

การออกแบบการทดลองทางอุตสาหกรรม โดยใช้อนุกรมของ Orthogonal Array (Sequential Orthogonal Array Experimentation in Industrial Experimental Design)

พ.ท.นพพงษ์ กิจรัตน์*

บทคัดย่อ

การทดลองทางอุตสาหกรรมนั้น เกี่ยวเนื่องกับการให้ได้มาซึ่งระดับของปัจจัยที่ดีที่สุดในการผลิต โดยมีเวลาและทรัพยากรจำกัด การปฏิบัติการทดลองทางอุตสาหกรรมในปัจจุบันเน้นการทดลองแบบเบ็ดเสร็จ (Comprehensive) โดยแบ่งเป็น ๒ ชนิด คือ ผู้ทดลองเลือกที่จะไม่พิจารณาผลของ Interactions มากเกินไป ซึ่งผลลัพธ์อาจจะไขว้เขว (Misleading) และในทางตรงกันข้าม ผู้ทดลองพิจารณาผลของ Interactions มากเกินไป เช่น การทดลองโดยใช้ Resolution V ก็อาจจะทำให้ทรัพยากรและเวลาดำเนินการสูญเสียไปเกินกว่าเหตุ ในปัจจุบันนี้แนวทางพิจารณาใช้การทดลองแบบอนุกรมแทนการทดลองสุดโคง (Extremum) ทั้งสองชนิด ยังไม่ได้รับการพัฒนาเท่าที่ควร การศึกษาในครั้งนี้จะได้ทำการตรวจสอบ Orthogonal Array ฐานสองซึ่งรู้จักกันอย่างแพร่หลาย เพื่อจัดรูปแบบเสียใหม่ให้สะดวก ตลอดจนกำหนดขั้นตอนในการที่จะใช้ในการทดลองแบบอนุกรมให้เป็นอัตโนมัติ ซึ่งวิธีการที่เสนอใหม่นี้ จะมีความอ่อนตัวในการใช้และสามารถจะทดแทน วิธีการสุดโคงทั้งสองได้อีกทั้งยังอยู่ในระหว่างกลาง ซึ่งผู้ทดลองสามารถกำหนดได้ วิธีการนี้นับว่าเป็นวิธีที่ประหยัด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองแบบเบ็ดเสร็จซึ่งใช้อยู่ โดยพิจารณาจำนวนปัจจัยที่เท่ากัน ยิ่งไปกว่านั้นวิธีการที่เสนอใหม่นี้ยังใช้ได้ทั้งในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่และปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตที่มีอยู่เดิม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สามารถใช้ได้ทั้ง Off-line และ On-line Quality Engineering

* อาจารย์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ กองวิชาวิศวกรรมสรรพาวุธ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

๑. บทนำ

๑.๑ การปรับปรุงคุณภาพในญี่ปุ่นเปรียบเทียบกับสหรัฐอเมริกา

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาอเมริกาได้ตระหนักถึงความสูญเสียของตลาดสินค้าอุตสาหกรรมให้กับญี่ปุ่น ทั้งตลาดภายในและตลาดต่างประเทศ ด้วยเหตุผลสำคัญสองประการ คือ คุณภาพและราคาของสินค้า คุณภาพและราคา คือ สองปัจจัยหลักของความอยู่รอดในตลาดการค้าเสรี ผลิตภัณฑ์ที่จะอยู่รอดได้จำเป็นต้องมีคุณภาพสูงในขณะที่ราคาสมเหตุสมผล

เพื่อตอบสนองกับข้อพิจารณาข้างต้น สหรัฐอเมริกาได้พยายามที่จะปรับปรุงคุณภาพและลดต้นทุนการผลิตด้วยวิธีการที่เรียกว่า “การปรับปรุงผลิตภัณฑ์และกรรมวิธีการผลิต” (Product and Process Improvement) วัตถุประสงค์ดังกล่าวสามารถที่จะบรรลุได้ด้วยเครื่องมือหลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) การควบคุมคุณภาพทางสถิติ (Statistical Process Control, SPC) เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปรัชญาความเชื่อของแต่ละประเทศ ซึ่งได้พัฒนาเครื่องมือของตนเองเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของสินค้าและกรรมวิธีการในการผลิต

๑.๒ ความสำคัญของการออกแบบการทดลอง (DOE)

ญี่ปุ่นได้ใช้ DOE เป็นเครื่องมือในการนี้ควบคู่ไปกับเครื่องมืออื่น ๆ มาเป็นเวลามากกว่า ๓๐ ปีแล้ว วิธีการของตากูชิ (Taguchi Methods) เป็นหนึ่งใน DOE ที่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย วิธีการของตากูชิ เป็นวิธีการที่ง่ายแต่มีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้ามอเมริกาได้พัฒนา SPC และกรรมวิธีการสุ่มตัวอย่าง (Acceptance Sampling) อย่างจริงจัง และใช้ DOE แต่เพียงเล็กน้อย ผลลัพธ์ปรากฏออกมาว่า สหรัฐอเมริกาได้มุ่งไปผิดทางในแง่ของการปรับปรุงผลิตภัณฑ์และกรรมวิธีการผลิต ดังจะเห็นได้อย่างเด่นชัดจากราคาและคุณภาพของสินค้าญี่ปุ่นเปรียบเทียบกับสหรัฐอเมริกา สินค้าญี่ปุ่นนอกจากจะมีราคาค่อนข้างจะถูกกว่าแล้วยังมีคุณภาพสูงกว่าอีกด้วย ปัจจุบันบริษัทในสหรัฐอเมริกาได้หันมายอมรับวิธีการของตากูชีกันมากขึ้น

๑.๓ วิธีการของตากูชิ

วิธีการของตากูชิได้รวมเอาวิธีการและปรัชญาในเรื่องต่างๆ ไว้มากมาย เช่น ฟังก์ชันของการสูญเสียคุณภาพ (Quality Loss Function) Orthogonal Array, Linear Graph, Signal-to-Noise Ratio เป็นต้น ถึงแม้ว่าวิธีการของตากูชิบางอย่างได้ถูกวิจารณ์อย่างมากมายว่าไม่มีพื้นฐานทางสถิติรองรับ แต่ก็สามารถนำไปใช้อย่างได้ผลในทางปฏิบัติมาเป็นเวลานานกว่า ๓๐ ปีมา

แล้ว อย่างไรก็ตาม สหรัฐอเมริกาได้นำวิธีการของคากุชิมาใช้ประมาณ ๑๐ ปีแล้ว แต่ก็ยังคงอยู่ในลักษณะผิวเผิน ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก

๑. วิธีการของคากุชิยังถือว่าใหม่สำหรับบริษัทส่วนใหญ่ในสหรัฐอเมริกา
๒. ยังมีผู้ที่มีความคิดขัดแย้งมากมายทำให้ผู้ที่จะใช้ลังเลและสับสน
๓. ระบบต่าง ๆ ยังไม่มีการปรับตัวเพราะแนวความคิดใหม่บางอย่างยังขัดแย้งต่อระบบเดิมอยู่
๔. ยังมีผู้เสนอความคิดใหม่ที่ดีกว่าวิธีการของคากุชิ รวมทั้งกล่าวถึงวิธีการดั้งเดิมบางวิธีที่ดีกว่า

๑.๔ ความมุ่งหมายของการค้นคว้า

ในบทความทางวิชาการนี้ผู้เขียนได้ศึกษาวิธีการของคากุชิในเรื่อง Orthogonal Array และวิธีการดั้งเดิมชื่อว่า การทดลองแบบอนุกรม (Sequential Experimentation) และ Evolutionary Operation (EVOP) การทดลองแบบอนุกรม คือวิธีการในขั้นการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการออกแบบการทดลองเพื่อคัดเลือกรายการต่าง ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Screening Experiment) ในขณะที่ EVOP คือวิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในขณะที่กำลังอยู่ในสายการผลิต หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การทดลองแบบอนุกรมและ EVOP คือเครื่องมือดั้งเดิมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์นอกและในสายการผลิต (Off-line and On-line) ตามลำดับนั่นเอง เป็นที่ทราบกันแล้วว่า วิธีการดั้งเดิมนั้นมีข้อบกพร่องในเรื่องของข้อจำกัด ความยุ่งยาก เวลาและอื่น ๆ ในขณะเดียวกันวิธีการของคากุชิมีข้อจำกัดลดลงง่ายและรวดเร็ว แต่ขาดหลักการในทางสถิติและความถูกต้องบางประการ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทความต่อไป

๑.๕ วัตถุประสงค์ของการค้นคว้า

สุดท้ายผู้เขียนได้พยายามค้นคว้าเพื่อเสนอวิธีการใหม่ ซึ่งได้ปรับปรุงโดยรวมวิธีการของคากุชิที่ชื่อว่า Orthogonal Array กับ การทดลองแบบอนุกรมเข้าด้วยกัน โดยให้ชื่อว่า “การออกแบบการทดลองทางอุตสาหกรรมแบบอนุกรมของ Orthogonal Array (Sequential Orthogonal Array Experimentation in Industrial Experimental Design) นอกจากนั้นแล้วยังได้เสนอแนวทางในการใช้วิธีการที่เสนอนี้แทนวิธีการดั้งเดิมคือ EVOP ทั้งนี้ก็เพื่อให้วิธีการใหม่นี้ได้ถูกนำมาใช้ทั้งนอกและในสายการผลิตอย่างสมบูรณ์นั่นเอง ถ้าผลการค้นคว้าเป็นไปตามที่มุ่งหวังวิธีการที่เสนอมะมีส่วนช่วยในสายงานทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องการปรับปรุง

คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และกรรมวิธีในการผลิตของกองทัพบกเป็นอย่างดี

๒. ความเป็นมาของการทดลองทางอุตสาหกรรม

ในการทดลองทางอุตสาหกรรมได้ใช้วิธีการหนึ่งปัจจัยต่อครั้ง (One-factor-at-a-time) มาเป็นเวลานาน จนกระทั่งการทดลองแบบแฟคตอเรียล ซึ่งเสนอโดย R.A.Fisher ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพมากกว่า โดยจะไม่ทำให้เกิดการไขว้เขว (Misleading) เมื่อปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง มีผลกระทบซึ่งกันและกัน (Interactions) แต่อย่างไรก็ตามการทดลองทางอุตสาหกรรมมักจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากในครั้งหนึ่ง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการทดลองสูง ประกอบกับ Interactions ในอันดับสูงๆ มักจะไม่มีผล จากคุณลักษณะเฉพาะของงานทดลองทางอุตสาหกรรมนี้ทำให้การทดลองแบบแฟคตอเรียลเต็มส่วน (Full Factorial) มีประสิทธิภาพลดลง โดยส่วนใหญ่แล้วการทดลองแบบแฟคตอเรียลสัดส่วน (Fractional Factorial) จะมีความเหมาะสมมากกว่า แต่ผลที่ตามมาก็คือรูปแบบคลุมเครือ (Alias Pattern) กล่าวคือ จะไม่สามารถหาค่าผลของปัจจัยบางตัว แต่ถ้าใช้การออกแบบชนิดแฟคตอเรียลเต็มส่วนนั้น จะสามารถหาค่าของผลกระทบของปัจจัยทุกตัวรวมทั้ง Interactions ได้ด้วย และถ้าปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีมาก การทดลองแบบแฟคตอเรียลสัดส่วนชนิด ๒ ระดับ (Two-level) ก็จะมีความเหมาะสมยิ่งขึ้นไปอีก แต่ทั้งนี้จะต้องตั้งสมมติฐานว่าผลของปัจจัยต่างๆ นั้นเป็นเชิงเส้น

๒.๑ การทดลองแบบอนุกรม (Sequential Experimentation)

มีผู้กล่าวไว้มากมายว่าการทดลองแบบอนุกรมนั้นจะประหยัดกว่าการทดลองแบบเบ็ดเสร็จ (Comprehensive Experimentation) ทั้งนี้เพราะสาเหตุหลายประการ

๑. ในเบื้องต้นนั้นข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะที่ต้องการนั้น ยังไม่ทราบอย่างแน่ชัด ทำให้จำนวนของปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองมีมาก ถ้าทำการทดลองเบ็ดเสร็จเพียงครั้งเดียว จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก และไม่คุ้มค่ากับผลลัพธ์ที่จะได้ ในขณะที่การทดลองแบบอนุกรมนั้น สามารถที่จะกำจัดปัจจัยที่ไม่มีผลออกไปได้มาก ในขณะที่การทดลองแต่ละครั้งดำเนินไป

๒. สถานการณ์อาจจะเปลี่ยนไปทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทดลองครั้งต่อไป ถ้าเป็นการทดลองแบบเบ็ดเสร็จ ทรัพยากรส่วนใหญ่หรือทั้งหมดอาจจะถูกใช้ไปหมดแล้ว ในขณะที่การทดลองแบบอนุกรมที่ดีจะใช้แต่เพียงส่วนน้อยหรือบางส่วนของทรัพยากรเท่านั้น

๓. ถ้าเกิดมีความผิดพลาดขึ้นจะเนื่องมาจากสาเหตุอะไรก็ตาม ทำให้การ

ทดลองล้มเหลว การออกแบบการทดลองแบบอนุกรมก็ยังสามารถที่จะปรับเปลี่ยนในขั้นต่อไป ทำให้ความเสียหายอันอาจจะเกิดขึ้นบรรเทาเบาบางลงในขณะที่การทดลองแบบเบ็ดเสร็จไม่อาจจะกลับตัวได้ทัน

๔. เมื่อการทดลองดำเนินไปได้พอสมควร ข้อมูลที่ต้องการอาจจะเด่นชัดจนไม่มีความจำเป็นที่จะทำการทดลองต่อไปอีกแล้ว ผู้ทดลองสามารถที่จะตัดสินใจหยุดและประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนที่เหลือได้ในขณะที่การออกแบบการทดลองแบบเบ็ดเสร็จนั้นไม่สามารถจะกระทำได้

๒.๒ ขั้นตอนที่สำคัญในการทดลองแบบอนุกรม

๑. กำหนดคุณลักษณะที่ต้องการและปัจจัยที่คิดว่ามีผล
๒. เลือกแบบการทดลอง
๓. กำหนดปัจจัยในแต่ละหลัก
๔. หาตัวกำเนิด (Generator) ตัวกำหนดความสัมพันธ์ (Defining Relation) และ Confounded Structure
๕. ประเมินผลของปัจจัย
๖. วิเคราะห์ผลลัพธ์
๗. ศึกษาผลลัพธ์และตัดสินใจ (ทดลองต่อไปหรือหยุด)
๘. ถ้าทดลองต่อไปให้เลือกแบบการทดลองขั้นต่อไป
๙. ทำขั้นตอนที่ ๓ ถึง ๕ ซ้ำ
๑๐. นำผลลัพธ์มารวมกัน
๑๑. กลับไปทำข้อ ๗.

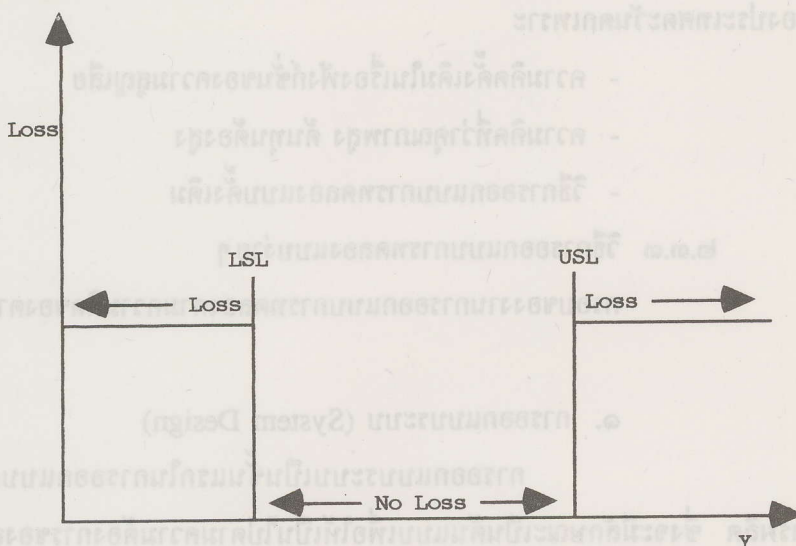
๒.๓ วิธีของตากูชิ (Taguchi Method)

วิธีของตากูชินั้นได้เข้ามาในสหรัฐประมาณ ค.ศ.๑๙๘๐ ในรูปแบบของเครื่องมือสำเร็จรูป ซึ่งประกอบไปด้วยความคิดและปรัชญาต่างๆ ดังต่อไปนี้

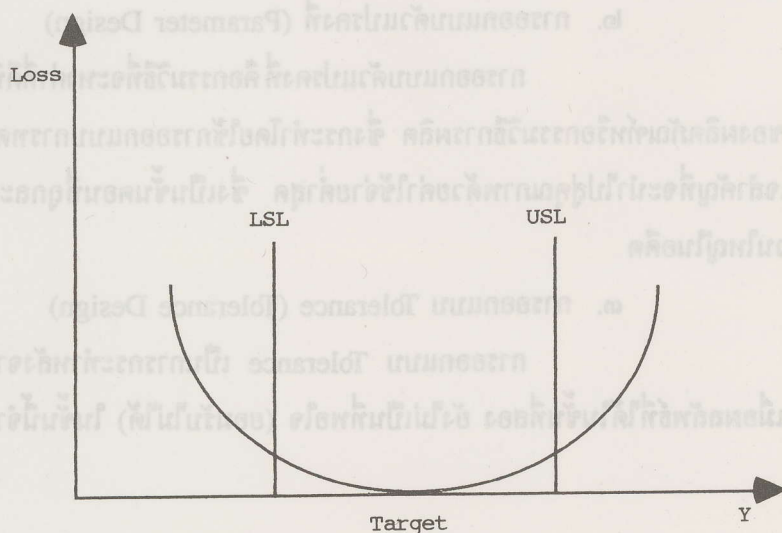
๒.๓.๑ คำจำกัดความใหม่ของคุณภาพ

ตากูชิได้ให้คำจำกัดความใหม่ของคุณภาพของวัตถุว่า “คุณภาพ คือ ความสูญเสียซึ่งเกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ต่อสังคมหลังจากที่ได้ถูกส่งจากโรงงานมากกว่าที่จะเป็นความสูญเสียซึ่งมีสาเหตุมาจากหน้าที่โดยตรงของผลิตภัณฑ์นั้นๆ” ความสูญเสียยังสามารถจะมองได้ในรูปของตัวเงิน เวลา ความไม่พอใจ การสูญเสียตลาด สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เป็นต้น และตากูชิยังมอง ความ

สูญเสียต่างไปจากความคิดดั้งเดิมแบบตะวันตก ดังรูป ๒.๑ (Traditional View) และรูป ๒.๒ (Taguchi View) จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะที่ต้องการของผลิตภัณฑ์ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมาย แม้จะเพียงเล็กน้อยก็ถือว่าเกิดความสูญเสียขึ้นแล้ว ในขณะที่ความคิดดั้งเดิมนั้นมองว่า ถ้าคุณลักษณะที่ต้องการอยู่ในสเปคที่ยอมรับได้นั้นถือว่าไม่เกิดการสูญเสีย นอกไปจากนั้นแล้วจึงจะถือว่ามีความสูญเสียเกิดขึ้น และเกิดขึ้นในทันทีทันใดด้วยซึ่งออกจะขัดกับความเป็นจริงตามธรรมชาติอยู่ไม่น้อย และสิ่งนี้เป็นสาเหตุให้หลายๆ บริษัททางตะวันตกไม่มีการผลักดันให้มีการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือกรรมวิธีในการผลิตเท่าที่ควร



รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2

๒.๓.๒ ควบคุมคุณภาพนอกสายการผลิต (Off-line)

ความคิดในการเน้นคุณภาพตั้งแต่ยังอยู่ในขั้นตอนของการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกรรมวิธีการผลิตนั้นเป็นหนึ่งในหลาย ๆ สิ่ง ซึ่งเป็นผลงานของคาอูซี การเน้นคุณภาพเสียตั้งแต่เริ่มแรกนั้น จะทำให้สบายเมื่อปลายมือ หมายความว่าถ้าเราสามารถทำผลิตภัณฑ์ให้ดีมากเกินกว่าสเปคที่กำหนดไว้ ก็จะทำให้เราไม่ต้องกังวลมากเกี่ยวกับการตรวจสอบ ทำลายทั้งนำกลับไปทำใหม่ เสียค่ารับประกันต่อลูกค้า สูญเสียชื่อเสียงและส่วนแบ่งตลาด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ค่าใช้จ่ายในการออกแบบผลิตภัณฑ์ตามแนวคิดก็จะต้องสมเหตุสมผล ซึ่งสิ่งเหล่านี้ถูกละเลยในบริษัทของประเทศตะวันตกเพราะ

- ความคิดดั้งเดิมในเรื่องฟังก์ชันของความสูญเสีย
- ความคิดที่ว่าคุณภาพสูง ต้นทุนต้องสูง
- วิธีการออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิม

๒.๓.๓ วิธีการออกแบบการทดลองแบบง่าย ๆ

กรอบของงานการออกแบบการทดลองตามความคิดของคาอูซีมีอยู่ด้วยกัน

๓ ขั้น

๑. การออกแบบระบบ (System Design)

การออกแบบระบบเป็นขั้นแรกในการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกรรมวิธีการผลิต ซึ่งจะมีลักษณะเป็นต้นแบบเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของลูกค้าและความสามารถในการผลิต ในการนี้จะต้องใช้ความรู้อย่างกว้างขวางทั้งทางวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ การบริหารและในหลาย ๆ แขนง ผลลัพธ์ของขั้นตอนนี้จะได้เป็นค่าเริ่มต้นของตัวแปรคงที่ของปัจจัยต่าง ๆ

๒. การออกแบบตัวแปรคงที่ (Parameter Design)

การออกแบบตัวแปรคงที่ คือกรรมวิธีที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของตัวแปรคงที่ต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์หรือกรรมวิธีการผลิต ซึ่งกระทำโดยใช้การออกแบบการทดลองในขั้นนี้ถือว่าเป็นกุญแจสำคัญที่จะนำไปสู่คุณภาพด้วยค่าใช้จ่ายต่ำสุด ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ถูกละเลยโดยภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในอดีต

๓. การออกแบบ Tolerance (Tolerance Design)

การออกแบบ Tolerance เป็นการกระทำหลังจากการออกแบบตัวแปรคงที่เมื่อผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นที่สอง ยังไม่เป็นที่พอใจ (ยอมรับไม่ได้) ในขั้นนี้จำเป็นจะต้องบีบ

Tolerance ลงเพื่อให้ยอมรับได้ ซึ่งสามารถจะกระทำได้โดยกำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะที่ต้องการอย่างมาก และมุ่งบิบบที่ปัจจัยเหล่านั้นเพื่อให้ได้คุณลักษณะที่ต้องการ ทั้งนี้ก็โดยการนำความสูญเสียมาเป็นข้อพิจารณาว่าควรจะมีบิบบลงเท่าใด เพื่อให้สมเหตุสมผลระหว่างต้นทุนที่ลงไปกับความสูญเสียที่เกิดขึ้น

๒.๓.๔ พิจารณาค่าคุณลักษณะและความแปรปรวนไปพร้อมกัน

ความคิดนี้นับว่าเป็นข้อเด่นของคาูกุซึกิข้อหนึ่ง การออกแบบการทดลองแบบดั้งเดิมนั้นมักจะเน้นไปที่คุณลักษณะพึงประสงค์เพียงอย่างเดียวโดยละเลยความแปรปรวนซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะในย่านที่กว้างมาก และก่อให้เกิดความสูญเสียต่อลูกค้า คาูกุซึกิได้เสนอวิธีการที่เรียกว่า “Signal-to-noise-Ratio” เพื่อใช้กับแนวความคิดนี้ อย่างไรก็ตาม มีผู้รู้มากมายไม่เห็นด้วย โดยเห็นว่าเป็นวิธีการที่ไม่มีประสิทธิภาพ

๒.๓.๕ การออกแบบคงทน (Robust Design)

การออกแบบคงทน คือแนวความคิดที่จะออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ไม่มีความไวต่อสิ่งรบกวน หรือสิ่งแวดล้อม แทนที่จะไปควบคุมสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงเกินไป หรือบางทีก็ไม่สามารถจะควบคุมได้เลย คาูกุซึกิเน้นการใช้การออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าที่ต้องการของแต่ละปัจจัย ซึ่งสามารถจะควบคุมได้ โดยให้ชดเชยกับผลของปัจจัยซึ่งไม่สามารถ จะควบคุมได้ (Noise)

เนื่องจากวิธีการของคาูกุซึกิได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางขึ้นทำให้มีบทความมากมายถูกตีพิมพ์ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งจะค้นคว้าได้ตามรายการเอกสารอ้างอิงท้ายบทความนี้

๓. ปัญหาที่เผชิญหน้า

จะเห็นได้ว่าวิธีการต่าง ๆ ทั้งแบบดั้งเดิมและที่เสนอขึ้นมาใหม่ต่างมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังจะได้ชี้ให้เห็นต่อไปนี้

๑. แฟคตอเรียลสัดสวนสามารถจะกระทำเป็นอนุกรมได้ แต่ไม่มีใครจะเป็นที่นิยม

ทั้งนี้เพราะยุ่งยาก และไม่มีเครื่องมือช่วยที่เพียงพอ ผู้ออกแบบทดลองต้องออกแบบเอง

๒. วิธีของคาูกุซึกิ โดยเฉพาะ Orthogonal Array นั้นเยี่ยมยอดในแง่ของความง่าย

มีคู่มือประกอบที่จะช่วยให้ผู้ทดลองไม่ต้องใช้เวลาฝึกหัดมากนักก็สามารถจะใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าไม่ระวังอาจจะก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ในบางครั้ง เนื่องจากได้ละเลยหลักการทางสถิติบางเรื่อง

๓. EVOP สามารถจะใช้ปรับปรุงกรรมวิธีการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยค่าใช้จ่ายต่ำมาก แต่ก็มีข้อจำกัดคือใช้เวลานาน เนื่องจากไม่สามารถจะรวมปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้ในคราวเดียวกัน

๓.๑ แรงจูงใจที่ทำการค้นคว้าในเรื่องนี้

เนื่องจากปัญหาเฉพาะหน้าที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะเสนอวิธีการที่ง่ายไม่ซับซ้อน มีเครื่องมือที่จะช่วยเหลือผู้ทำการทดลองอย่างเพียงพอ ไม่จำกัดผู้ทดลองมากเกินไป และเปิดโอกาสให้ผู้ทดลองตัดสินใจได้อย่างไม่ไขว่เขว ผู้เขียนจึงขอเสนอวิธีการที่เรียกว่าการออกแบบการทดลองชนิดอนุกรมของ Orthogonal Array ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการรวมเอาข้อดีของวิธีดั้งเดิมและวิธีการสมัยใหม่มาไว้ด้วยกัน โดยให้ผู้ทดลองเป็นผู้ตัดสินใจว่าจะเน้นหนักไปทางด้านใด แต่เดิมนั้นผู้ทดลองมีทางเลือกเพียงแค่ ๒ ทาง ซึ่งผู้เขียนเรียกว่าเป็นวิธีการสุดโต่ง นั่นคือการทำทดลองเพียงครั้งเดียวที่เรียกว่า Comprehensive Experiment ซึ่งไม่ว่าจะเป็นวิธีการของตาคุชิ หรือวิธีการดั้งเดิม คือการออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียลสัดส่วนที่มี Resolution V ก็ตามล้วนแต่จำกัดหนทางปฏิบัติของผู้ทดลองทั้งสิ้น วิธีการที่เสนอนี้จึงเป็นวิธีการแบบกลางๆ ซึ่งสามารถจะมีรูปแบบที่อยู่ระหว่างวิธีการสุดโต่งทั้งสองนั้น

นอกจากนั้นแล้ว ถ้าวิธีการที่เสนอนี้มีประสิทธิภาพจริงก็จะสามารถนำมาดัดแปลงปรับปรุงเพื่อใช้ในโรงงานที่กำลังปฏิบัติการผลิตอยู่ (On-line Quality Engineering) ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้วิธีการที่เรียกว่า EVOP เป็นที่คาดหวังว่าวิธีการที่เสนอนี้จะสามารถอุดช่องว่างระหว่างวิธีการสุดโต่งทั้งสองได้ รวมทั้งจะสามารถช่วยให้ผู้ทดลองออกแบบการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว แม่นยำ และง่าย กับทั้งจะสามารถนำไปใช้ได้หลายแขนงที่มีความคล้ายคลึงกันในเรื่องการออกแบบการทดลองอีกด้วย

๔. วิธีการออกแบบการทดลองแบบอนุกรมของ Orthogonal Array

๔.๑ ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

๑. ค้นหาและกำหนดคุณลักษณะและปัจจัย (Identify the Response and the Factors)

โดยทั่วไป คุณลักษณะหนึ่ง ๆ ของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง บางปัจจัยก็ง่ายที่จะควบคุม บางปัจจัยก็ไม่ง่าย หรือไม่สมารถที่จะควบคุมได้เลย เราจึงแบ่งปัจจัย

ต่าง ๆ ออกเป็น ๓ แบบ ดังนี้ คือ

- ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable)
- ปัจจัยที่ควบคุมยาก (Noise)
- ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable)

เนื่องจากว่าปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมยากนั้น ไม่สามารถจะแบ่งออกจากกันได้ อย่างเด่นชัด จึงจำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ทำการทดลองมาประกอบ ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ อาจจะเป็นได้ทั้งควบคุมได้และควบคุมยาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานการณ์ ถ้าเป็นอุณหภูมิของวัสดุ ก็อาจจะเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ แต่ถ้าเป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ก็อาจควบคุมได้ยาก เป็นต้น

๒. ค้นหาและกำหนดย่านของปัจจัย (Identify the Ranges of the Factors)

หลักจากที่ปัจจัยต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองได้ถูกกำหนดแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการกำหนดย่านของปัจจัยแต่ละตัวว่าจะมีความแตกต่างเท่าไร ทั้งนี้ก็เพื่อจะได้ทำการทดลองวัดผล และวิเคราะห์ต่อไป ข้อที่ยากก็คือไม่มีกฎตายตัวในการนี้ ย่านที่กำหนดขึ้นควรจะถูกกว้างเพียงพอที่จะก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่เด่นชัดแยกแยะออกมาได้จากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง และก็ควรจะแคบเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดผลที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) ของผลลัพธ์

๓. เลือกแบบของการทดลอง (Choose the Design)

โดยทั่ว ๆ ไปไม่ว่าจะเป็น Factorial Orthogonal Array ชนิดใดก็ใช้กับการทดลองแบบอนุกรมได้ แต่ในที่นี้จะใช้ Orthogonal Array ซึ่งเสนอโดยคาจิกิ ทั้งนี้เพราะ มีเหตุผลหลายประการ คือ

ก) การจัดนั้นเหมาะสมต่อการศึกษาผลของ Interactions ถ้าเราสามารถกำหนดสมมติฐานเกี่ยวกับปัจจัยหลักและรองได้ กล่าวคือ

๑. ปัจจัยหลัก (Major Factors) คือ ปัจจัยที่สำคัญและคาดหวังว่าจะมีนัยสำคัญของผลลัพธ์ต่อคุณลักษณะพึงประสงค์ ดังนั้น Two-way Interactions ระหว่างปัจจัยหลักด้วยกัน ก็มีความเป็นไปได้ที่จะมีนัยสำคัญด้วย

๒. ปัจจัยรอง (Minor Factors) นั้น สำคัญน้อยกว่าปัจจัยหลัก ดังนั้น เราจึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาเฉพาะ Main Effect ของปัจจัยรองอย่างเดียว โดยถือว่า Interactions ไม่ว่าจะระหว่างปัจจัยรองด้วยกันเองหรือกับปัจจัยหลักนั้นไม่มีนัยสำคัญ

ข) การออกแบบนั้นได้จัดกลุ่มในลักษณะที่กลุ่มแรกจะมีการเปลี่ยน

แปลงของระดับของปัจจัยสูงสุด และลดลงตามลำดับจนถึงกลุ่มสุดท้าย ทั้งนี้ก็เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ทดลอง โดยจะสามารถจัดสรรปัจจัยต่างๆ ได้เหมาะสมตามความยากง่ายของการเปลี่ยนระดับ ซึ่งจะไม่เท่ากันในแต่ละปัจจัย นอกจากนั้นแล้วควรที่จะเลือกแบบของการทดลองที่เล็กที่สุด ที่สามารถจะใช้ศึกษาปัจจัยทุกตัวได้ และควรจะเป็นแบบสองระดับ ทั้งนี้ก็เพื่อจะได้ศึกษา Interactions ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

๔. กำหนดมอบปัจจัย (Assign the Factors)

เพื่อให้การออกแบบเป็นไปอย่างอัตโนมัติ ผู้เขียนได้จัดทำตารางที่เรียกว่า Scenario Table หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถจะช่วยผู้ทดลองในการนี้ ทั้งนี้หลังจากที่ผู้ทดลองได้กำหนดปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแล้วว่าตัวใดเป็นปัจจัยหลักและรอง ก็สามารถจะออกแบบการทดลองในรอบที่ ๑ ขั้นที่ ๑ ได้โดยอัตโนมัติ โดยดูจากตารางหรือใช้โปรแกรมหาคำว่า ซึ่งจะได้แสดงตัวอย่างของการทดลองในบทต่อไป

๕. ปฏิบัติการทดลอง (Experimentation)

ในการทำการทดลองนั้นต้องการผลลัพธ์ซึ่งสามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งถ้าวิเคราะห์แล้วยังคลุมเครือสรุปไม่ได้ ก็จะต้องมีการทดลองต่อไปจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่มีความหมาย ขั้นตอนของการปฏิบัติการทดลอง และขั้นตอนของการวิเคราะห์ข้อมูลจะทำสลับกันไปจนกว่าการทดลองจะสิ้นสุด

๖. การวิเคราะห์ข้อมูล (Analysis)

การวิเคราะห์ข้อมูลกระทำได้หลายลักษณะ และหลายระดับด้วยกัน กล่าวคือ

ก) แบ่งแยกตามลักษณะได้เป็น ๒ ลักษณะ คือ

๑. การทดลองที่มีแต่ปัจจัยที่ควบคุมได้เพียงอย่างเดียว

๒. การทดลองที่มีปัจจัยรบกวน (Noise) มาเกี่ยวข้องด้วย

ข) แบ่งแยกตามระดับได้เป็น ๒ ระดับ คือ

๑. ความถูกต้องแม่นยำสูง

๒. ความถูกต้องแม่นยำพอสมควร แต่ต้องการความรวดเร็ว

ในแต่ละสถานการณ์ก็จะต้องใช้การวิเคราะห์ที่เหมาะสม ซึ่งผู้ทดลองต้องพิจารณาให้ถี่ถ้วน และรายละเอียดนั้นจะสามารถค้นคว้าเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงท้ายบทความนี้เช่นเดียวกัน

๗. สรุปผลของการทดลองและเสนอระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

เมื่อได้ระดับที่เหมาะสมที่สุดแล้วนั้น ผู้ทดลองจะสามารถประมาณค่าของ คุณลักษณะที่ต้องการได้ว่าจะมีค่าประมาณเท่าใด รวมทั้งอาจจะทำการทดลองเพื่อยืนยันอีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้เพราะระดับต่าง ๆ ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดจากการวิเคราะห์ข้อมูลนั้น อาจไม่เคยผ่านการทดลองมาก่อนเลยก็ได้ ส่วนผลของการทดลองเพื่อยืนยันน่าจะทำให้ผลใกล้เคียงกับการประมาณการ เกี่ยวกับคุณลักษณะ แต่ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นแสดงว่ามีการไขว้เขวเกิดขึ้น ซึ่งก็จะต้องมีการทดลองต่อไป โดยจะต้องวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยร่วมใดบ้างที่ถูกกลบเลย แต่สงสัยว่าจะมีนัยสำคัญ

๕. การทดลองแบบอนุกรมของ Orthogonal Array ในการปรับปรุงกรรมวิธีการผลิต

ดังได้กล่าวแล้วว่าเครื่องมือในการปรับปรุงกรรมวิธีในการผลิตแบบดั้งเดิม คือ EVOP ก่อนข้างจะช้าและเสียเวลามาก ส่วนการทดลองแบบอนุกรมของ Orthogonal Array นั้นจะสามารถหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ในกรรมวิธีการผลิตได้รวดเร็วกว่าวิธีการดั้งเดิม ในบทนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการทดลองแบบอนุกรมของ Orthogonal Array ในการปรับปรุงกรรมวิธีการผลิต ทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติต่อไป

๕.๑ ขั้นตอนทั่วไป

๑. กำหนดคุณลักษณะและปัจจัย

ขั้นตอนนี้ก็คล้ายคลึงกับขั้นตอนเดียวกันในบทที่แล้ว เพียงแต่เราอาจจะมี ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยมากกว่าเท่านั้น ในกรรมวิธีการผลิตที่กำลังดำเนินอยู่ในโรงงานนั้น น่าจะได้มีการทดลองในเบื้องต้นหรือการทดลองในห้องทดลองมาแล้วก่อนที่จะมีการผลิตจริงในโรงงาน ดังนั้น ปัจจัยสำคัญรวมทั้งผลของปัจจัยที่มีต่อคุณลักษณะต่าง ๆ ก็น่าจะได้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลไว้แล้ว เพียงแต่ว่าในขณะที่เพิ่มอัตราการผลิตจากห้องทดลองมาเป็นการผลิตจริงในโรงงานนั้น อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับต่าง ๆ ของปัจจัยต่อจุดเหมาะสมขึ้นได้ หรืออาจจะมีการเปลี่ยนแปลงในการใช้ปัจจัยบางตัวในภายหลัง ซึ่งก็จะมีผลทำให้จุดเหมาะสมเปลี่ยนไปเช่นเดียวกัน ผู้ทดลองควรจะทราบว่า การทดลองในขั้นนี้เป็น การทดลองเพื่อปรับระดับของปัจจัยต่าง ๆ ให้เข้าสู่จุดเหมาะสม

๒. กำหนดย่านของปัจจัย

เพื่อให้ผลผลิตสามารถที่นำไปใช้ได้ ย่านของปัจจัยควรจะแคบเพียงพอ ในขณะที่เดียวกันก็จะต้องให้กว้างเพียงพอที่จะทำให้ผลของแต่ละปัจจัยต่อคุณลักษณะที่ต้องการมี

ขนาดที่สามารถจะแยกแยะออกจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง (Error) ได้ ดังนั้น ความรู้เกี่ยวกับผลของปัจจัยต่อคุณลักษณะที่ต้องการควรจะถูกนำมาใช้เพื่อการนี้ โดยในขั้นต้นควรจะกำหนดย่านของแต่ละปัจจัยให้สามารถก่อให้เกิดผลต่อคุณลักษณะที่ต้องการประมาณเท่า ๆ กับความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง และเมื่อมีการทดลองซ้ำ ๆ หลายครั้ง ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองก็จะมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งปัจจัยสำคัญจะถูกค้นพบ หรือถ้าไม่เป็นเช่นนั้น ย่านของปัจจัยก็ควรจะถูกกำหนดใหม่ให้กว้างขึ้นกว่าเดิม สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่ผู้ทดลองจะต้องตระหนัก คือ ถ้าการทดลองใดมีตัวแปรหรือปัจจัยมาก ผลของปัจจัยหรือปัจจัยรวมอาจทำให้คุณลักษณะที่ต้องการเปลี่ยนไปอย่างมาก ซึ่งจะส่งผลให้ผลผลิตเสียหายได้ ถ้าเป็นดังนี้ผู้ทดลองควรจะเริ่มจากย่านของปัจจัยที่แคบมาก ๆ

๓. เลือกแบบของการทดลอง

๔. กำหนดขอบปัจจัย

ขั้นตอนที่ ๓ และ ๔ คงเหมือนกันกับขั้นตอนที่ ๓ และ ๔ ในบทที่แล้ว

๕. ปฏิบัติรอบของการทดลอง (Cycle)

รอบแรกคือทำการทดลอง ซึ่งได้เลือกไว้แล้วในขั้นตอนที่ ๓ และ ๔ เราจะได้ค่าคุณลักษณะที่ต้องการสำหรับแต่ละ Combination ของระดับปัจจัยต่าง ๆ รวมทั้งผลของแต่ละหลัก (ปัจจัย) จะถูกประมาณค่า หลังจากนั้นเราจำเป็นต้องทำการทดลองในรอบที่สอง เพื่อจะได้ประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและเพื่อให้การทดสอบความมีนัยสำคัญของแต่ละผลของปัจจัยที่มีต่อคุณลักษณะที่ต้องการจะสามารถกระทำได้ ถ้ายังไม่สามารถหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญได้ ก็จำเป็นที่จะต้องทำการทดลองในรอบต่อไป และถ้าเมื่อได้ทำการทดลองไปจนกระทั่งมีรอบพอสมควรแล้ว ยังไม่สามารถหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญได้ ก็แสดงว่าย่านของแต่ละปัจจัยนั้นแคบเกินไป จำเป็นต้องเพิ่มให้กว้างขึ้น

๖. ปฏิบัติขั้นของการทดลอง (Stage)

การทดลองเป็นรอบที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดนั้นจัดอยู่ในขั้นที่ ๑ ถ้าผลของการทดลองยังคลุมเครือ (Alias) เราจำเป็นต้องทำการทดลองในขั้นต่อไป เพื่อให้ผลของการทดลองชัดเจน และเมื่อผลของการทดลองที่มีความหมายสามารถถูกค้นพบแล้ว การทดลองขั้นต่อไปก็หมดความจำเป็น

๗. ปฏิบัติเฟสของการทดลอง (Phase)

หลังจากที่รอบของการทดลองและขั้นของการทดลองได้เสร็จสิ้นแล้วนั้น

ค่าระดับที่ดีที่สุดของปัจจัยใหม่จะถูกกำหนดและใช้ต่อไป ถ้ายังคงเชื่อมั่นว่ากรรมวิธีการผลิตที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ปัจจุบันยังไม่ดีที่สุด เฟสของการทดลองก็จะเริ่มขึ้นซึ่งก็คืออนุกรมของรอบและขั้นของการทดลองนั่นเอง จนกระทั่งผลของการปรับปรุงนั้นไม่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้

๘. วิเคราะห์ข้อมูล

ผลของแต่ละปัจจัยที่ประมาณได้ในแต่ละหลักสามารถคำนวณได้ง่ายๆ โดยคูณค่าคุณลักษณะที่ต้องการด้วยเครื่องหมายในแต่ละหลัก (1 = เครื่องหมายลบ, 2 = เครื่องหมายบวก) และหารด้วยครึ่งหนึ่งของจำนวน (Runs) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) สามารถประมาณได้จากย่านของผลลัพธ์ ซึ่งพิสูจน์โดย Box, Hunter และ Hunter, 1969

ส่วนสูตรตามปกติซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) มีดังนี้

$$SS = \frac{(\text{Contrast})^2}{(M * (\text{Contrast Coefficients})^2)}$$

$$\text{และ } SSe = SST - SS_{\text{subtotal}}$$

ตัวอย่าง สมมติว่าผู้ทดลองวางแผนที่จะศึกษาปัจจัย ๔ ชนิด (A, B, C และ D) ชนิดละ ๒ ระดับ เพื่อปรับปรุงกรรมวิธีการผลิต ผลของปัจจัยที่สนใจประกอบไปด้วย ๔ ปัจจัยกับอีก ๖ two-way interactions รวมเป็น ๑๐ เราสามารถออกแบบการทดลองได้หลายชนิด แต่หนึ่งในจำนวนนั้นสามารถทำได้ ดังตาราง ๕.๑

ตาราง 5.1 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองในขั้นที่ 1

1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1
1	1	2	2	1	2	2
1	2	1	2	2	1	2
1	2	2	1	2	2	1
2	2	2	2	1	1	1
2	2	1	1	1	2	2
2	1	2	1	2	1	2
2	1	1	2	2	2	1
A	B	C	D	AB	AC	AD
				CD	BD	BC

สมมติว่าได้ทำการทดลองตามการออกแบบข้างบนแล้วได้ผลลัพธ์ดังตารางข้างล่าง ซึ่งทำการทดลองทั้งสิ้น 3 รอบ

ตาราง 5.2 ตัวอย่างการทดลองและผลลัพธ์ (รอบที่ 1, ชั้นที่ 1)

การคำนวณค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะ								
สภาพการปฏิบัติ	1	2	3	4	5	6	7	8
1. ค่ารวมรอบที่แล้ว	-	-	-	-	-	-	-	-
2. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว	-	-	-	-	-	-	-	-
3. ค่าใหม่ของคุณลักษณะ	63	62	64	67	60	65	61	68
4. ค่าแตกต่าง	-	-	-	-	-	-	-	-
5. ค่ารวมใหม่	63	62	64	67	60	65	61	68
6. ค่าเฉลี่ยใหม่ของคุณลักษณะ	63	62	64	67	60	65	61	68
การคำนวณค่าเฉลี่ยผลลัพธ์								
7. $(A)_1$	=	-0.5			11. $(AB + CD)_1$	=		2.5
8. $(B)_1$	=	0.5			12. $(AC + BD)_1$	=		3.5
9. $(C)_1$	=	-2.5			13. $(AD + BC)_1$	=		-1.5
10. $(D)_1$	=	-0.5						
การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) และ 2 S.E. limit								
14. ค่ารวมรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	-						
15. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	-						
16. ค่าใหม่ $(S)_1$	=	อ่าน $x(f_{1,1})$	=	-				
17. ค่ารวมใหม่ $(S)_1$	=	-						
18. ค่าเฉลี่ยใหม่ $(S)_1$	=	$(\text{New Sum } (S)_1) / (n - 1)$	=	-				
19. 2 S.E. Limit	=	$(S)_1 / (\sqrt{2n})$						

ตาราง 5.3 ตัวอย่างการทดลองและผลลัพธ์ (รอบที่ 2, ชั้นที่ 1)

การคำนวณค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะ								
สภาพการปฏิบัติ	1	2	3	4	5	6	7	8
1. ค่ารวมรอบที่แล้ว	63	62	64	67	60	65	61	68
2. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว	63	62	64	67	60	65	61	68
3. ค่าใหม่ของคุณลักษณะ	62	65	66	68	61	67	63	66
4. ค่าแตกต่าง	1	-3	-2	-1	-1	-2	-2	2
5. ค่ารวมใหม่	125	127	130	135	121	132	124	134
6. ค่าเฉลี่ยใหม่ของคุณลักษณะ	62.5	63.5	65.0	67.5	60.5	66.0	62.0	67.0
การคำนวณค่าเฉลี่ยผลลัพธ์								
7. $(A)_1$	=	-0.75			11. $(AB + CD)_1$	=		2.25
8. $(B)_1$	=	1			12. $(AC + BD)_1$	=		3.5
9. $(C)_1$	=	-1.75			13. $(AD + BC)_1$	=		-0.25
10. $(D)_1$	=	-0.25						
การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) และ 2 S.E. limit								
14. ค่ารวมรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	-						
15. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	-						
16. ค่าใหม่ $(S)_1$	=	อ่าน $x(f_{1,1})$	=	$(S) \times (.25) = 1.25$				
17. ค่ารวมใหม่ $(S)_1$	=	1.25						
18. ค่าเฉลี่ยใหม่ $(S)_1$	=	ค่ารวมใหม่ $(S)_1 / 2(2-1)$	=	1.25				
19. 2 S.E. Limit	=	$2(S)_1 / (\sqrt{2 \times 2})$	=	1.25				

ตาราง 5.4 ตัวอย่างการทดลองและผลลัพธ์ (รอบที่ 3, ขั้นที่ 1)

การคำนวณค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะ								
สภาพการปฏิบัติ	1	2	3	4	5	6	7	8
1. ค่ารวมรอบที่แล้ว	125	127	130	135	121	132	124	134
2. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว	62.5	63.5	65.0	67.5	60.5	66.0	62.0	67.0
3. ค่าใหม่ของคุณลักษณะ	64	64	65	67	62	66	62	67
4. ค่าแตกต่าง	-1.5	-0.5	0	0.5	-1.5	0	0	0
5. ค่ารวมใหม่	189	191	195	202	183	198	186	201
6. ค่าเฉลี่ยใหม่ของคุณลักษณะ	63.0	63.7	65.0	67.3	61.0	66.0	62.0	67.0
การคำนวณค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์								
7. $(A)_1$	=	-0.75						1.9
8. $(B)_1$	=	0.9						3.25
9. $(C)_1$	=	-1.75						-0.4
10. $(D)_1$	=	-0.4						
11. $(AB + CD)_1$	=							
12. $(AC + BD)_1$	=							
13. $(AD + BC)_1$	=							
การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) และ 2 S.E. limit								
14. ค่ารวมรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	125						
15. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	125						
16. ค่าใหม่ $(S)_1$	=	ค่า $x(f_{k,3}) = (2) \times (0.29) = 0.58$						
17. ค่ารวมใหม่ $(S)_1$	=	1.83						
18. ค่าเฉลี่ยใหม่ $(S)_1$	=	$(\text{New Sum } (S)_1) / (3 - 1) = 0.75$						
19. 2 S.E. Limit	=	$2(S)_1 / (\sqrt{(2 \times 3)}) = 0.75$						

ผลลัพธ์ของรอบที่สามของการทดลองขั้นที่ 1 บ่งชี้ว่าปัจจัย B, C, AB + CD และ AB + BD นั้นมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม AB และ AC นั้นให้ผลร่วมกับ CD และ BD ตามลำดับ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้อย่างเด่นชัดว่าควรจะใช้ระดับใดในแต่ละปัจจัย ทำให้ต้องทำการทดลองในขั้นที่สอง ซึ่งอาจจะเป็นดังตารางข้างล่างนี้

ตาราง 5.5 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองในขั้นที่สอง

	1	2	3	4	5	6	7
1							
2	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	1	2	2
2	2	1	2	2	2	1	2
2	2	2	1	2	2	2	1
1	2	2	2	2	1	1	1
1	2	1	1	1	1	2	2
1	1	2	1	2	2	1	2
1	1	1	1	2	2	2	1
-A	B	C	D	-AB	-AC	AD	
				CD	BD	BC	

หลังจากทำการทดลองในรอบที่ 1, 2 และ 3 ของขั้นที่สองแล้วจะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3 ข้างล่างนี้

ตาราง 5.6 ตัวอย่างการทดลองและผลลัพธ์ (รอบที่ 1, ขั้นที่ 2)

การคำนวณค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะ								
สภาพการปฏิบัติ	1	2	3	4	5	6	7	8
1. ค่ารวมรอบที่แล้ว	-	-	-	-	-	-	-	-
2. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว	-	-	-	-	-	-	-	-
3. ค่าใหม่ของคุณลักษณะ	61	63	65	66	62	64	60	67
4. ค่าแตกต่าง	-	-	-	-	-	-	-	-0.5
5. ค่ารวมใหม่	61	63	65	66	62	64	60	67
6. ค่าเฉลี่ยใหม่ของคุณลักษณะ	61	63	65	66	62	64	60	67
การคำนวณค่าเฉลี่ยผลลัพธ์								
7. $(A)_1$	=	0.5						
8. $(B)_1$	=	1.5						
9. $(C)_1$	=	-1.5						
10. $(D)_1$	=	1.5						
11. $(AB + CD)_1$	=	2.0						
12. $(AC + BD)_1$	=	3.0						
13. $(AD + BC)_1$	=	-1.0						
การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) และ 2 S.E. limit								
14. ค่ารวมรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	-						
15. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	-						
16. ค่าใหม่ $(S)_1$	=	อ่าน $x(f_{s,1})$						
17. ค่ารวมใหม่ $(S)_1$	=	-						
18. ค่าเฉลี่ยใหม่ $(S)_1$	=	$(\text{New Sum } (S)_1) / (n - 1)$						
19. 2 S.E. Limit	=	$2(S)_1 / \sqrt{2n}$						

ตาราง 5.7 ตัวอย่างการทดลองและผลลัพธ์ (รอบที่ 2, ขั้นที่ 2)

การคำนวณค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะ								
สภาพการปฏิบัติ	1	2	3	4	5	6	7	8
1. ค่ารวมรอบที่แล้ว	61	63	65	66	62	64	60	67
2. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว	61	63	65	66	62	64	60	67
3. ค่าใหม่ของคุณลักษณะ	62	64	66	68	61	67	63	66
4. ค่าแตกต่าง	-1	-1	-1	-2	1	-3	-3	1
5. ค่ารวมใหม่	123	127	131	134	123	131	123	133
6. ค่าเฉลี่ยใหม่ของคุณลักษณะ	61.5	63.5	65.5	67.0	61.5	65.5	61.5	66.5
การคำนวณค่าเฉลี่ยผลลัพธ์								
7. $(A)_1$	=	-0.63						
8. $(B)_1$	=	1.63						
9. $(C)_1$	=	-1.38						
10. $(D)_1$	=	-0.38						
11. $(AB + CD)_1$	=	2.13						
12. $(AC + BD)_1$	=	3.13						
13. $(AD + BC)_1$	=	-0.13						
การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) และ 2 S.E. limit								
14. ค่ารวมรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	-						
15. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	-						
16. ค่าใหม่ $(S)_1$	=	อ่าน $x(f_{s,1})$						
17. ค่ารวมใหม่ $(S)_1$	=	1.0						
18. ค่าเฉลี่ยใหม่ $(S)_1$	=	$(\text{New Sum } (S)_1) / (2-1)$						
19. 2 S.E. Limit	=	$2(S)_1 / \sqrt{2 \times 2}$						

ตาราง 5.8 ตัวอย่างการทดลองและผลลัพธ์ (รอบที่ 3, ชั้นที่ 2)

สภาพการปฏิบัติ	การคำนวณค่าเฉลี่ยของคุณลักษณะ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. ค่ารวมรอบที่แล้ว	123	127	131	134	123	131	123	133
2. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว	61.5	63.5	65.5	67.0	61.5	65.5	61.5	66.5
3. ค่าใหม่ของคุณลักษณะ	63	64	65	68	62	66	62	67
4. ค่าแตกต่าง	-1.5	-0.5	0.5	-1.0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
5. ค่ารวมใหม่	186	191	196	202	185	197	185	200
6. ค่าเฉลี่ยใหม่ของคุณลักษณะ	62.0	63.7	65.3	67.3	61.7	65.7	61.7	66.7

การคำนวณค่าเฉลี่ยผลลัพธ์

7. $(A)_1$	=	0.63	11. $(AB + CD)_1$	=	1.98
8. $(B)_1$	=	1.48	12. $(AC + BD)_1$	=	3.18
9. $(C)_1$	=	-1.33	13. $(AD + BC)_1$	=	-0.33
10. $(D)_1$	=	0.18			

การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S) และ 2 S.E. limit

14. ค่ารวมรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	1.0
15. ค่าเฉลี่ยรอบที่แล้ว $(S)_0$	=	1.0
16. ค่าใหม่ $(S)_1$	=	อ่าน $x(f_{1,3}) = (2)x(.29) = 0.58$
17. ค่ารวมใหม่ $(S)_1$	=	1.58
18. ค่าเฉลี่ยใหม่ $(S)_1$	=	$(\text{New Sum } (S)_1 / (3 - 1)) = 0.79$
19. 2 S.E. Limit	=	$2(S)_1 / (\sqrt{2 \times 3}) = 0.65$

เพื่อให้ผลลัพธ์มีความหมายและนำไปใช้ได้ ผลของการทดลองทั้งสองชั้น จะต้องนำมารวมกันดังตารางข้างล่าง

ตารางที่ 5.9 ตารางเพิ่มเติมเพื่อคำนวณผลลัพธ์รวม

การคำนวณค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์

1. $A = ((A)_1 + (A)_2) / 2$	=	$((-.75) + (.63)) / 2$	=	-0.06
2. $B = ((B)_1 + (B)_2) / 2$	=	$((.9) + (1.48)) / 2$	=	1.19
3. $C = ((C)_1 + (C)_2) / 2$	=	$((-1.75) + (-1.38)) / 2$	=	-1.57
4. $D = ((D)_1 + (D)_2) / 2$	=	$((-.4) + (.18)) / 2$	=	-0.11
5. $AB = ((AB+CD)_1 - (-AB+CD)_2) / 2$	=	$((1.9) - (1.98)) / 2$	=	-0.04
6. $CD = ((AC+BD)_1 + (-AB+CD)_2) / 2$	=	$((1.9) + (1.98)) / 2$	=	1.94
7. $AC = ((AC+BD)_1 - (-AC+BD)_2) / 2$	=	$((3.25) - (3.18)) / 2$	=	0.04
8. $BD = ((AC+BD)_1 + (-AC+BD)_2) / 2$	=	$((3.25) + (3.18)) / 2$	=	3.22
9. $AD = ((AD+BC)_1 - (-AD+BC)_2) / 2$	=	$((-.4) - (-.33)) / 2$	=	-0.04
10. $BC = ((AD+BC)_1 + (-AD+BC)_2) / 2$	=	$((-.4) + (-.33)) / 2$	=	-0.37

การคำนวณค่าของ 2 S.E. Limit

11. 2 S.E. = $((2 \text{ S.E.})_1 + (2 \text{ S.E.})_2) / 2$	=	$((.75) + (.65)) / 2$	=	0.70
--	---	-----------------------	---	------

ผลลัพธ์สุดท้ายระบุว่าปัจจัย B, C, CD และ BD มีนัยสำคัญและเพื่อหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยหลัก จำเป็นต้องศึกษาจากตารางของ Interaction ข้างล่างนี้

ตาราง 5.10

ตาราง Interaction ของ BD

ปัจจัย B	ปัจจัย D	ค่าเฉลี่ย
1	1	64.18
1	2	66.00
2	1	64.58
2	2	62.53

D

ปัจจัย B	ปัจจัย D	ค่าเฉลี่ย
1	1	64.18
1	2	66.00
2	1	64.58
2	2	62.53

C

ตาราง 5.11

ตาราง Interaction ของ BD

ปัจจัย B	ปัจจัย D	ค่าเฉลี่ย
1	1	62.18
1	2	65.28
2	1	66.58
2	2	63.25

D

ปัจจัย B	ปัจจัย D	ค่าเฉลี่ย
1	1	62.18
1	2	65.28
2	1	66.58
2	2	63.25

B

สมมุติว่าคุณลักษณะที่ต้องการนี้เป็นผลผลิต เราจึงต้องการให้มีค่าสูงสุด และจากการวิเคราะห์ตารางทั้งสอง สรุปได้ว่าควรจะกำหนดปัจจัย B ที่ระดับสูง C และ D ที่ระดับต่ำ ส่วนปัจจัย A ที่ระดับใดก็ได้

๕.๒ เปรียบเทียบวิธีการดั้งเดิมกับวิธีการเสนอใหม่

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า วิธีการดั้งเดิมนั้นใช้ 2^2 หรือ 2^3 แฟคตอเรียล ในขณะที่วิธีการที่เสนอใหม่นี้ใช้อนุกรมของ Orthogonal Array ซึ่งเราสามารถคำนวณจำนวนของการทดลองทั้งสิ้นเพื่อเปรียบเทียบกันได้ดังนี้

สมมุติว่ามี ๖ ปัจจัยที่จะต้องศึกษา ถ้า Interactions อันดับที่ ๓ สามารถคัดทิ้งได้ (ถือว่าไม่มีนัยสำคัญ ก็จะคงเหลือ ๖ ปัจจัยหลัก บวกกับ ๑๕ Interactions อันดับที่สองรวมเป็น ๒๑) เพื่อที่จะศึกษา ๑๕ Interactions นั้น ถ้าเป็นวิธีการที่เสนอใหม่นี้จะต้องการการทดลองเพียง ๓๒ Runs ในขณะที่ถ้าใช้ 2^2 แฟคตอเรียลจะต้องใช้ถึง ๖๐ Runs (๔ Runs ต่อ ๑ Interaction) ส่วน 2^3 แฟคตอเรียลจะต้องใช้ถึง ๔๐ Runs (๔ Runs ต่อ ๓ Interactions) จะเห็นได้ว่าแม้จะเป็นเพียงรอบเดียวเฟสเดียวเท่านั้นยังประหยัดถึงเพียงนี้ ถ้าการทดลองมีหลายรอบและหลายเฟสแล้วก็จะยิ่งประหยัดมากขึ้นซึ่งโดยทั่วไปแล้วก็จะเป็นเช่นนั้น

จะเห็นได้ชัดว่าวิธีการดั้งเดิมซึ่งทำได้ง่ายนั้นไม่ได้ยากขึ้นแต่ประการใด ในขณะที่จุดอ่อนต่างๆ ได้รับการปรับปรุงแก้ไขให้ดีขึ้น จะเห็นได้ชัดว่าวิธีการที่นำเสนอใหม่นี้ได้แก้ไขจุดอ่อนต่างๆ ที่มีอยู่ในวิธีการแบบดั้งเดิมกล่าวคือ สามารถจะรวมปัจจัยต่างๆ ได้มากขึ้นตามความจำเป็น ส่งผลให้ช่วงเวลาของโปรแกรมการปรับปรุงสั้นลงกว่าเดิมมาก และยังคงง่ายต่อการปฏิบัติเช่นเดิมด้วย

๖. บทสรุป

ในบทความนี้ การออกแบบการทดลองในทางอุตสาหกรรมได้ถูกนำเสนอ เพื่อทำให้ปัญหาต่างๆ หดไปซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้

๖.๑ การทดลองแบบ Fractional Factorial สามารถจะกระทำแบบอนุกรมได้อย่างไม่ยากลำบากและผู้ทดลองสามารถจะทำการทดลองที่ว่าได้อย่างอัตโนมัติ โดยใช้ตารางที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะ (Scenario Table) หรือ โปรแกรมสำเร็จรูปอย่างใดอย่างหนึ่งแล้วแต่ความสะดวกของผู้ใช้ ผลเปรียบเทียบได้แสดงไว้แล้วในบทที่ ๕

๖.๒ ผู้ทดลองที่คุ้นเคยกับวิธีการของดากูชิ และใช้งานอย่างชำนาญ จะได้รับประโยชน์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ถ้าดัดแปลงวิธีการที่เสนอใหม่นี้ในการทดลอง ยกตัวอย่างเช่น ในบางสถานการณ์จะสามารถประหยัดจำนวนของการทดลองไปได้เมื่อ Interactions ที่สงสัยบางตัวไม่มีนัยสำคัญเลย หรือในกรณีที่ Interactions บางตัวมีนัยสำคัญ จำนวนของการทดลองด้วยวิธี

การที่เสนอใหม่กับวิธีการของคาูกิจก็จะเท่ากัน และในประการสุดท้าย ถ้าผลของการทดลองนั้นได้ชี้
นำผู้ทดลองไปในทางที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งวิธีการของคาูกิจจะทราบได้ด้วยการทำการทดลองเพื่อยืนยัน (Con-
firmation Run) ผู้ทดลองก็สามารถที่จะทำการทดลองต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้ Scenario
Table หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามที่ได้กล่าวแล้วเป็นเครื่องมือ

๖.๓ EVOP ซึ่งเป็นวิธีการดั้งเดิมและดูเหมือนว่าจะมีประสิทธิภาพมากในการ
ปรับปรุงคุณภาพกรรมวิธีการผลิตกลับไม่ได้รับความนิยมเท่าที่ควร ทั้งนี้เพราะจำกัดในเรื่องเวลา
ดังที่ได้กล่าวแล้ว อย่างไรก็ตามถ้าวิธีการที่เสนอใหม่ได้ถูกนำมาใช้จะทำให้จำกัดในเรื่องปัจจัย
เวลาหมดไป ในขณะที่ยังคงรักษาจุดเด่นต่าง ๆ ไว้ได้ กล่าวคือไม่มีการสูญเสียวัตถุดิบในขณะที่ทำการ
ทดลอง ไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญพิเศษใด ๆ เพื่อการนี้เลยนอกจากผู้ปฏิบัติงานประจำเท่านั้น

การค้นคว้าในเรื่องต่าง ๆ ที่จะมาช่วยเสริมเพื่อทำให้วิธีการที่เสนอนี้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นไป
อีกนั้นมีมากมาย เช่น ในขณะนี้ Array ของคาูกิจมีจำกัดกล่าวคือ L_{12} ไม่สามารถที่จะใช้ศึกษา
Interactions ในขณะที่ Array ของ John (Dimond, 1989) อ้างว่าสามารถใช้ศึกษา Interactions
ได้และมีขนาด ๖, ๑๒, ๒๔, ๔๘ และ ๙๖ ซึ่งก็เป็นขนาดที่สามารถจะเติมช่องว่างได้เป็นอย่างดี
ถ้าเป็นเช่นนั้นจริง ก็จะสามารถทำให้วิธีการที่เสนอนี้ทำงานได้ราบเรียบยิ่งขึ้น ไม่ต้องกระโดด
จากขนาด ๘ เป็น ๑๖ ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียโดยใช้เหตุ

นอกจากนั้นในการทดลองบางครั้ง เราไม่สามารถหลีกเลี่ยงความไม่เป็นเชิงเส้นของผลลัพธ์
ได้ทำให้การทดลองแบบ ๒ ระดับ มีความยากลำบาก ถ้าสามารถใช้การทดลองแบบ ๓ ระดับกับวิธี
การที่นำเสนอแล้ว ไม่ประสบกับปัญหาความยุ่งยากซับซ้อนหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือยังดำรงความ
มุ่งหมายเดิมในเรื่องความง่ายไว้ได้แล้วก็จะทำให้วิธีการที่นำเสนอเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง โดย
เฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อผลลัพธ์ไม่เป็นเชิงเส้น

สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหาก Design of Experiment (DOE) ถูกนำมาใช้ให้
เป็นประโยชน์อย่างกว้างขวาง ทั้งในทางอุตสาหกรรมซึ่งทหารเราก็ทำอยู่ในกองทัพ และในทางการ
ศึกษา การฝึก การพัฒนายุทธวิธีและอื่น ๆ ซึ่งกองทัพก็ได้ปฏิบัติอยู่ แต่ทั้งนี้ก็ต้องอาศัยผู้ที่กำลัง
ปฏิบัติงานนั้น ๆ ร่วมมือกันกับนักวิชาการ เพื่อทำให้การพัฒนาเทคโนโลยีเป็นไปอย่างมีระบบ และ
รวดเร็วเกิดประสิทธิภาพในการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าแต่เดิมนั้นประเทศญี่ปุ่นมีความล้ำหลังกว่า
ประเทศทางตะวันตกอยู่มากทางด้านเทคโนโลยี และก็ด้วยการนำ DOE (ซึ่งแต่เดิมนั้นใช้มากใน
ทางเกษตรกรรมหรือการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร) มาประยุกต์ใช้อย่างชาญฉลาดและกว้างขวาง

ด้วยระยะเวลาเพียง ๓๐ กว่าปี (หลังสงครามโลกครั้งที่สอง) ญี่ปุ่นก็ได้กลายมาเป็นผู้นำ ทางด้านเทคโนโลยีของโลกได้

เอกสารอ้างอิง

- Barker, Thomas B., "Quality Engineering by Design : Taguchi's Philosophy, A Look at an Example of Taguchi's Ideas Being Put into Action," Quality Progress, October 1986, pp. 32-42.
- Box, George E.P., "Signal-to-Noise, Performance Criteria, and Transformations," Technometrics, Vol.30, No.1, February 1988, pp.1-17.
- Box, George E.P., and Draper, N.P., Evolutionary Operation : A Statistical Method for Process Improvement, Wiley, New York, 1969.
- Box, George E.P., Hunter, W.G., and Hunter, J.S., Statistics for Experimenters, Wiley, New York, 1978.
- Box, George E.P., Kakar, Raghu n., Nair, Vijay N., Phadke, Madhav, Shoemaker, Anne C., and Wu, C.F. Jeff, "Quality Practices in Japan, A Group of Researchers Learned some Valuable Lessons During a Tour of High-Tech Companies in Japan," Quality Progress, March 1988, pp.37-41.
- Bullington, Kimball E., Hool, Janes N., and Maghsoodloo, Saeed, "A Simple Method for Obtaining Resolution IV Designs for Use with Taguchi's Orthogonal Arrays," Journal of Quality Technology, Vol.22, No.4, October 1990, pp.260-264.
- Byrne, Diane M., and Taguchi, Shin, "The Taguchi Approach to Parameter Design, Parameter Design, Taguchi Style, Involves Experimental design Techniques to Simultaneously Achieve Robustness Against Noise Factors and Reduce Costs," Quality Progress, December 1987, pp.19-28,

- Coleman, David E., and Montgomery, Douglas C., "A Systematic Approach to Planning for a Designed Experiment," Technometrics, vol.35, No.1, February, 1993.
- Devor, Richard E., Chang, Tsong-how, and Sutherland, John W., Statistical Quality Design and Control : Contemporary Concepts and Methods, Macmillan, New York, 1992.
- Dimond, William J., Practical Experiment Designs : For Engineers and Scientists, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
- Freund, John E., Johnson, Richard, and Miller, Irwin R., Probability and Statistic for Engineering, Printice Hall, New Jersey, 1990.
- Gunst, Richard F., Hess, James L., and Mason, Robert L., Statistical Design and Analysis of Experiments : With Applications to Engineering and Science, John Wiley & Son, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1989.
- Hendrix, C.D., "Signal-to-Noise Ratios : A Wasted Effort, " Quality Progress, July 1991, pp.75-76.
- Kackar, Raghu N., "Taguchi's Quality Philosophy : Analysis and Commentary, An Introduction to and Interpretation of Taguchi's Ideas," Quality Progress, December 1986, pp.21-29.
- Lin, Paul K.H., Sullivan, Lawrence P., and Taguchi Genichi, "Using Taguchi Methods in Quality Engineering," Quality Progress, September 1990, pp.55-59.
- Ryan, Thomas P., "Taguchi's Approach to Experimental Design : Some Concerns," Quality Progress, May 1988, pp.34-36.
- Sullivan, Lawrence P., "The Power of Taguchi Methods," Quality Progress, June 1987, pp.76-79.
- Taguchi, Genichi, System of Experimental Design, Vol.1-2, UNIPUB/Kraus International Publications, White Plains, New York, 1987.

Turiel, Thomas P., "A Computer Program to Determine Defining contrasts and Factor Combinations for Two-Level Fractional Factorial Designs of resolution III, IV, and V," Journal of Quality Technology, Vol.20, No.4, October, 1988.

Wang,P.C., "A Simple Method for Analyzing Binary Data from Orthogonal Arrays," Journal of Quality Technology, Vol.20, No.4, October 1988, pp.230-232.