในแต่ละระดับของปัจจัยจะถูกทำการสุ่ม เพื่อนำมาจัดลำดับในการทดลอง

วิธีเบื้องต้นในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองปัจจัยเดี่ยว โดยการใช้แผนภูมิเชิงเส้น (run chart) แจกแจงในแต่ละระดับของปัจจัย จากรูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของแผนภูมิเชิงเส้นของการทดลองปัจจัยเดี่ยว โดยมีระดับของปัจจัยเท่ากับ 2 ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์จากข้อมูลจากการทดลองปัจจัยเดี่ยวนี้ ประกอบด้วย

1. ทำการเขียนแผนภูมิเชิงเส้น หรือแผนภูมิควบคุมจากข้อมูลในแต่ละระดับของปัจจัย
2. ทำการเรียงแผนภูมิเชิงเส้นใหม่ ตามลำดับของระดับของปัจจัย
3. ขจัดผลกระทบจากตัวแปรประกอบทั่วไป (Background Variables) และนำข้อมูลที่ปรับแล้วมาเขียนแผนภูมิใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 2.1 การใช้ RUN CHART ในการทดลองปัจจัยเดี่ยว

2.1.2.2 การออกแบบการทดลองปัจจัยมากกว่าหนึ่ง

ในการทดลองแบบปัจจัยเดี่ยว จะมีข้อจำกัดหลัก ๆ อยู่ 2 ประการ ประการแรกคือ ไม่มีการเกิด interaction ระหว่างปัจจัยที่กำลังศึกษา การเกิด interaction หมายถึงผลกระทบของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนอง ที่จะขึ้นอยู่กับระดับการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยอื่น ประการที่สองคือ การไม่มีประสิทธิภาพในขณะทำการศึกษาหนึ่งปัจจัย เนื่องจากเมื่อทำการศึกษาปัจจัยอื่น ข้อมูลที่เก็บมาแล้ว ก็จะต้องเก็บมาใหม่ เนื่องจากข้อมูลที่เก็บได้ จะรองรับได้เฉพาะหนึ่งปัจจัย

แนวทางในการศึกษาเพื่อขจัดข้อจำกัดทั้ง 2 ข้อ คือการออกแบบการทดลองแบบปัจจัย (Factorial Experiment) ซึ่งจะสามารถศึกษาถึงการ interaction ระหว่างปัจจัยได้ โดยในการออกแบบจะเริ่มจากการเลือกปัจจัยที่จะทำการศึกษา (อาจมากกว่าหนึ่ง) รวมทั้งระดับของแต่ละปัจจัย ในกรณีการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยทั้งหมด (Full Factorail Experiment) จะประกอบด้วยส่วนผสมของการทดลองในทุกปัจจัยและในทุกระดับ ตัวอย่างในกรณีศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย โดยปัจจัยที่หนึ่งมี 2 ระดับ ปัจจัยที่สองมี 3 ระดับ และปัจจัยที่สามมี 5 ระดับ ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับ 2x3x5 หรือเท่ากับ 30 ครั้งต่อการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง

ถ้าในการออกแบบการทดลอง กำหนดให้แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ รูปแบบของการทดลองจะกำหนดเป็น 2^k ตัวอย่างการทดลองปัจจัยที่ 2^3 จะหมายถึงรูปแบบการทดลอง 2x2x2 หรือ 8 ครั้ง

ข้อดีของการออกแบบการทดลองแบบ 2^k

ก. ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ โดยการใช้วิธีกราฟ

ข. ใช้จำนวนครั้งในการทดลองน้อย เช่น การออกแบบที่ 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จะใช้การทดลองทั้งหมด 16 ครั้ง แต่ถ้าแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ จะใช้การทดลองถึง 81 ครั้ง และถ้ามี 4 ระดับจะใช้การทดลองทั้งหมด 256 ครั้ง ในกรณีที่จำนวนปัจจัยมีมาก การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยบางส่วน (Fractional Factorial Design) ของ 2^k จะช่วยในการทดลองให้มีขนาดในการทดลองที่เหมาะสม

นอกจากนั้น ในการระบุความแตกต่างของแต่ละองค์ประกอบในการทดลอง กรณีมีปัจจัย 2 ระดับ สามารถแทนปัจจัยในระดับต่ำด้วยเครื่องหมายลบ (-) และในระดับสูงด้วยเครื่องหมายบวก (+) หรือในกรณีปัจจัยเป็นชนิดคุณภาพ เช่น ชนิดของวัสดุ การใช้เครื่องหมาย + และ - ก็สามารถใช้แทนวัสดุแต่ละชนิดที่ทำการศึกษาได้

ขั้นตอนพื้นฐานในการออกแบบการทดลองแบบปัจจัย จะประกอบด้วย

(1) กำหนดวัตถุประสงค์ในการทดลอง

(2) จัดเตรียมข้อมูลประกอบทั้งหมด
(3) เลือกจำนวนปัจจัยที่จะศึกษา
(4) เลือกระดับของแต่ละปัจจัย
(5) พิจารณาตัวแปรประกอบทั่วไปในการศึกษา
(6) เลือกจำนวนการทดลองซ้ำ
(7) ทำการสุ่มลำดับในการทดลอง

การเลือกจำนวนปัจจัยที่ศึกษา จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการศึกษา และตัวแปรตอบสนอง ในการศึกษาช่วงแรกขณะที่ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์มีน้อยมาก เป้าหมายของการทดลอง จะเป็นการคัดตัวแปรที่ไม่มีความสำคัญออก โดยจะมีตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการศึกษามีจำนวนน้อย ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะใช้การทดลองแบบปัจจัยบางส่วน (Fractional Factorial Design) ในการศึกษา

เมื่อต้องการศึกษาให้มากขึ้นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง รวมทั้งการศึกษา interaction ระหว่างปัจจัย กรณีที่ปัจจัยที่จะศึกษามีอยู่ 2 ถึง 5 ปัจจัย การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยทั้งหมด (Full Factorial Design) จะเหมาะกับปัจจัยจำนวน 2 ถึง 4 ปัจจัย ส่วนการทดลองแบบปัจจัยบางส่วน จะใช้ในกรณีปัจจัยมีจำนวน 5 ปัจจัยหรือมากกว่า

ข้อสำคัญในการพิจารณาอีกประการหนึ่งของการเลือกจำนวนปัจจัยในการศึกษา คือความยากง่ายในการปรับเปลี่ยนแต่ละปัจจัย บางปัจจัยการปรับเปลี่ยนเพียงเล็กน้อย อาจส่งผลต่อการตอบสนองอย่างมาก ในขณะที่บางปัจจัย การเปลี่ยนแปลงเป็นไปได้ยาก เช่น การเปลี่ยนแปลงเครื่องมือ ซึ่งอาจใช้เวลาเป็นชั่วโมงหรือวัน ดังนั้นการเลือกจำนวนของปัจจัย จะขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัย

ส่วนการเลือกระดับของแต่ละปัจจัย ในกรณีการทดลองแบบปัจจัยที่สองระดับ การเลือกแต่ละระดับของปัจจัย จะขึ้นอยู่กับความรู้ในกระบวนการหรือในผลิตภัณฑ์ ความกว้างของแต่ละปัจจัยต้องมากพอที่จะมีผลกระทบต่อกระบวนการ โดยการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการที่เกิดขึ้น ต้องไม่ขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของปัจจัยรบกวน (Nuisance Variables)

ในการทดลองทั่วไป ค่อนข้างยากในการกำหนดให้ปัจจัยมีค่าคงที่ เนื่องจากแต่ละปัจจัยอาจไม่สามารถกำหนดค่าให้นิ่งหรือเที่ยงตรงได้ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ทำได้คือการควบคุมความแปรปรวนปัจจัยให้มีน้อยที่สุด

ในการพิจารณาตัวแปรประกอบทั่วไปในการออกแบบ มีข้อสำคัญอยู่ 2 ประการ คือ

1. จะสามารถควบคุมตัวแปรประกอบที่เกิดขึ้น มีผลกระทบต่อปัจจัยที่ศึกษาได้อย่างไร

2. จะสามารถใช้ตัวแปรประกอบทั่วไป ในการกำหนดขอบเขตสภาพในการศึกษา เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือในการทดลองได้อย่างไร

โดยทั่วไปในการศึกษา ส่วนใหญ่จะกำหนดให้ตัวแปรประกอบทั่วไปให้มีค่าคงที่ แล้วจึงศึกษาถึงผลกระทบของแต่ละปัจจัย ซึ่งในการออกแบบครั้งต่อไป จะเป็นการกำหนดสภาพของตัวแปรประกอบทั่วไปที่แตกต่างจากการทดลองครั้งแรก โดยจะเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป

การเลือกจำนวนในการซ้ำ หรือการดำเนินการซ้ำ จะเป็นการช่วยให้ผลของปัจจัยมีสภาพเสถียรมากขึ้น และยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับการทดลอง จำนวนของการดำเนินการซ้ำ จะขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการเปลี่ยนแปลงแต่ละระดับของปัจจัยเป็นหลัก

การสุ่มลำดับของงาน จะเป็นพื้นฐานในการควบคุมผลกระทบของตัวแปรรบกวน ถ้าบล็อกถูกใช้ในการควบคุมตัวแปรประกอบทั่วไป การสุ่มจะใช้ในการทดสอบภายในบล็อก โดยจะเป็นการจัดลำดับในการทดลอง รวมทั้งการจัดลำดับในการวัดค่าด้วย ในการทดลองบางครั้ง อาจเป็นเรื่องยากในการดำเนินการสุ่ม เพราะผลจากความยากในการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัย

2.1.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

Montgomery (1997) อธิบายว่า ถ้ากำหนดให้การทดลองปัจจัยเดี่ยวมีอยู่หลายระดับ หรือหลายเงื่อนไขในการศึกษา โดยผลลัพท์จากการทดลองจะอยู่ในรูปของตัวแปรสุ่ม จากตารางลำดับการทดลองที่ j จะดำเนินภายใต้กระบวนการ I โดยมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ n สามาถใช้วิธีเชิงเส้นตรงทางสถิติในการอธิบายถึงผลลัพท์ของการทดลองได้ดังนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \tag{2.1}$$

โดยที่ $I = 1, 2, \ldots, a$

$j = 1, 2, \ldots, n$

โดยที่ y_{ij} จะหมายถึงผลลัพท์ของการทดลองที่ I และ j ส่วน μ หมายถึงค่าเฉลี่ยของผลลัพท์ของทุกกระบวนการ หรือเรียกว่าค่าเฉลี่ยรวม τ_i หมายถึงค่าเฉพาะที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการ i หรือผลกระทบจากกระบวนการ i และค่า e_{ij} หมายถึงค่าผิดพลาดสุ่ม (random error) โดยเป้าหมายเพื่อต้องการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของกระบวนการและประมาณค่าที่เกิดขึ้น โดยค่าความแปรปรวน (σ^2) จะถูกกำหนดให้คงที่ในทุกระดับของปัจจัย รูปแบบนี้จะเรียกว่า

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว หรือการวิเคราะห์ความแปรปรวนปัจจัยเดี่ยว เนื่องจากมีเพียงปัจจัยเดียวที่นำมาวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับรูปแบบที่มีอิทธิพลคงที่ (Fixed Effect Model) ค่าผลกระทบเนื่องจากกระบวนการ (τ_i) จะหมายถึงค่าที่เบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยทั้งหมด โดยที่

$$\sum_{I=1}^{a} \tau_I = 0 \qquad (2.2)$$

ถ้ากำหนดให้ y_i หมายถึงผลที่ได้จากการทดลองเก็บข้อมูล ภายใต้กระบวนการ i ดังนั้น $\bar{y}_i$ จะหมายถึงค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองที่กระบวนการ I และถ้ากำหนดให้ $y_{..}$ หมายถึงผลรวมของค่าที่จากการทดลองทั้งหมด และ $\bar{y}_{..}$ แสดงถึงค่าเฉลี่ยจากผลรวมทั้งหมดของค่าที่ได้จากการทดลองแล้ว

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^{n} y_{ij} \qquad \bar{y}_{i.} = y_{i.} / n \quad ; I = 1, 2, \ldots, a \qquad (2.3)$$

$$y_{..} = \sum_{I=1}^{a} \sum_{j=1}^{n} y_{ij} \qquad \bar{y}_{..} = y_{..} / n \qquad (2.4)$$

โดยที่ N = an หมายถึง จำนวนครั้งของการทดลองทั้งหมด

ส่วนค่าเฉลี่ยของกระบวนการ I จะคำนวณจาก $E(y_{ij}) = \mu_i = \mu + \tau_i$, I = 1, 2, ... , a จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของกระบวนการ I จะประกอบด้วยค่าเฉลี่ยรวมบวกด้วยค่าผลกระทบจากกระบวนการ I ในการทดสอบคุณภาพของค่าเฉลี่ยของกระบวนการ จะพิจารณาจากการทดสอบสมมติฐานโดยที่

H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \ldots = \mu_a$

H_1 : $\mu_i \neq \mu_j$ (อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ (i,j))

สมมติว่าสมมติฐาน H_0 เป็นจริง จะหมายความว่าทุกกระบวนการที่ทดลอง มีค่าเฉลี่ยของผลที่ได้จากการทดลอง (μ) เท่ากัน หรืออาจจะเขียนในรูปของค่าของผลกระทบ (τ_i) ได้ดังนี้

H_0 : $\tau_1 = \tau_2 = \ldots \tau_a = 0$

H_1 : $\tau_i \neq 0$ (อย่างน้อยหนึ่งค่าของ i)

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าความแปรปรวนของการทดลอง จะคำนวณจากผลรวมกำลังสองทั้งหมด ซึ่งหาได้จากสูตร

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \qquad (2.5)$$

จากสูตรนี้จะใช้ในการวัดความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล ซึ่งถ้าแบ่งค่า SS_T ด้วยขนาดของ องศาอิสระ (degree of freedom) ซึ่งในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ N-1 หรือ an - 1 จะได้ค่าความแปรปรวนของตัวอย่างที่ศึกษา

ผลรวมกำลังสองทั้งหมดจะคำนวณจาก

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}[(y_{i.} - y_{..}) + (y_{ij} - y_{i.})]^2 \qquad (2.6)$$

หรือ

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n\sum_{i=1}^{a}(y_{i.} - y_{..})^2 + \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - y_{i.})^2 + 2\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{i.} - y_{..})(y_{ij} - y_{i.})$$

ในขณะที่

$$\sum (y_{ij} - y_{i.}) = y_{i.} - n\bar{y}_{i.} = y_{i.} - n(y_{i.}/n) = 0 \qquad (2.7)$$

ดังนั้น

$$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n\sum_{i=1}^{a}(y_{i.} - y_{..})^2 + \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - y_{i.})^2 \qquad (2.8)$$

จากสมการ ค่าความแปรปรวนรวมของข้อมูล จะถูกวัดโดยผลรวมกำลังสองทั้งหมด ซึ่งมาจากผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกระบวนการและค่าเฉลี่ยทั้งหมด บวกกับ ผลรวมกำลังสองของผลต่างของค่าที่วัดได้ในกระบวนการ และค่าเฉลี่ยของกระบวนการ ซึ่งสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$SS_T = SS_{treatment} + SS_E \qquad (2.9)$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ $SS_{treatment}$ จะเรียกว่า ผลรวมกำลังสองของกระบวนการ (ระหว่างกระบวนการ) และ SS_E จะเรียกว่า ผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาด (ภายในกระบวนการ) โดยที่มีจำนวนข้อมูลทั้งหมดเท่ากับ N หรือ (an) ดังนั้น SS_Tจะมีค่าองศาอิสระเท่ากับ N-1 โดยที่มีจำนวนระดับปัจจัยเท่ากับ a ดังนั้น $SS_{treatment}$ จะมีค่าองศาอิสระเท่ากับ a-1 ในขณะที่ในกระบวนการใด ๆ จะมีจำนวนซ้ำในการทดลองเท่ากับ n ครั้ง ดังนั้นจะมีค่าองศาอิสระสำหรับการประมาณค่าความผิดพลาดในกระบวนการเท่ากับ n-1 ในแต่ละกระบวนการ ซึ่งถ้ามีทั้งหมด a กระบวนการ ดังนั้นจะมีค่าองศาอิสระรวมของความผิดพลาดในการทดลอง เท่ากับ a(n-1) = N-a ดังนั้นค่า SS_E / (N-a) จะเป็นค่าประมาณการความผิดพลาดทั่วไปของแต่ละประบวนการ a

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะใช้ในการพิจารณาค่าประมาณการของความแปรปรวนใน 2 ลักษณะ ประกอบด้วย ความแปรปรวนภายในกระบวนการ และความแปรปรวนระหว่างกระบวนการ ถ้าค่าเฉลี่ยกระบวนการไม่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าค่าที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 ลักษณะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ถ้าพบว่ามีความแตกต่างกัน แสดงว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีความแตกต่างกัน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการในการทดลอง

โดยค่าเฉลี่ยกำลังจะคำนวณจาก

$$MS_{treartments} = \frac{SS_{treatment}}{a - 1} \quad (2.10)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{N-a} \quad (2.11)$$

ในการทดสอบสมมติฐานถึงความไม่แตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของกระบวนการ หรือการเท่ากันของแต่ละกระบวนการ จะกำหนดให้ค่าผิดพลาด (ε_i) มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ค่าที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\mu + \tau_i$ และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 นอกจากนั้น SS_T ซึ่งหมายถึงผลรวมกำลังสองของตัวแปรสุ่มที่แจกแจงเป็นปกติ ดังนั้นจะได้ค่า SS_T / σ^2 แจกแจงในแบบไคว์สแควร์ ด้วยค่าองศาอิสระเท่ากับ N-1 ค่า SS_E / σ^2 แจกแจงในแบบไคว์สแควร์ ด้วยค่าองศาอิสระเท่ากับ N-a และค่า $SS_{Treatment} / \sigma^2$ แจกแจงในแบบไคว์สแควร์ ด้วยค่าองศาอิสระเท่ากับ a-1 และถ้าสมมติฐาน $H_0 : \tau_i = 0$ เป็นจริงจะสามารถคำนวณอัตราส่วนได้ดังนี้

$$F_0 = \frac{SS_{treatment} / (a-1)}{SS_E / (N-a)} = \frac{MS_{treatment}}{MS_E} \quad (2.12)$$

โดยมีการกระจายแบบ F ด้วยค่าองศาอิสระเท่ากับ a-1 และ N-a ซึ่งจะไม่ยอมรับสมมติฐาน H_0 และสรุปว่ากระบวนการมีความแตกต่างเมื่อ $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$ โดยที่ F_0 จะคำนวณได้จากสมการที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจะสรุปขั้นตอนในการคำนวณทั้งหมด ได้ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว Fixed Effect Model

แหล่งความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง (SS)	องศาอิสระ (df)	ค่ากำลังสองเฉลี่ย (MS)	F_0
ระหว่างกระบวนการ	$SS_{treatment}$	a-1	$MS_{treatment}$	
ค่าผิดพลาด (ภายในกระบวนการ)	SS_E	N-a	MS_E	
ทั้งหมด	SS_T	N-1		

2.1.4 การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบการทดลอง

การแจกแจงของค่าความแปรปรวนของผลการทดลองที่ได้ โดยการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยผลที่ได้จากการทดลองจะอธิบายได้ด้วยสมการ

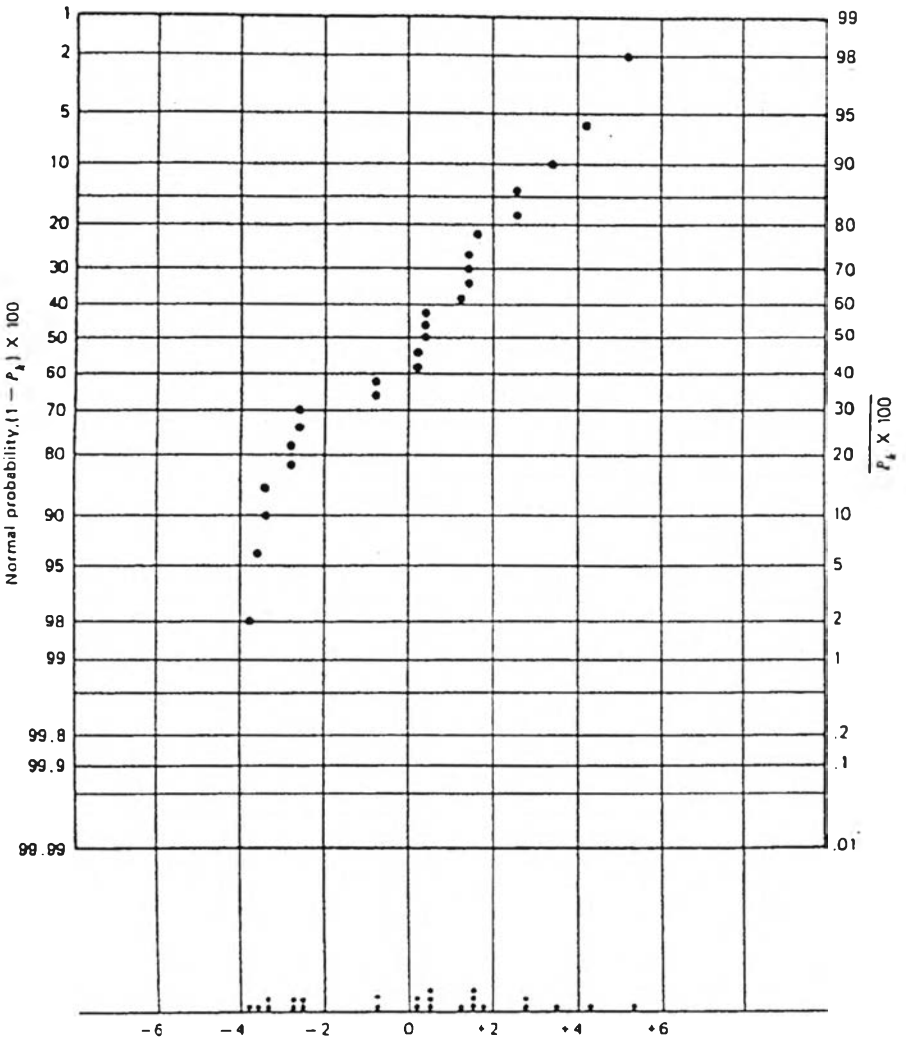
$$y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \qquad (2.13)$$

และค่าความผิดพลาด ซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติและมีอิสระ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีค่าคงที่ แต่จะไม่ทราบค่าความแปรปรวน (σ^2) ถ้าสมมติฐานเป็นจริง การวิเคราะห์ความแปรปรวน จะเป็นวิธีที่เหมาะสมในการทดสอบสมมติฐานถึงการไม่แตกต่างของค่าเฉลี่ยของกระบวนการ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ สมมติฐานอาจไม่ถูกต้องเสมอไป ดังนั้นในการจะเลือกใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบการทดลอง ซึ่งจะเป็นวิธีง่าย ๆ โดยการคำนวณหาค่าเรซิดวล โดยกำหนดให้ค่าเรซิดวลสำหรับผลการทดลอง j ในกระบวนการ i จะได้เท่ากับ

$$e_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij} \qquad (2.14)$$

ในการตรวจสอบความเป็นปกติของการทดลอง จะทำโดยการกำหนดจุดในลักษณะของแผนภูมิฮิสโตแกรมของค่าเรซิดวล ถ้าผลการทดลองมีรูปแบบที่ค่าผิดพลาดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีค่าความแปรปรวน σ^2 รูปแบบของฮิสโตแกรม จะมีลักษณะการแจกแจงเป็นปกติที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในรูป 2.2 นอกจากนั้นยังใช้วิธีแผนภูมิความน่าจะเป็นปกติของข้อมูลดิบในการตรวจ

สอบสมมติฐาน ถ้าเส้นที่ได้จากการกำหนดจุดมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่าค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงเป็นปกติ



รูปที่ 2.2 แผนภูมิฮิสโตแกรมค่าเรซิดวล และแผนภูมิความน่าจะเป็นปกติ

ดังนั้นกล่าวโดยสรุป หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) คือการหาความแปรปรวนโดยรวม แล้วแยกออกเป็นความแปรปรวนเนื่องจากกระบวนการ (Treatment) และความแปรปรวนเนื่องมาจากสาเหตุที่ไม่ได้รับการควบคุม หรือ รีพีททะบิลิตี้ แล้วพิจารณาเทอมของความแปรปรวนเนื่องจากกระบวนการว่ามีปริมาณมากหรือไม่ เมื่อเทียบกับผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระหว่างระดับหรือเงื่อนไขของการทดลอง หรือ รีโปรดิวซิบิลิตี้

2.1.5 การโปรแกรมเชิงเส้นตรง

การโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming) เป็นเทคนิคที่รู้จักอย่างแพร่หลายในส่วนของงานวิจัยการดำเนินงาน มีการประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นตรง ในการแก้ปัญหาการจัดสรรทรัพยากร (allocating resource) ปัจจัยหรือทรัพยากรมีความหมายรวมถึงวัตถุดิบกำลังคน เครื่องจักร เวลา สถานที่ เงิน หรือความรู้ความสามารถต่าง ๆ ปัญหาการจัดสรรทรัพยากรจะเกิดขึ้นเมื่อมีความต้องการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดทั้งในแง่ของขนาด ปริมาณและขอบเขตของการใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อการดำเนินการของระบบจากการตัดสินใจ

การโปรแกรมเชิงเส้นตรง เป็นเทคนิคในการแก้ไขปัญหาในการจัดสรรทรัพยากรที่มีลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเป็นเส้นตรงทั้งสิ้น โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแก้ปัญหาและตัดสินใจให้เกิดผลตามแนวทางการดำเนินงานที่ดีที่สุด เช่น กำไรสูงสุดค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดและแนวทางในการดำเนินการอื่น ๆ ที่ให้ผลประโยชน์มากที่สุดต่อระบบนั้น ๆ โดยมีเงื่อนไขกำหนดสภาวะ เช่น สภาวะการตลาด การขาดแคลนวัตถุดิบ กำลังคน เครื่องจักร เงินทุน สถานที่ หรือข้อกำหนดอื่น ๆ

รูปแบบที่ใช้แทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง จะใช้ระบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้

(1) มีสมการกำหนดเป้าหมาย (objective function) คือสมการแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุน กำไร ฯลฯ เพื่อให้กำหนดเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุด (maximize , minimize)

(2) มีสมการแสดงขอบข่าย (constraint) ซึ่งแสดงความจำกัดของปัจจัย หรือทรัพยากรในรูปของสมการหรืออสมการ

(3) ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการต่าง ๆ ของรูปแบบแทนระบบต้องมีลักษณะเชิงเส้นตรง (linear form) คือตัวแปรทุกตัวในสมการเป้าหมายและสมการหรืออสมการของขอบข่าย จะต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเป็นกำลังเดียวกัน (โดยมากเป็นกำลังหนึ่ง)

(4) ตัวแปรทุกต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

จากรูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรงนี้ จะเห็นได้ว่าตัวค่าวัดผลการดำเนินงาน จะได้จากสมการกำหนดเป้าหมาย ซึ่งจะต้องพยายามหาค่าเป็นไปตามเป้าหมาย โดยเทคนิคที่มีอยู่ ตัวแปรต่าง ๆ จะเป็นตัวแทนจำนวนปริมาณหรือค่าของปัจจัยที่มีอยู่จำกัด โดยการกำหนดของสมการหรืออสมการในขอบข่ายของปัญหา ผลการวิเคราะห์จะได้เป็นค่าของตัวแปรที่จะนำไปตัดสินใจเพื่อการดำเนินการให้ได้ตามเป้าหมาย การกำหนดขอบข่ายของปัญหาด้วยสมการหรืออสมการนั้น กำหนดขึ้นตามความเป็นจริง ซึ่งจะมีโอกาสอยู่ในแบบของอสมการมากกว่า

ตัวอย่างรูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง เพื่อให้หาค่าของตัวแปร เช่น X1 , X2 , ..., Xn ที่ให้ผลการดำเนินการที่มีค่าสูงสุดตามสมการเป้าหมายนี้

สมการเป้าหมาย : Max. Z $= C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$

สมการหรืออสมการขอบข่าย : $a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n < b_1$

$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n < b_2$

...

$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n < b_m$

$X_i > 0 ; I = 1, 2, \dots, n$

โดยมี $Z = F(X_i)$ เป็นสมการเป้าหมาย

X_i เป็นค่าตัวแปรที่แทนค่าของปัจจัย

a_{ij}, C_j เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีค่าคงที่

b_j เป็นปริมาณทรัพยากรที่จะนำมาใช้ในแต่ละกิจการซึ่งมีค่าคงที่

ขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรมเชิงเส้นตรง

(1) การจัดตั้งรูปแบบแทนระบบของปัญหา (Model Formulation) ก่อนอื่นต้องศึกษาข้อมูลองค์ประกอบของปัญหาให้เข้าใจ โดยเลือกเฉพาะองค์ประกอบที่สำคัญและมีอิทธิพลมาก แล้วจัดตั้งตัวแปรแทนส่วนประกอบของปัญหานั้น ๆ ให้ถูกต้องจนสามารถจัดตั้งส่วนประกอบดังนี้

ก. สมการกำหนดเป้าหมาย

ข. สมการหรืออสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรภายใต้ขอบข่ายต่าง ๆ ที่มีอยู่

ค. ให้แน่ใจว่าสมการหรืออสมการต่าง ๆ ที่ตั้งขึ้นแล้ว เป็นไปในลักษณะของสมการเชิงเส้นตรง และมีค่าของตัวแปรทุกตัวเป็นค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

(2) การหาผลลัพธ์ของรูปแบบแทนระบบของปัญหา (Model Solution) เมื่อสามารถจัดปัญหาเข้ารูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรงเรียบร้อยแล้ว จะสามารถหาผลลัพธ์จากรูปแบบแทนระบบ ด้วยวิธีการต่าง ๆ ประกอบด้วย

ในกรณีที่เป็นปัญหาที่มีตัวแปร 2 ตัว อาจใช้

ก. วิธีกำจัดขอบข่ายของคำตอบ (direct limination method)
ข. วิธีอนุมานทางคณิตศาสตร์ (mathematical deduction method)
ค. วิธีกราฟ (graphical method)

ในกรณีที่เป็นปัญหามีตัวแปรมากกว่า 2 ตัว อาจใช้

ก. วิธีทางพีชคณิตทั่วไป (general algebraic method)
ข. วิธี simplex method

วิธี simplex method เป็นวิธีทางพีชคณิตที่อาศัยทฤษฎีของเมตริกซ์เข้าร่วมในการจัดรูปแบบปัญหาให้มีระบบยิ่งขึ้น ช่วยให้สังเกตุเห็นความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรได้ง่าย และสามารถเข้าใจแนวทางที่ตัวแปรแต่ละตัวจะเปลี่ยนไปอย่างมีเหตุมีผล โดยวิธีดังกล่าวจะเริ่มด้วยการเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ให้มีผลต่อสมการเป้าหมาย โดยมีผลแนวโน้มสู่เป้าหมายในทางที่เร็วที่สุด การจัดรูปสมการเข้าเป็นตารางแล้วดำเนินการตามขั้นตอนที่ถูกต้อง จะต้องทำให้ได้ผลลัพธ์ตามเป้าหมาย ผลลัพธ์ใด ๆ อันเกิดจากค่าตัวแปรที่ใช้ได้ในสมการหรืออสมการขอบข่ายย่อมถือเป็นผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงเป้าหมายที่สุด จะถือเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุด และผลลัพธ์ที่ดีที่สุดซึ่งทำให้เกิดผลตามเป้าหมายเดียวกันอาจมีได้หลาย ๆ อัน

ขั้นตอนการแก้ปัญหา โดยวิธี simplex method ประกอบด้วย

ขั้นตอนที่ 1 จากรูปแบบของโปรแกรมเชิงเส้นตรง จัดรูปสมการขยายสู่ตารางดังต่อไปนี้

$$MAX : Z = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3$$

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 < b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 < b_2$$

$$a_{31}X_1 + a_{32}X_2 + a_{33}X_3 < b_3$$

สมการขยายจะเป็น

$$Z - C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 = 0$$

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + X_4 = b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + X_5 = b_2$$

$$a_{31}X_1 + a_{32}X_2 + a_{33}X_3 + X_6 = b_3$$

โดยตารางเพื่อหาผลลัพธ์เบื้องต้น จะเป็นดังนี้

ตัวแปรของผลลัพธ์ (basic variable)	ค่าเป้าหมาย (objective value)	ตัวแปรเปลี่ยน (decision variable)			ตัวแปรเพิ่ม (slack or artificial variable)			ผลลัพธ์ (solution)	
	Z	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	b	
Z	1	$-C_1$	$-C_2$	$-C_3$	0	0	0	0	สมการเป้าหมาย
X_4	0	a_{11}	a_{12}	a_{13}	1	0	0	b_1	
X_5	0	a_{21}	a_{22}	a_{23}	0	1	0	b_2	สมการขอบข่าย
X_6	0	a_{31}	a_{32}	a_{33}	0	0	1	b_3	

ภายในตารางจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร โดยมีหลักเกณฑ์ของ simplex method กำหนดไว้ว่าตัวแปรเพิ่มนั้นต้องเป็น identity matrix สำหรับผลลัพธ์เบื้องต้น

ขั้นตอนที่ 2 พิจารณาจากค่าต่าง ๆ บนตารางในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งถือว่าเป็นผลลัพธ์เบื้องต้นได้ดังนี้

(1) เริ่มค่าตัวแปรเปลี่ยน (decision variable) หรือ nonbasic variable เป็นศูนย์หมดคือ $X_1, X_2, X_3 = 0$ อันนี้เป็นจุดเริ่มต้นที่มั่นใจได้ว่าตัวแปรทุกตัวต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

(2) ค่าของสมการเป้าหมาย ซึ่งได้จาก $Z - C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 = 0$ จะมีค่า Z = 0 ด้วย

(3) ค่าตัวแปรเพิ่มต่าง ๆ อ่านจากผลลัพธ์ค่าตัวแปรของผลลัพธ์ได้ดังนี้

$$X_4 = b_1$$
$$X_5 = b_2$$
$$X_6 = b_3$$

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาทดสอบผลลัพธ์ว่าดีที่สุดแล้วหรือยัง การทดสอบผลลัพธ์ในขั้นตอนนี้เรียกว่า การทดสอบหลักเกณฑ์ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (optimality criterion) จะเห็นได้ว่าในบางครั้งแม้แต่ผลลัพธ์เบื้องต้น ก็อาจเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดอยู่แล้ว แต่โดยมากมักจะหาผลลัพธ์ที่ดีกว่า โดยการใช้หลักเกณฑ์ทดสอบผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ในการพิจารณาว่าผลลัพธ์ที่ได้ดีที่สุดแล้วหรือยัง ให้ทำการวิเคราะห์สมการเป้าหมาย $Z - C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 = 0$ โดยการเริ่มแรกด้วย X_1 , X_2 , X3 = 0 มีผลทำให้ Z = 0 จะเห็นได้ว่าถ้าเพิ่มค่าของตัวแปร X_1, X_2, หรือ X_3 ตัวหนึ่งตัวใดจะมีผลทำให้ค่า Z สูงขึ้น แสดงว่าถ้าค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่เป็นสมการเป้าหมายยังมีค่าเป็นลบอยู่ในตาราง การเพิ่มค่าตัวแปรของสัมประสิทธิ์นั้น ๆ จะมีผลทำให้ค่าของสมการเป้าหมายเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งถ้าค่าของ C_1, C_2, และ C_3 ยังมีเครื่อง-หมายลบอยู่ การดำเนินการเพื่อหาผลลัพธ์ที่ดีขึ้นยังต้องทำกันต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 พิจารณาหาตัวแปรที่จะเพิ่มค่าซึ่งมีผลทำให้ค่าของสมการเป้าหมายเพิ่มขึ้น การเพิ่มค่าตัวแปรพิจารณาจากค่าตัวแปรที่ให้ค่าของสมการเป้าหมายเพิ่มได้มากที่สุด สังเกตได้จากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรเปลี่ยนมีค่าลบสูงสุด ซึ่งเมื่อย้ายข้างมาด้านขวาของสมการเป้าหมายในตารางจะเป็นค่าสัมประสิทธิ์บวกสูงสุด ถือเป็นตัวที่จะเพิ่มค่า จากตารางถ้า C_2 มีค่าลบสูงสุด X_2 จะเป็นตัวที่เพิ่มค่าให้ก่อน

จากนั้นพิจารณาตัวแปรเพื่อลดค่าจากตัวแปรเพิ่ม (slack or artificial variable) ซึ่งมีค่า $X_4 = b_1$, $X_5 = b_2$, $X_6 = b_3$ โดยการพิจารณา หาตัวลดค่าเพื่อเพิ่มค่า X_2 นั้น จะต้องลดค่าตัวแปรเพิ่มให้มากที่สุด ภายใต้เงื่อนไขขอบข่ายที่ว่า ค่าตัวแปรเพิ่มที่ลดนั้นต้องไม่เป็นค่าลบ จากสมการขอบข่ายในตารางจะเห็นได้ว่า จะลดค่า X_4, X_5 หรือ X_6 ได้ทั้งนั้น ส่วนจะให้ลดตัวไหนนั้นต้องเลือกใช้ส่วนที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบข่ายทั้งสามอันได้หมด โดยการพิจารณาจากผลหารที่เกิดจากผลลัพธ์ค่าตัวแปรในตารางและแถวตั้งของค่าตัวแปรเปลี่ยนที่จะเพิ่มค่า X_2 จะได้ผลหารตามแนวนอนตัวต่อตัวดังนี้ b_1/a_{12} , b_2/a_{22} , b_3/a_{32} เลือกค่าผลหารน้อยที่สุดแสดงเป็นตัวลดค่าของตัวแปรเพิ่มตามแนวนอนคือ X_4, X_5 หรือ X_6 เช่น ถ้า b_2/a_{22} น้อยที่สุด ตัวแปรที่จะลดค่าคือ X_5 สาเหตุที่ถือค่าผลหารน้อยที่สุดเป็นแนวช่วยตัดสินตัวแปรลดค่าก็เพราะว่าค่าตัวแปรที่เพิ่มค่านั้น ต้องอยู่ภายในขอบข่ายทุก ๆ สมการขอบข่าย ถ้าถือเอาผลหารมากเป็นเกณฑ์ จะทำให้ขาดคุณสมบัติในอสมการขอบข่ายที่มีตัวผลหารน้อยกว่า และทำให้ผิดหลักเกณฑ์ของผลหารที่เป็นไปได้

ตัวแปรเข้า

		Z	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	b
	Z	1	C1	C_2	C_3	0	0	0	0
	X_4	0	a_{11}	a_{12}	a_{13}	1	0	0	b_1
ตัวแปรออก	X_5	0	a_{21}	a_{22} (circled)	a_{23}	0	1	0	b_2
	X_6	0	a_{31}	a_{32}	a_{33}	0	0	1	b_3

เรียกตัวที่เพิ่มค่าของตัวแปรในตารางว่า ตัวแปรเข้า (X_2) และตัวแปรที่ลดค่าว่า ตัวแปรออก (X_5) พิจารณาจากแถวนอนของตัวแปรออก จะได้สมการ

$a_{22}X_2 + X_5 = b_2$ โดย $X_1, X_3 = 0$

เมื่อลดค่า $X_5 = 0$ จะได้ $X_2 = b_2/a_{22}$

แทนค่า X_2 เป็นตัวแปรเข้ามีค่า b_2/a_{22} ในตารางโดยวิธีหารแถวนอนของตัวแปรลดค่าหรือตัวแปรออกด้วย a_{22} สัมประสิทธิ์ในช่องที่เกิดจากการตัดกันของแถวยืนของตัวแปรเข้าและแถวนอนของตัวแปรออก จะมีค่าเป็น 1 และเรียกจุดนี้ว่า จุดหมุน (pivot point)

ขั้นตอนที่ 5 จากจุดหมุน ใช้วิธีทางพีชคณิตดังกล่าวมาแล้วทำสัมประสิทธิ์อื่น ๆ ในแถวยืนให้เป็นศูนย์ ผลที่ได้จะทำให้ค่า Z มีผลลัพธ์สูงขึ้นดังนี้

	Z	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	b
Z	1	$-C'_1$	0	$-C'_3$	0	C'_5	0	$C_2b'_2$
X_4	0	a'_{11}	0	a'_{13}	1	a_{15}	0	b'_1
X_2	0	a'_{21}	1	a'_{23}	0	a_{25}	0	b'_2
X_6	0	a'_{31}	0	a'_{33}	0	a_{35}	1	b'_3

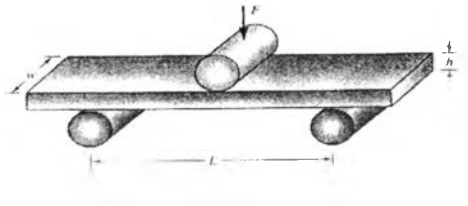
เมื่อได้ตารางแสดงผลกำไรดำเนินการตามขั้นตอนที่ 5 แล้ว ให้กลับไปเริ่มต้นในขั้นตอนที่ 3 ต่อไปจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

2.1.6 การทดสอบแรงดัดของวัสดุเปราะ (Brittle Material)

Askeland (1984) อธิบายว่า ในการทดสอบวัสดุที่มีลักษณะเปราะ หักง่าย เช่น อิฐ กระเบื้อง คอนกรีต หรือ คานคอนกรีต เป็นต้น โดยทั่วไปจะไม่สามารถทำการทดสอบแรงดึง (Tensile Strength) ได้ เพราะจะเกิดการแตกบริเวณที่จับวัสดุที่นำมาทดสอบ ดังนั้นในการทดสอบจะใช้วิธีการทดสอบแรงดัด (Bend Test) โดยการประยุกต์แนวคิดของน้ำหนักกระทำที่สามจุด และลักษณะการแตก โดยแรงจะกระทำในทิศทางตรงกันข้ามกับจุดกึ่งกลางของวัสดุ และการแตกจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้ ค่าโมดูลัสของการแตก (Modulus of rupture) หรือค่า Flexural strength จะหาได้จาก

$$\text{Flexural Strength} = \frac{3FL}{2wh^2}$$

โดยค่า F จะหมายถึงแรงที่กระทำลงบนวัสดุ ค่า L หมายถึงระยะห่างระหว่างจุดรองรับวัสดุทั้งสองจุด ค่า w คือความกว้างของชิ้นงานที่ทดสอบ และค่า h คือค่าความสูงของชิ้นงานที่ทดสอบ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทดสอบแรงดัดของวัสดุเปราะ หักง่าย

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Flexural Strength กำหนดให้วัสดุเป็นไฟเบอร์กลาส มีค่า Flexural Strength เท่ากับ 45,000 psi โดยตัวอย่างชิ้นงานที่ศึกษา มีขนาดความกว้างเท่ากับ 0.5 นิ้ว ความยาว 8 นิ้ว และความสูง 0.375 นิ้ว และมีแกนรองรับ 2 แกนระยะห่าง 5 นิ้ว ทำการคำนวณหาแรงที่กดลงบนวัสดุจนมีผลทำให้เกิดการแตกหัก

จากข้อมูล จะได้ w = 0.5 in , h = 0.375 in และ L = 5 in จากสมการ

$$45,000 = \frac{3FL}{2wh^2} = \frac{3(F)(5)}{(2)(0.5)(0.375)^2} = 106.7F$$

$$F = 422 \text{ lb}$$

ดังนั้นแรงที่ใช้ในการกดไฟเบอร์กลาสนี้ จะต้องเท่ากับ 422 ปอนด์ จึงจะทำให้เกิดการแตกหักได้

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวซ้องสรุปได้ดังต่อไปนี้

Dan Fairchild (1997) จากวารสาร Quality Engineering ในบทความเรื่อง Experimental Designs ได้อธิบายถึงการออกแบบการทดลอง หรือ Design of Experiment สามารถแบ่งได้หลายรูปแบบ ประกอบด้วย Full Factorial , Fractional Factorial , Tagushi , Plackett-Burman Screening Designs , Latin Square Designs หรือในรูปแบบอื่น ๆ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาหรือกรณีที่ศึกษา เช่น การทดลองแบบ Full Factorial จะต้องใช้ปริมาณข้อมูลมากที่สุดจากทุก ๆ ปัจจัยที่กำลังพิจารณาอยู่ ในขณะที่การทดลองแบบ Fractional Factorial จะไม่ต้องการข้อมูลมาก จะใช้ข้อมูลเพียงบางส่วน ทำให้ต้นทุนในการดำเนินการทดลองต่ำลง หรือการทดลองแบบ Plackett-Burman Screening Designs จะพิจารณาข้อมูลเฉพาะ main factor (ไม่พิจารณา interaction) ดังนั้นจำนวนการทดลองจึงน้อยครั้งกว่า

ในงานศึกษาของ Teresa Lopez-Alvarez และ Victor Aguirre-Torres (1997) เรื่อง Improving Field Performance by Sequential Experimentation : A Successful Case Study in The Chemical Industry ในวารสาร Quality Engineering ว่าในการปรับปรุงคุณภาพการเคลือบสีรถยนต์ โดยการพ่นสีเคลือบรถยนต์ จะมีอยู่ 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้น primer ซึ่งจะให้คุณสมบัติป้องกันการสึกกร่อน ชั้น Base Coat จะแสดงสีของรถยนต์ และชั้น Clear Coat จะให้ความมันวาวต่อสี ในการศึกษานี้ได้ใช้เทคนิค DOE ในการปรับปรุงระดับของค่าสีเหลือง ซึ่งวัดค่าสีด้วยเครื่อง colorimeter จากสภาพเดิมระดับของค่าสีเหลืองจะอยู่ที่ประมาณ 150 % ได้กำหนดเป้าหมายในการปรับปรุงลดให้เหลือไม่เกิน 20 % ในการปรับปรุงจะประกอบด้วย 4 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรก จะเป็นการทดลองเพื่อ screening จากปัจจัยที่พิจารณาทั้งหมด 10 ปัจจัย ซึ่งจากขั้นตอนนี้สามารถลดระดับค่า

ของสีเหลืองเหลือประมาณ 60 % ในขั้นตอนที่สองจะเป็นการพิจารณาปัจจัยเพียง 4 ถึง 5 ปัจจัยที่ได้จากการ screening ในขั้นตอนแรกมาทำการทดลอง โดยใช้ระดับของปัจจัยใหม่ที่ได้จากแนวโน้มของการทดลองในขั้นตอนแรก ซึ่งจากขั้นตอนนี้จะชี้ให้เห็นการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัย ซึ่งเป็นองค์ประกอบของชั้น clear coat ซึ่งทำให้ระดับของค่าสีลดลงเหลือ 38 % ในขั้นตอนที่สาม ได้ทำการพิจารณาองค์ประกอบของชั้น clear coat และ base coat ส่งผลให้ระดับของค่าสีเหลืองลดลงเหลือ 30 % และในขั้นตอนที่สี่ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย จะเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิค response surface design ซึ่งจะได้ระดับของค่าสีเหลืองที่ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่เลือกไว้แล้วประมาณ 2 % ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมายที่ต้องการอย่างมาก

ในบทความของ K.N. Anand (1997) ในวารสาร Quality Engineering เรื่อง Improving The Yield of Selica Gel in a Chemical Plant โดยได้ทดลองปรับปรุงระดับคุณภาพของ Silica Gel ในโรงงานเคมี โดยคุณสมบัติที่สำคัญของ Silica Gel คือความสามารถในการดูดซึมความชื้น ซึ่งการดูดซึมจะลดลงเมื่อขนาดของ crystal เล็กกว่า 2 มม. และความหนาแน่นต่ำกว่า 6 ถ้าขนาดที่ต่ำกว่า 2 มม. จะถูกขายเป็นสินค้าชั้นสอง และถ้ามีลักษณะเป็นฝุ่นผงจะตัดเป็นของเสีย (scrap) จากการสำรวจสภาพเดิม พบว่าสัดส่วนของสินค้าชั้นสองมี 20 % และส่วนที่ตัดเป็นของเสียมี 5 % ภายหลังจากการออกแบบการทดลองพบว่าปัจจัยที่จะทำให้จำนวนสินค้าชั้นสองและของเสียน้อยที่สุด ต้องกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของ Sodium Silicate อยู่ที่ 1.123 และค่า pH ของ Sodium Silicate อยู่ที่ 4.0 เมื่อนำไปทำการผลิตภายใต้สภาพที่กำหนดใหม่แล้วพบว่า สินค้าชั้นหนึ่งเพิ่มขึ้นเป็น 87.7 % (จากเดิม 74.5 %) ส่วนสินค้าชั้นสองลดลงเหลือ 10.22 % และของเสียลดลงเหลือ 2.11 %

Melissa L. Bowles และ Douglas C. Montgomery (1997) ในวารสาร Quality Engineering เรื่อง How to Formulate the Ultimate Margarita : A Tutorial on Experiments with Mixtures ได้ทำการออกแบบเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมของ margarita ซึ่งมีส่วนผสมอยู่ 4 อย่างประกอบด้วย tequila , lime juice , margarita mix และ triple sec. โดยเป้าหมายเพื่อสร้างความพึงพอใจสูงสุดให้กับผู้ดื่ม ซึ่งการหาสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์นี้เป็นรูปแบบหนึ่งของการออกแบบการทดลองที่เรียกว่า การออกแบบส่วนผสม (mixture experiment) การออกแบบแบบนี้จะใช้มากในผลิตภัณฑ์ที่เป็นสูตรผสม เช่น สูตรผสมในผลิตภัณฑ์เครื่องบริโภคต่าง ๆ ได้แก่ แชมพูสระผม สบู่ หรือผลิตภัณฑ์ประเภทยา อาหารและเครื่องดื่ม หรือสีย้อมผ้า ในการออกแบบการทดลองโดยทั่วไป ระดับของปัจจัยที่เลือกไว้ในการออกแบบการทดลองจะเป็นอิสระต่อกันกับปัจจัยอื่น ๆ ที่เลือกไว้ ในขณะที่การออกแบบส่วนผสม ปัจจัยการทดลองจะหมายถึงองค์ประกอบของส่วนผสมนั้น ๆ โดยคำตอบจะเป็นสมการของสัดส่วนขององค์ประกอบแต่ละตัว ซึ่งสัดส่วนของแต่ละตัวจะวัดในรูปของโดยน้ำหนัก โดยปริมาตร หรือโดยอัตราส่วนโมล ทั้งนี้ในการผสม margarita จึงต้องการสัดส่วนที่เหมาะสมของส่วนผสมทั้ง 4 อย่างภายในปริมาตรของภาชนะที่คงที่ ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ โดยการใช้ซอฟท์แวร์ชื่อ Design-Expert จะได้ค่าที่เหมาะสมประกอบด้วย margarita mix เท่ากับ 55 % tequila เท่ากับ

25.67 % triple sec. เท่ากับ 9.33 % และ lime juice เท่ากับ 10.00 % โดยวัดค่าความพึงพอใจที่คาดหมายเท่ากับ 5.9 และ ระดับความคาดหมายเท่ากับ 4.7

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ (2533) ได้เสนอบทความเรื่องการออกแบบและการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการ โดยอาศัยการออกแบบการทดลองทางสถิติ ในวารสารวิศวกรรมสาร โดยได้เสนอการนำเอาหลักการการออกแบบการทดลองทางสถิติมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบและการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการ โดยได้กล่าวถึงแนวความคิดและเทคนิคที่สำคัญสำหรับงานวิจัยเพื่อการออกแบบและพัฒนาดังกล่าว นอกจากนั้น ยังได้กล่าวเปรียบเทียบกับวิธีการออกแบบและพัฒนาที่อาศัยหลักการทางวิศวกรรมเพียงอย่างเดียว มีข้อบกพร่องที่สามารถแก้ไขด้วยหลักการการออกแบบการทดลองทางสถิติได้อย่างไร ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการ โดยอาศัยหลักการการออกแบบการทดลองทางสถิตินี้ จะทำให้ได้พารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ และค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในการใช้งานของผลิตภัณฑ์และการผลิตของกระบวนการที่น้อยที่สุด ซึ่งหมายความว่าเป็นการกำจัดความผันแปร เนื่องจากสาเหตุที่กำหนดไว้ ตลอดจนการลดความผันแปรเนื่องจากสาเหตุแบบสุ่มได้ในเวลาเดียวกัน

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ (2534) ได้กล่าวถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมคุณภาพนอกสายการผลิต (Off-Line Quality Control) ในวารสาร สสท. ฉบับ คิวซี เรื่องการศึกษา TAGUSHI TECHNIQUE ด้วยตัวอย่างจริง : การประยุกต์ OFF-LINE QC กับงานขึ้นรูปตัว IC ซึ่งเป็นเทคนิคที่สำคัญที่สุดของ Taguchi ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการขึ้นรูป Contract Windows ใน CMOS โดยขั้นตอนหลัก ๆ ของเทคนิค off-line QC นี้จะประกอบไปด้วย

1. การนิยามปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการ ตลอดจนระดับของปัจจัยต่าง ๆ เหล่านั้น
2. ทำการทดลองโดยอาศัย Orthogonal Array ที่เหมาะสม
3. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางเทคนิคที่เหมาะสม เพื่อให้ได้มาซึ่งระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

ซึ่งในการทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตให้ต่ำที่สุด ภายหลังจากการทดลองใช้พารามิเตอร์ใหม่ด้วยระยะเวลาพอสมควร พบว่าขนาดของ Window มีความสม่ำเสมอมากขึ้น จนวิศวกรมีความมั่นใจได้ว่ากระบวนการผลิตดังกล่าวมีเสถียรภาพและมีความแข็งแรงต่อสภาวะแวดล้อมในการผลิตดี จึงได้ยกเลิกระบบการตรวจภายในกระบวนการ (In-Process Checking) ทั้งหมด

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และธีรราช ลีกีรติกุล (2542) ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตกำลังสูง ในเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต โดยสรุปว่าการใช้เถ้าถ่านหินนั้นเป็นที่ยอมรับกันว่าเหมาะสมและควรใช้เป็นอย่างยิ่งในงานคอนกรีตกำลังสูง แต่สิ่งหนึ่งที่วิศวกรหรือผู้เกี่ยวข้องควรคำนึงถึงให้มากที่สุดคือ คุณสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงที่มีส่วน

ผสมของเถ้าถ่านหินอยู่ และเมื่อใช้เถ้าถ่านหินในการผสมคอนกรีตแล้ว ควรให้ผลทางด้านบวกต่อคอนกรีต นั่นคือเถ้าถ่านหินที่ใช้ต้องเป็นเถ้าถ่านหินที่มีคุณภาพดีด้วย และเมื่อนำไปใช้งานทุกครั้งไม่ว่าในงานคอนกรีตธรรมดาหรือในงานคอนกรีตกำลังสูง ต้องให้ผลทางด้านดีต่อคอนกรีตเสมอ แต่ในการใช้งานโดยทั่วไป มักมีปัญหาที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน จะมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตไม่ใช้เถ้าถ่านหิน และกว่าจะมีกำลังอัดที่เท่ากันหรือสูงกว่า ต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนาน เช่น 28 วันหรือ 60 วันขึ้นไป ดังนั้นในรายงานนี้จึงได้เสนอให้ใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการแยกเอาขนาดที่มีความละเอียดสูง มีขนาดอนุภาคเล็กมาใช้งาน ซึ่งจะประสบความสำเร็จในการทำคอนกรีตกำลังสูง การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินขนาดเล็กในอัตราส่วนร้อยละ 15 , 25 และ 35 จะทำให้กำลังอัดโดยรวมดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหิน ซึ่งผลที่ได้จะแตกต่างจากผลการทดสอบที่ใช้เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการคัดขนาดมาแทนที่ในปูนซีเมนต์อย่างมาก เพราะการใช้เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการคัดขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ จะได้มอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ใส่เถ้าถ่านหินในช่วงอายุต้น ๆ (ก่อน 28 วัน) มาก

ในงานวิทยานิพนธ์ของกรกฎ วิจิตรพงศ์ (2530) เรื่องการใช้ขี้เถ้าลอยแม่เมาะในการปรับปรุงความสามารถทำงานได้ในคอนกรีตสด พบว่าความสามารถในการทำงานได้ใน ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยในการยุบตัว การไหล และการทำให้แน่น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเถ้าลอยในส่วนผสม และขี้เถ้าลอยยังมีคุณสมบัติลดน้ำ โดยการเติมขี้เถ้าลอยทุก ๆ 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะสามารถลดสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลงได้ 0.03 เปอร์เซนต์ และระยะเวลาในการก่อตัวที่เพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณของขี้เถ้าลอยที่เติมเข้าไป

จากงานวิทยานิพนธ์ของณัฐเศรษฐ์ สมแสน (2539) ได้ศึกษาถึงการนำของเสียที่เกิดจากการผลิตกระเบื้องใยหิน (sludge waste) ซึ่งเป็นของเสียที่มีแอสเบสตอสปะปนอยู่ มาใช้ในการผลิตหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง โดยในการทดสอบจะทำกับชิ้นงานตัวอย่างทดสอบจากส่วนผสมคอนกรีต โดยการใช้ sludge waste ทดแทนซีเมนต์ ทราย หินเกล็ด และเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีตปกติ ส่วนวิธีการทดสอบจะใช้การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ กำลังอัด กำลังดัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ การคดเลือกส่วนผสมและกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตที่สามารถใช้ sludge waste และลดต้นทุนวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียได้สูงสุด จากนั้นจึงได้นำส่วนผสมที่ได้ไปทดลองผลิตเป็นหมอนคอนกรีตรองกระเบื้อง และทดลองใช้งานจริงเทียบกับหมอนคอนกรีตปกติที่ไม่ใช้ sludge waste ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการผลิตหทมอนคอนกรีตรองกระเบื้องคือสัดส่วนซีเมนต์ :ทราย :หินเกล็ด : sludge waste เท่ากับ 0.8 : 1 : 2 : 0.2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน โดยสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบหมอนคอนกรีตรองกระเบื้องที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ลงจาก 2.12 บาทต่อก้อน เหลือ 1.80 บาทต่อก้อน หรือลดลง 0.32 บาทต่อก้อน

กาญจนา กาญจนสุนทร (2539) ได้เสนองานวิทยานิพนธ์ ในการศึกษาถึงส่วนผสมที่เหมาะสมของวัตถุดิบ เพื่อทำการลดต้นทุนการผลิตพีวีซีชนิดยืดหยุ่น โดยเป็นการศึกษาทางกายภาพ และ

เชิงกลของพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่นที่มีส่วนประกอบหลักของ Dioctyl Phthalate (DOP) แคลเซียมคาร์บอเนต และซีริคลอ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมกับคุณสมบัติที่ต้องการ ภายใต้ต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วยต่ำสุด ซึ่งผลที่ได้พบว่าสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมของการศึกษาระหว่าง DOP และแคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าเท่ากับ 72.07 และ 70.45 phr. ตามลำดับ ซึ่งจุดผสมดังกล่าว จะทำให้ต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วยเท่ากับ 19.66 บาท/กิโลกรัม และเมื่อนำซีริคลอมาทดแทน DOP จะสามารถทดแทน DOP ได้ในปริมาณ 35 phr. หรือคิดเป็น 15 % ของปริมาณ DOP ที่ใช้ ซึ่งจุดการผสมนี้ จะทำให้ต้นทุนของวัตถุดิบต่อหน่วยลดลงจาก 19.66 บาท/กิโลกรัม เหลือ 18.66 บาท/กิโลกรัม

ในงานศึกษาเรื่อง คุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์ที่ผสมจากน้ำผ่านสนามแม่เหล็ก โดย นรา เรืองธนานุรักษ์ รัฐพงษ์ ยาจารย์ สุพจน์ สุขสำราญ และดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม (2539) ในเอกสารรวมบทความโครงงานทางวิศวกรรมโยธา ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำผ่านสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อคอนกรีตและมอร์ต้า โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ใช้ผสม 3 ประเภท คือ น้ำประปาธรรมดา น้ำผ่านสนามแม่เหล็ก และน้ำผสมสารลดน้ำอย่างแรง ซึ่งจากการศึกษาคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าของน้ำชนิดต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่าน้ำที่ผ่านสนามแม่เหล็ก จะมีค่าการนำไฟฟ้าไม่แตกต่างจากน้ำประปา เนื่องจากความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านสนามแม่เหล็กที่ใช้น้อยแกินไป ที่จะทำให้น้ำมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด และน้ำผสมสารลดน้ำอย่างแรง ให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากน้ำประปา 400 % คุณสมบัติของคอนกรีตและมอร์ต้าที่ผสมด้วยน้ำผ่านสนามแม่เหล็ก จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 8-15 % คุณสมบัติด้านการไหลดีขึ้นประมาณ 30% และระยะเวลาการก่อตัวในช่วงต้นเร็วขึ้นประมาณ 60-80 นาที ส่วนมอร์ต้าและคอนกรีตที่ผสมสารลดน้ำอย่างแรง ให้ค่าการไหลเพิ่มขึ้นประมาณ 50-100 % การก่อตัวเร็วขึ้นประมาณ 20 นาที กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นประมาณ 10 % การพัฒนากำลังในช่วงต้นเร็วพอ ๆ กับน้ำผ่านสนามแม่เหล็ก ส่วนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตจากน้ำทุกประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน

ปณต อัตราเอกปัญญา พงศ์เทพ แซ่เฮ้ง และดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม (2539) ในรวมบทความโครงงานทางวิศวกรรมโยธา ได้ศึกษาเรื่องคุณสมบัติของมอร์ต้าที่ใช้ผงแก้วแทนทราย ซึ่งเป็นการศึกษาผลของผงแก้ว ซึ่งนำมาผสมร่วมกับทรายในมอร์ต้า และหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานปูนฉาบ จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผงแก้วต่อมวลรวม (G/A) ที่ให้กำลังของมอร์ต้าสูงสุดอยู่ในช่วง 0.2-0.3 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่ให้กำลังสูงสุดอยู่ในช่วง 0.45-0.5 ส่วนในด้านการหดตัว จะมีน้อยที่สุดเมื่ออัตราส่วนผงแก้วต่อมวลรวมอยู่ในช่วง 0.4-0.6 โดยผงแก้วที่นำมาผสมในมอร์ต้า จะเป็นเศษแก้วที่แตกหักในระหว่างกระบวนการล้างทำความสะอาดเศษแก้วก่อนนำไปหลอมใหม่ และมีการดักเก็บไว้ จะมีรูปร่างเรียว ยาว แบน ผิวเรียบเป็นมัน ในขณะที่ทราย(ทรายแม่น้ำ) จะมีรูปร่างค่อนข้างกลม ผิวขรุขระ ซึ่งรูปร่างดังกล่าวมีผลต่อปริมาณช่องว่างภายใน ช่วยทำให้ความสามารถในการเทของมอร์ต้าดีขึ้น