บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.1 หลักการพื้นฐานของการตัดโดยใช้ใบมีด

ในการตัดโลหะแบบธรรมดาทั่วไปนั้น อาศัยหลักการขั้นพื้นฐานที่ว่าการใช้ใบมีดตัดที่มีความแข็งสูงกดลงบนชิ้นงานที่มีความแข็งน้อยกว่า เนื้อชิ้นงานจะเกิดสนามความเค้น เมื่อลากคมมีดผ่านเนื้อชิ้นงาน ค่าความเค้นในระนาบหนึ่งบนเนื้อชิ้นงาน จะสูงเท่ากันหรือมากกว่าความต้านการเฉือนของเนื้อวัสดุชิ้นงาน เป็นผลให้เกิดการเฉือนของเนื้อโลหะ ชิ้นงานจึงแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือชิ้นส่วนที่จะนำไปใช้ ส่วนที่สองคือส่วนซึ่งแยกออกมา มีลักษณะเป็นเส้นยาวๆ หรือเป็นท่อนสั้นๆ เรียกว่าฝอย (ศุภโชค, 2543)

ใบมีดตัด (Cutting Tool) องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในการตัด ทั้งนี้เพราะการตัดวัสดุเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้คมมีด ความแข็งแรง ความทนการสึกหรอและขีดความสามารถอื่นๆ ของใบมีด จะเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของการตัด ต่อประสิทธิภาพของการใช้เครื่องจักรกลตัดวัสดุและค่าใช้จ่ายในการตัดวัสดุ

2.1.1 สิ่งที่ควรศึกษาทำความเข้าใจกับใบมีดตัดคือ

2.1.1.1 ลักษณะทางเรขาคณิตของใบมีด (Cutting Tool Geometry) หมายถึงมุมมีดตัดและลักษณะต่าง ๆ

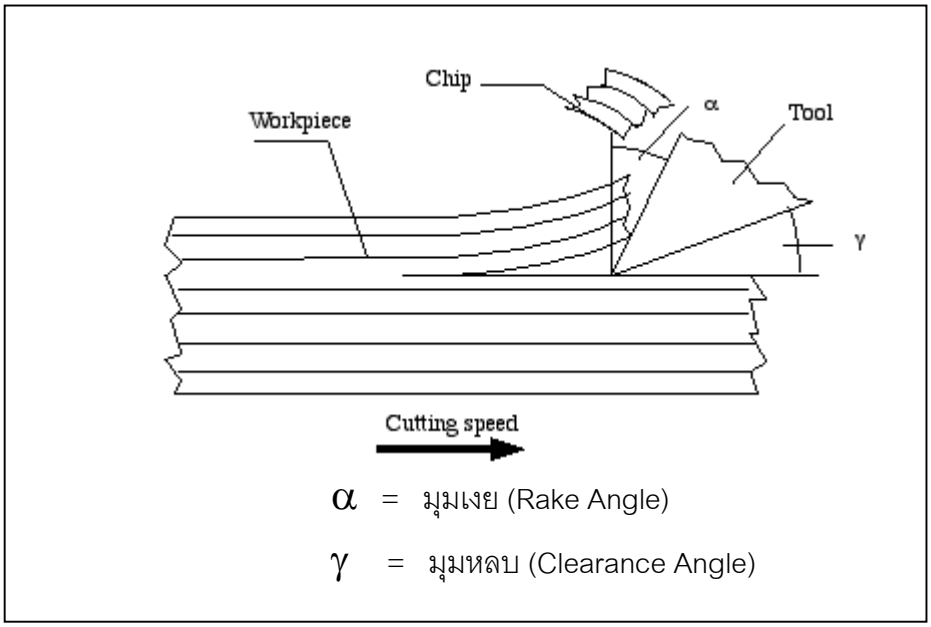
2.1.1.2 วัสดุใบมีดตัด (Cutting Tool Material) รวมถึงโครงสร้างของใบมีดตัด เช่น โครงสร้างจุลภาคและการเคลือบผิว

2.1.1.3 สมรรถนะของใบมีดตัด (Cutting Tool Performance) เช่น ความแข็งแรง ความทนทานต่อการสึกหรอ ค่าความเร็วสูงสุดที่สามารถรับได้

2.1.2 เรขาคณิตของใบมีด

เนื่องจากกรรมวิธีการผลิตมีมากมาย มีตัวแปรเชิงเรขาคณิตหลายต่อหลายตัวมาเกี่ยวข้อง ใบมีดตัดมีหลายชนิด เช่น ใบมีดกลึง ใบมีดไส ใบมีดกัด ดอกสว่าน ซึ่งแต่ละชนิดยังแบ่งย่อยตาม

ลักษณะการใช้งานต่อไปอีก ลักษณะทางเรขาคณิตจึงมีหลายรูปแบบ เช่น เรขาคณิตใบมีดกลึง



ภาพประกอบที่ 2.1 แสดงลักษณะทางเรขาคณิตของใบมีดตัดในการตัดเนื้อไม้

2.1.3 **วัสดุใบมีดตัด**

การค้นคว้าหาวัสดุใหม่ ๆ ที่มีสมบัติดีกว่าวัสดุเดิมที่เคยใช้ เป็นงานที่มีพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะวัสดุชิ้นงานใหม่ ๆ ที่ได้จะมีสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุเดิมขึ้นตลอดเวลา นอกจากนี้เครื่องจักรกลที่ใช้ในการตัดวัสดุก็มีการพัฒนาให้มีกำลังมากขึ้น ทำงานด้วยความเร็วสูงทำงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการค้นคว้าวัสดุใบมีดตัดใหม่ ๆ มาใช้ เพื่อให้สามารถตัดวัสดุชิ้นงานใหม่และใช้กับเครื่องจักรกลใหม่ ๆ ให้เต็มขีดความสามารถ สมบัติของวัสดุใบมีดตัดเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องมีการค้นคว้าและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง (ศุภโชค, 2543)

2.1.4 **สมบัติของวัสดุใบมีด**

หลักการขั้นพื้นฐานของการตัดวัสดุโดยใช้ใบมีดตัด “วัสดุที่แข็งกว่าย่อมขูดวัสดุที่อ่อนกว่าให้เป็นรอยได้” ดังนั้นใบมีดตัดจะต้องทำจากวัสดุที่ความแข็งสูงกว่าชิ้นงานเสมอ วัสดุที่เหมาะในการนำมาทำใบมีดตัด ควรจะมีสมบัติดังนี้

2.1.4.1 มีความแข็งสูง (High Hardness) คือ ในอุณหภูมิปกติของห้อง ความแข็งของสารใบมีดต้องมีความแข็งของมากกว่าสารชิ้นงาน จึงจะสามารถผ่าเนื้อสารชิ้นงานออกเป็นสองส่วนได้ โดยทั่วไปการวัดค่าความแข็งของใบมีดตัดและชิ้นงานในการตัดโลหะ นิยมระบุเป็นค่าความแข็งในระบบรอคเวลล์ สเกลบี และสเกลซี

2.1.4.2 คงความแข็งไว้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Hot Hardness) คือ ขณะที่ใบมีกำลังทำหน้าที่ตัดชิ้นงานอยู่นั้น ทั้งชิ้นงานและใบมีดตัดจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยทั่วไปสารทุก ๆ ชนิดจะอ่อนตัวลงคือความแข็งลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าความแข็งของสารใบมีดตัดลดลงจนมีค่าสูงกว่าสารชิ้นงานเพียงเล็กน้อย ใบมีดก็จะสึกหรออย่างรวดเร็ว หรือไม่ก็แตกลงไปเลย

2.1.4.3 ต้านทานการสึกหรอได้ดี (High Wear Resistance) ที่ผิวหน้ามีดจะมีการเสียดสีระหว่างใบมีดตัดกับเนื้อฝอย และผิวหลังมีดใกล้บริเวณคมตัดจะมีการเสียดสีระหว่างมีดกับเนื้อชิ้นงานที่พึ่งถูกตัด จะทำให้สารใบมีดเกิดการสึกหรอเร็ว

2.3.1.4 มีความแข็งแรงสูง (High Strength) ควรจะมีการต้านแรงดึงสูงและมีความต้านการกดสูงด้วย เพื่อให้ทนทานไม่แตกหักง่าย

2.1.4.5 ไม่เปราะ กระเทาะหรือร้าวง่ายเมื่อถูกกระทบกระแทกทั้งนี้เพราะสารที่มีความแข็งสูงมักจะเปราะ

2.1.4.6 ไม่ไวต่อการประลัยโดยความล้า (Fatique Resistance) คือ แตกหักหรือประลัยโดยการล้าได้ยาก

2.1.4.7 ไม่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้การสึกหรออย่างรวดเร็ว ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับอากาศจนเป็นสนิมได้ง่าย ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหล่อเย็นอย่างรวดเร็วจนอาจจะทำให้เกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว

2.1.4.8 ขึ้นรูปง่าย วัสดุใบมีดที่แข็งมากจะยากต่อการหล่อม ยากต่อการตัดเจียระไนหรือการอัดหลอมขึ้นรูปเพื่อทำให้มีรูปร่างขนาดตรงตามความต้องการ

2.1.4.9 ราคาถูก เพื่อให้สามารถนำมาผลิตเป็นใบมีด และจำหน่ายให้ได้รับความนิยมในตลาด

2.1.4.10 หาซื้อได้ง่าย เพื่อความสะดวกในการจัดซื้อมาใช้ ไม่มีการขาดแคลนการรู้จักเลือกใช้ใบมีดให้เหมาะสมกับงานและสภาวะการตัดจะช่วยในการประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาได้

2.1.5 ชนิดของวัสดุใบมีด

ชนิดของวัสดุ ที่รู้จักกันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด เช่น

2.5.1.1 เหล็กกล้าไฮคาร์บอน (High Carbon Steels, HCS)

2.5.1.2 เหล็กกล้าไฮสปีด (High Speed Steels, HSS)

2.5.1.3 โลหะผสมนอกกลุ่มเหล็ก (Cast Nonferrous Alloys, CAN)

2.5.1.4 คาร์ไบด์ (Carbides, C)

2.5.1.5 เซอร์เมท (Cermets, CT)

2.5.1.6 เซรามิก (Ceramics, CC)

2.5.1.7 เพชร (Diamond, D0)

2.5.1.8 คิวบิก โบรอน ไนไตรด์ หรือซีบีเอ็น (Cubic Boron Nitride, CBN

2.5.1.9 โคโรไนท์ (Coronite, CR)

2.5.1.10 เหล็กกล้าไฮสปีดที่อัดหลอมขึ้นมาจากผงโลหะ (SHSS)

2.1.6 ใบมีดคาร์ไบด์ (Carbide,C)

คาร์ไบด์เป็นสารประกอบระหว่างโลหะกับคาร์บอนบางครั้งเรียกว่าโลหะแข็งใช้สัญลักษณ์ทางการผลิตว่า C มีลักษณะเป็นผงหรือเกล็ดเล็ก ๆ คล้ายเม็ดทรายละเอียด มีความแข็งสูง ในปี พ.ศ.2466 มีผู้ค้นพบวิธีทำให้คาร์บอนเป็นก้อนโดยเอาผงทังสเตนคาร์ไบด์และผงโคบอลต์ผสมกันอัดขึ้นรูปแล้วเผาให้ร้อนจนหลอมเป็นก้อน ต่อมามีการนำเอาคาร์ไบด์ชนิดอื่น เช่น Titanium Carbide, Tantalum Carbide, Zirconium Carbide, Chromium Carbide และColumbium Carbide มาเป็นสารเจือเพื่อป้องกันไม่ให้คาร์ไบด์รวมตัวกันเป็นผลึกใหญ่ เพราะผลึกขนาดใหญ่จะเปราะและแตกง่าย ในปัจจุบันยังมีการนำเอาวัสดุที่มีความแข็งสูงกว่ามาเคลือบบนพื้นผิวมีดเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอและลดแรงเสียดทาน

2.1.6.1 องค์ประกอบของใบมีดคาร์ไบด์

ก. ทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten carbide, WC) มีความแข็งสูง แต่ค่อนข้างเปราะและเมื่อมีอุณหภูมิสูงผงทังสเตนคาร์ไบด์มักจะจับรวมตัวกัน เกิดเป็นผลึกขนาดใหญ่ที่เปราะและแตกง่าย

ข. คาร์ไบด์อื่น ๆ เช่น คาร์ไบด์ของ Co, Ti, Ta, Zi, Cr และ Cb ทำหน้าที่คอยป้องไม่ให้ผลึกของ WC รวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น

ค. วัสดุยึดเป็นโลหะ โดยทั่วไปแล้ว ก็คือโคบอลต์และอาจจะมีนิกเกิล โมลิบดีนัม และโครเมี่ยมผสมลงไปด้วยเพื่อทำหน้าที่ยึดเม็ดคาร์ไบด์ให้รวมกันเป็นก้อน

ง. วัสดุเคลือบผิวในปัจจุบันมีการนำเอาวัสดุที่มีความแข็งสูงเช่น เพชร คาร์ไบด์ ไนไตรด์มาเคลือบผิวใบมีด โดยใช้วิธีเคลือบด้วยสารเคลือบในสูญญากาศ ผิวที่แข็งช่วยให้ใบมีดสึกหรอช้าลงผิวที่เคลือบอาจจะมีหลายชั้นก็ได้

2.1.6.2 การแบ่งประเภทของใบมีดคาร์ไบด์ตามวัสดุยึด

วัสดุยึดเป็นโลหะที่มีสมบัติเกาะติดและจับยึดเม็ดสารขัดได้ดีวัสดุยึดจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวพอเหมาะ ไม่สูงหรือต่ำเกินไป สามารแบ่งได้ดังนี้

ก. ใช้โคบอลต์เป็นวัสดุยึด ซึ่งเนื้อของคาร์ไบด์จะเป็นทังสเตนคาร์ไบด์ทั้งหมดหรือเกือบทั้งหมด เหมือนกับใบมีดคาร์ไบด์รุ่นแรก ๆ ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ต่อมามีการนำเอา Tantalum มาผสมเจือปนเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความต้านทานการสึกหรอและเป็นการเพิ่มความแข็งแรง

ข. ใช้โคบอลต์เป็นวัสดุยึดและเนื้อคาร์ไบด์หลายชนิด คือ WC, TiC, TaC และ NbC ด้วย โดยที่ WC-TiC-TaC-NbC รวมกันเป็นสารละลายแข็งซึ่งเป็นการพัฒนาในสมัยต่อ ๆ มา

ค. ใช้นิกเกิลหรือโมลิบดีนัมเป็นสารยึด ซึ่งให้ความแข็งแรงสูง

2.1.6.3 การแบ่งใบมีดคาร์ไบด์ประเภทตามระบบ JIC

ระบบ Joint Industry Conference (JIC) ของสหรัฐอเมริกา บางครั้งเรียกระบบอย่างไม่เป็นทางการ แบ่งใบมีดคาร์ไบด์ออกเป็น 8 เกรดหลัก โดยจำแนกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

ก. ใบมีดเกรด C-1 ถึง C-4 ประกอบด้วยส่วนผสมเพียง 2 ส่วน คือ WC และ Coใบมีดเหล่านี้มีลักษณะเด่นคือ มีความแข็งแรงสูงยิ่งและทนทานต่อการสึกหรอได้ดีเยี่ยมเหมาะสำหรับตัดชิ้นงานที่ฝอยไม่ต่อเนื่อง เช่น เหล็กหล่อ มีแนวทางการใช้งาน มีดังนี้

C-1 Roughing	ใช้งานหยาบที่ต้องการเน้นความรวดเร็วไม่เน้นความละเอียด
C-2 General purpose	ใช้ในงานทั่วไป

C-3 Finishing ใช้ในงานละเอียด งานขั้นสุดท้ายที่ต้องการความแม่นยำ

C-4 Precision Finishing ใช้ในงานละเอียดมาก

ข. ใบมีดเกรด C-5 ถึง C-8 ใช้คาร์ไบด์หลายชนิดผสมกัน ถ้าฝอยโลหะมีลักษณะเป็นเส้นยาว เช่น เมื่อชิ้นงานเป็นเหล็กกล้า ใบมีดคาร์ไบด์จะสึกเป็นหลุมบนผิวหน้ามีด เพื่อลดความเร็วในการเกิดหลุมจำเป็นต้องใช้คาร์ไบด์หลาย ๆ ชนิดผสมกัน คือ WC, TiC, TaC และอื่น ๆ โดยใช้ เป็นสารยึด มีแนวทางการใช้งานดังนี้

C-5 Roughing ใช้งานหยาบที่ต้องการเน้นความรวดเร็วไม่เน้นความละเอียด

C-6 General purpose ใช้ในงานทั่วไป

C-7 Finishing ใช้ในงานละเอียด งานขั้นสุดท้ายที่ต้องการความแม่นยำ

C-8 Precision Finishing ใช้ในงานละเอียดมาก

ต่อมาได้มีการเพิ่มเกรดอีก เช่น C-50 ดัดแปลงมาจาก C-5 และ C-70 ดัดแปลงมาจาก C-7 เป็นต้น และยังมีเกรดอื่น ๆ อีก เพิ่มเติมมาใช้งานอีกมากมาย

2.1.6.4 การแบ่งประเภทของใบมีดคาร์ไบด์ตามระบบ ISO

ปัจจุบันการแบ่งประเภทคาร์ไบด์ตามระบบ ISO ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและมีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดก็มีการจัดประเภทตามแบบ ISO ซึ่งเดิมครอบคลุมเฉพาะใบมีดคาร์ไบด์แต่ผู้ผลิตใบมีดได้นำวิธีการของตามระบบ ISO ไปอนุโลมใช้กับใบมีดที่ทำจากสารอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติคล้ายกับคาร์ไบด์ เช่น เซอร์เมท เพชร ซีบีเอ็น และโคโรไนท์ ในระบบ ISO วัสดุมีดจะถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งานเป็นหลัก ทั้งนี้เป็นการแบ่งโดยไม่ได้คำนึงส่วนผสมหรือโครงสร้างใบมีด แต่อาจจะใช้รหัสบอกลักษณะ รูปร่าง การเคลือบผิว เพิ่มเติมไว้ด้วย ใบมีดที่ใช้ส่วนมากเป็นใบมีดอินเสอร์ท (Insert Tool) คือใบมีดที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบนมักจะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยม และอาจจะถูกตรึงโดยมีเขี้ยวของด้ามหนีบเอาไว้หรือมีรูตรงกลางเพื่อใช้ในการจับยึดตัวใบมีดติดกับด้ามมีด จะถูกแบ่งออกเป็นเกรดดังนี้

ก. เกรด P เป็นใบมีดที่ใช้ตัดชิ้นงานที่เป็นงานชนิดวัสดุเหนียว ไม่เปราะ ฝอยที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นยาว มีตัวเลขตามหลังอักษร P ตัวเลขนี้จะบอกค่าความหยาบ หรือสภาวะความรุนแรงในการใช้งาน ค่าตัวเลขอาจจะมีตั้งแต่ 01 ถึง 50 เช่น P01 - P10 ใช้ในงาน

ละเอียด P20 ใช้ในงานปานกลางทั่ว ๆ ไป P30 ใช้ในงานค่อนข้างหยาบ P40 ใช้ในงานหยาบ P50 ใช้ในงานหยาบมาก

ใบมีดเกรด P นิยมใช้ตัดเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ ครอบคลุมเหล็กหล่อ เหล็กกล้าเสตนแลสและเหล็กหล่อชนิดอ่อน

ข. เกรด M เป็นใบมีดที่ใช้ตัดวัสดุชิ้นงานที่ตัดยากกว่าเกรด P มีตัวเลขตามหลังอักษร M ตัวเลขนี้จะบอกความหยาบ หรือสภาวะความรุนแรงในการใช้งาน เช่น M10 ใช้ในงานหยาบ M20 ใช้ในงานปานกลางทั่ว ๆ ไป M30 ใช้ในงานค่อนข้างหยาบ M40 ใช้ในงานหยาบ

ใบมีดเกรด M นิยมใช้ตัดวัสดุชิ้นงานเหล็กเสตนแลสชนิดออสเทไนท์ โลหะอัลลอยชนิดทนอุณหภูมิสูง เหล็กกล้าแมงกานีส เหล็กหล่อชนิดแข็ง

ค. เกรด K เป็นใบมีดที่ใช้ในการตัดชิ้นงานที่เป็นวัสดุแข็ง และเปราะ ฝอยที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นผง หรือท่อนสั้น ๆ มีตัวเลขตามหลังตัวอักษร K ตัวเลขนี้จะบอกความหยาบหรือสภาวะความรุนแรงในการใช้งาน เช่น K10 ใช้ในงานละเอียด K20 ใช้ในงานปานกลางทั่ว ๆ ไป K30 ใช้ในงานค่อนข้างหยาบ K40 ใช้ในงานหยาบ

ใบมีดเกรด K นิยมใช้ในการตัดเหล็กหล่อทั่ว ๆ ไปและวัสดุนอกกลุ่มเหล็ก เช่น อลูมิเนียม บรอนซ์ พลาสติก หินอ่อน หินแกรนิต เซรามิกและวัสดุผสม

2.1.7 **อายุการใช้งานใบมีดตัด**

ในการตัดวัสดุเพื่อให้การวางแผนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วางแผนงานจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ว่า มีดที่นำมาใช้งานจะมีอายุการใช้งานได้อย่างมากเท่าไร เช่น ใช้ตัดชิ้นงานได้กี่นาทีหรือใช้ตัดงานได้กี่ชิ้น ก่อนจะหมดสภาพการใช้งานโดยการแตกหัก กะเทาะ ร้าว หรือสึกหรอเกินขนาดที่ยอมรับได้ เพื่อที่จะได้วางแผนการเปลี่ยนใบมีดทั้งใบ หรือเปลี่ยนเฉพาะคมมีดบางคมในบางกรณีที่ใบมีดมีหลายคมและถอดเปลี่ยนได้ อายุการใช้งานของใบมีดตัดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะของการหมดอายุ ความง่ายในการตัดวัสดุชิ้นงานและตัวแปรที่เกี่ยวกับสภาวะการตัด เช่น ความเร็วในการตัด อัตราป้อน ความลึกในการตัด ชนิดน้ำหล่อเย็นและอัตราการฉีดน้ำหล่อเย็น เป็นต้น

2.1.7.1 หน่วยวัดอายุคมมีด (Unit of Tool Life) หน่วยที่นำมาใช้วัดหรือบ่งชี้อายุคมมีดมีอยู่มากมาย ดังนี้

ก. เวลาในการตัดจริงจนคมมีดหมดสภาพการใช้งาน หมายถึงเวลาที่คมมีดผ่าลงบนชิ้นงานจริง ๆ นิยมใช้หน่วยเป็นนาที การระบุโดยเวลาตัดจริงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป ใช้กับกรรมวิธีการผลิตที่คมมีดสัมผัสกับชิ้นงานอย่างต่อเนื่องระยะเวลาในการตัด เช่น การกลึง การไส การเจาะด้วยดอกสว่าน

ข. เวลาทั้งหมดในการตัดจนใบมีดหมดสภาพการใช้งาน หมายถึงเวลาทั้งหมดที่ใช้เครื่องจักรกล ไม่ว่าจะเป็นเวลาที่คมมีดตัดชิ้นงานหรือไม่ก็ตาม นิยมใช้กับกรรมวิธีการที่คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานอย่างไม่ต่อเนื่องระหว่างการตัด เช่น การกัด ซึ่งการหาเวลาในการกัดจริงทำได้ยาก

ค. ความยาวชิ้นงานที่ถูกตัดออกตั้งแต่เริ่มตัดจนหมดอายุ นิยมวัดเป็นหน่วยเมตรหรือฟุต ตามแต่ผู้ใช้นิยม เป็นวิธีการที่เข้าใจง่ายในการใช้งานในอุตสาหกรรม และเหมาะกับกรณีการตัดวัสดุด้วยความเร็วสูง ที่เวลาของอายุคมมีดอาจจะสั้น เช่นหมดอายุภายในเวลาไม่เกิน 1 นาทีแต่ก็สามารถผลิตชิ้นงานได้เป็นจำนวนมากมาย เนื่องจากผลิตด้วยความเร็วและอัตราป้อนสูงมาก

ง. ปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกตัดออกไปตั้งแต่เริ่มตัดจนคมมีดหมดอายุ วัดเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร ลูกบาศก์นิ้วหรือแล้วแต่ผู้ใช้งานต้องการ เป็นอีกหนึ่งวิธีที่เข้าใจง่ายในการใช้งานในอุตสาหกรรม

จ. จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ก่อนที่คมมีดจะหมดอายุ เป็นวิธีที่สะดวกและเข้าใจง่ายในการวางแผนและควบคุมการผลิตในโรงงาน และง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์นับจำนวนชิ้นส่วนที่ผลิตได้

2.1.7.2 เกณฑ์ตัดสินว่าคมมีดหมดอายุ (Tool Life Criterion)

โดยทั่วไป หลักใหญ่ในการตัดสินว่าคมมีดหมดอายุแล้ว คือ การที่คมมีดไม่สามารถตัดชิ้นงานให้เป็นชิ้นส่วนที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการ ซึ่งอาจจะหมายความอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

ก. คมมีดแตกหักโดยสิ้นเชิง (Total Failure) ใช้งานต่อไปไม่ได้ และอาจจะทำให้เป็นอันตราย

ข. คมมีดเกิดการร้าว (Cracking) หรือการกระเทาะ (Chipping) ใกล้จะแตกหัก ต้องเลิกใช้งานก่อนจะแตกหักจริงจนเป็นอันตราย

ค. คมมีดสึกหรอมากหมดสภาพการใช้งาน หรือใกล้จะแตกหักแล้ว การวัดค่า “ขนาดความสึกหรอ” เป็นเรื่องยุ่งยาก เพราะใบมีดมีลักษณะการสึกหรอมากมายหลายรูปแบบ จำเป็นต้องเลือกวิธีการวัดอย่างใดอย่างหนึ่งโดยมีวิธีที่ชัดเจนสามารถทำซ้ำหรือตรวจสอบได้

ง. รอยแถบลึก ที่ผิวด้านหลังมีดหรือผิวหลบของคมมีด มีขนาดสูงเกินค่าที่ยอมรับได้ ถ้าขืนใช้คมตัดต่อไป จะเสี่ยงต่อการที่คมมีดแตกหัก

จ. ความลึกของหลุมรอยสึกหรือความกว้างของหลุม ที่ผิวหน้ามีดมีขนาดสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ถ้าใช้คมมีดตัดต่อไปก็เสี่ยงต่อการแตกหักของคมมีด

ฉ. ปริมาตรหรือน้ำหนักของรอยสึก มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้

ช. ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมาแล้ว มีขนาดผิดไปจากค่าที่กำหนดเกินกว่าที่จะยอมรับได้

ซ. ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมาแล้ว มีค่าความขรุขระของพื้นผิวเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้

นอกจากเกณฑ์ที่กล่าวมาแล้ว ผู้ผลิตอาจจะเลือกใช้เกณฑ์ที่เห็นว่าเหมาะสม ซึ่งเกณฑ์ต่าง ๆ เหล่านี้ไม่สามารถที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างเกณฑ์ต่าง ๆ ในการใช้งานจริงการเลือกใช้ควรระบุให้ชัดเจนว่าใช้เกณฑ์ใดเพื่อสามารถที่จะตรวจสอบได้ ในบางกรณี ผู้ตัดวัสดุอาจจะใช้คมมีดจนกระทั้งคมมีดเกิดการแตกหักไปจริง ๆ เช่น ในงานตัดหยาบที่ต้องการความรวดเร็ว แต่ไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก หรือในงานที่ใช้คมมีดทำจากเหล็กกล้าไฮสปีด ซึ่งมักจะมีเสียงดังจากการเสียดสีระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวหลังคมมีด ส่วนกรณีที่ต้องการความละเอียดของพื้นผิวหรือต้องการขนาดชิ้นส่วนที่แม่นยำ ผู้ตัดวัสดุจะใช้คมมีดไปจนคมมีดสึกหรอ ซึ่งทำให้ขนาดเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากขนาดที่ต้องการ และมีการกำหนดค่าสูงสุดของการสึกหรอที่ยอมรับได้ เมื่อค่าความสึกหรอมีขนาดสูงเกินขนาดที่ยอมรับได้ ก็ถือว่าคมมีดหมดอายุต้องเปลี่ยนคมมีดหรือนำคมมีดไปลับใหม่ โดยทั่วไปไม่นิยมให้คมมีดแตกหักจริง ๆ เพราะอาจจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายหรือเกิดอุบัติเหตุได้ จึงต้องมีการวัดค่าความสึกหรอหลังการตัดและเปลี่ยนคมมีดที่สึกหรอเกินค่าที่ยอมรับได้ โดยไม่ต้องรอให้เกิดการแตกหัก

2.1.7.3 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออายุคมมีด

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออายุคมมีดตัดมีหลายตัวแปรแต่อาจจะแบ่งพิจารณาเป็นประเภทต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. ตัวแปรต่อสภาวะการตัด เป็นตัวแปรที่มักจะใช้ควบคุมใน กรรมวิธีการผลิตและจำเป็นที่ต้องเลือกค่าที่เหมาะสม เช่น ความเร็วในการตัด อัตราป้อนชิ้นงานและความลึกในการตัด

ข. ลักษณะทางเรขาคณิตของคมมีด ได้แก่ขนาดระยะทางเส้นตรงและมุมต่าง ๆ ของใบมีด โดยทั่ว ๆ ไปเป็นที่เข้าใจกันว่าภายใต้ส่วนผสมหนึ่งของ สารใบมีดสารชิ้นงาน สารหล่อเย็น จะมีค่าที่เหมาะสมที่สุดของมุมมีดแต่ละมุม รวมทั้งค่าของรัศมีจมูกมีด ดังตัวอย่างในกรณีของมีดกลึง แต่เป็นการยากที่จะทราบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่าใดแน่ โดยปกติผู้ตัดวัสดุมักจะถือเอาหรือสมมุติเอาว่ามุมต่าง ๆ ของใบมีดที่ผู้ผลิตใบมีดแนะนำให้เลือกมาใช้งาน จะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด แต่ทั้งนี้อาจจะจริงหรือไม่จริงก็ได้

ค. วัสดุใบมีด วัสดุที่มีความแข็งกว่าจะเข้าสึกหรอช้ากว่า ดังนั้นวัสดุใบมีดที่แข็งกว่ามักจะมีอายุการใช้งานนานกว่าวัสดุใบมีดที่อ่อนกว่า แต่ต้องมีการไม่เกิดการกระเทาะแตกหักหรือร้าว

ง. วัสดุชิ้นงาน วัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งโดยเฉลี่ยสูง จะทำให้ใบมีดสึกหรอเร็วและอายุการใช้งานคมมีดสั้น ยกเว้นกรณีที่สารชิ้นงานที่มีเนื้อแข็งมากหรืออ่อนมากปนกันอยู่

จ. น้ำยาหล่อเย็น โดยทั่ว ๆ ไปการใช้น้ำยาหล่อเย็นฉีดไปยังบริเวณคมมีดจะช่วยลดอุณหภูมิของคมมีดทั้งผิวหน้ามีดและหลังมีด การลดอุณหภูมิจะทำให้อัตราการสึกหรอของคมมีดลดลง

ฉ. ความสามารถของเครื่องจักรในการควบคุมอัตราป้อน ในกรณีเครื่องจักรธรรมดา การควบคุมอัตราป้อนระหว่างการกดคมมีดเข้าสู่เนื้อชิ้นงานและการถอนคมมีดออกจากเนื้องานเป็นการควบคุมด้วยมือซึ่งทำได้ยาก ในกรณีเครื่องจักร CNC การควบคุมอัตราการป้อนทำได้ง่ายกว่าและลดการแตกหักได้น้อยกว่า

2.2 ความขรุขระของพื้นผิว

2.2.1 ประเภทของการตัด

การตัดวัสดุ ถ้าหากมองในแง่ของความประณีต ความละเอียดแม่นยำหรือความราบเรียบของพื้นผิวสำเร็จ (Surface Finish) นั่นคือพื้นผิวที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตจำแนกตามความราบเรียบของพื้นผิวสำเร็จ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.2.1.1 การตัดหยาบ (Rough Cutting) หมายถึง การตัดงานที่ต้องการให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ไม่เน้นเรื่องการทำให้ค่าความขรุขระต่ำ ไม่เน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน งานส่วนมากในการตัดโดยใช้ใบมีดตัดมักจะเป็นการตัดหยาบ ใช้ความเร็วในการตัดค่อนข้างสูง อัตราป้อนสูง และความลึกในการตัดสูง เป็นผลให้ใช้แรงตัดสูง ใช้กำลังในการตัดสูง และอาจจะต้องฉีดน้ำยาหล่อเย็นที่มีสมบัติของการหล่อลื่นหรือการลดแรงตัดได้ดี ทั้งนี้เพราะต้องการให้งานเสร็จเร็ว หลังจากงานตัดหยาบแล้ว อาจจะต้องมีการตัดละเอียด หรือการเจียระไน อีกครั้งหนึ่ง

2.2.1.2 การตัดปานกลาง (Medium Cutting) เป็นการตัดที่ประนีประนอมระหว่างการตัดหยาบและการตัดละเอียด คือ ต้องการให้งานเสร็จเร็ว โดยที่ต้องการให้พื้นผิวขรุขระน้อยด้วย ซึ่งอาจจะทำได้ในบางกรณี โดยการเลือกค่าความเร็วในการตัด อัตราป้อน และความลึกของการตัดที่เหมาะสม

2.2.1.3 การตัดละเอียด (Fine Cutting) หมายถึงการตัดที่ต้องการให้ค่าความขรุขระที่ต่ำเน้นความแม่นยำหรือความละเอียดของพื้นผิวสำเร็จของชิ้นงาน ไม่เน้นให้งานเสร็จอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเสร็จรวดเร็วก็เป็นการดี งานในลักษณะนี้เกิดขึ้นเป็นงานในขั้นตอนต่อเนื่องจากการตัดหยาบหรือเป็นการตัดครั้งสุดท้าย ใช้ความเร็วในการตัดสูงหรือต่ำก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม อัตราป้อนต่ำและความลึกในการตัด

2.2.1.4 การตัดละเอียดยิ่ง (Ultra - Fine Machining) ในการตัดชิ้นงานบางอย่าง เช่น การกลึงเลนส์ การกลึงอะลูมิเนียมให้พื้นผิวสำเร็จเป็นมันวาวคล้ายกระจก ค่าความขรุขระจะน้อยมากเป็นพิเศษ

การจำแนกประเภทของการตัด อาจจะจำแนกโดยค่าความขรุขระของพื้นผิวสำเร็จ ดังนี้

การตัดหยาบ R_a ตั้งแต่ 10 μm หรือ 0.010 mm ขึ้นไป

การตัดปานกลาง R_a ระหว่าง 1 – 10 μm หรือ 0.001 – 0.010 mm

การตัดละเอียด R_a ระหว่าง0. 1 – 1 μm หรือ 0.0001 – 0.001 mm

การตัดละเอียดยิ่ง R_a ตั้งแต่ 0.1 μm หรือ 0.0001 mm ลงไป

รูปแบบโดยทั่วไปของพื้นผิว ตามที่ได้มีการกล่าวถึงทั่วๆ ไป มีคำศัพท์ทางเทคนิคหลายคำเกี่ยวกับพื้นผิวที่ควรจะรู้จัก เช่น

พื้นผิว (Surface) หมายถึง ส่วนนอกสุดของเทห์วัตถุ (Body) ที่จะต้องสัมผัสกับอวกาศ

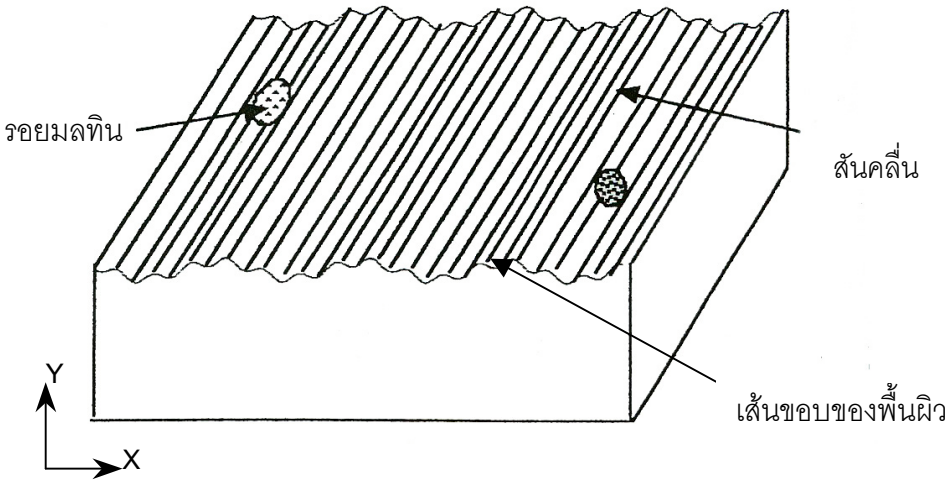
(Space) หรือ สัมผัสเกี่ยวข้องกับเทห์วัตถุอื่น พื้นผิวของวัตถุส่วนมากจะมีลักษณะเป็นเหมือนเกลียวคลื่นที่มีความยาวคลื่น (Wavelength) ยาว ผสมกับละลอกคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น

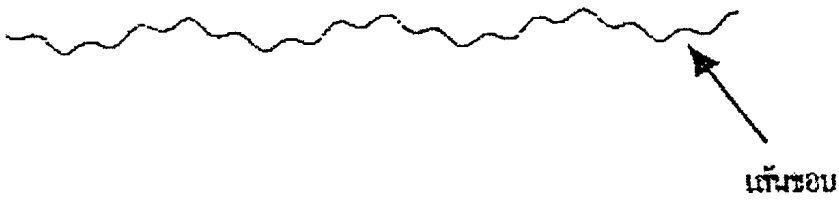
พื้นผิวสำเร็จ (Finish Surface) หมายถึง พื้นผิวที่เกิดจากกรรมวิธีการผลิต เช่น พื้นผิวชิ้นงานหรือ ชิ้นส่วนที่ได้จากการกลึง ไส กัด เจาะ หรือแม้กระทั่งจากกรรมวิธีที่ไม่ใช่การตัด เช่น การหล่อ การรีด การอัดหลอม เป็นต้น

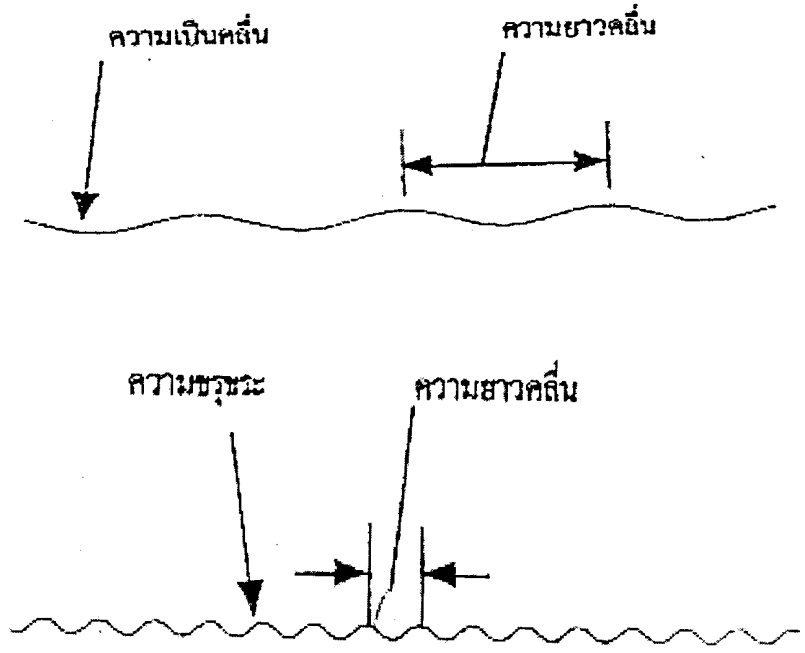
ความเป็นคลื่น (Waviness) หมายถึง การเกิดคลื่นที่มีช่วงคลื่นยาว ความเป็นคลื่นส่วนมากจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine Wave) จึงอาจจะแสดงได้โดยขนาดของคลื่น (Amplitude) และโดยค่าความยาวคลื่นความขรุขระหมายถึง ละลอกคลื่นสั้น ความขรุขระอาจจะแสดงได้โดยขนาดของคลื่นและโดยความยาวคลื่นขอบเส้น เป็นเส้นแสดงพื้นผิวเมื่อถูกตัดตามขวาง

ความขรุขระ (Roughness) หมายถึง ละลอกคลื่นที่มีช่วงคลื่นสั้น ความขรุขระอาจจะแสดงได้โดยขนาดของคลื่นและโดยค่าความยาวคลื่น

เส้นขอบ (Profile) เป็นเส้นแสดงพื้นผิวเมื่อถูกตัดตามขวาง







ภาพประกอบที่ 2.2 องค์ประกอบของพื้นผิว

2.2.2 การวัดค่าความขรุขระของพื้นผิว

การวัดค่าความขรุขระของพื้นผิว โดยปกติแล้วจะใช้เครื่องมือที่มีลักษณะคล้ายเข็ม ลากอย่างช้าๆ ผ่านไปบนแกนนอน (แกน X) ของพื้นผิวที่จะทำการวัดค่าความขรุขระ การเคลื่อนที่ของปลายเข็มในแนวดิ่งคือ ตามแกน Y จะเป็นไปตามลักษณะเส้นขอบของพื้นผิว (Surface Profile) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2 จากนั้นจะมีระบบบันทึกค่า X และ Y_a ไว้ในหน่วยความจำ และระบบคำนวณค่าอิทธิพลของความเป็นคลื่น (Waviness) ที่มีขนาด Y_w ในแนวดิ่ง จากนั้นวงจรคำนวณก็จะลบค่าของอิทธิพลของความเป็นคลื่นออกก็จะเหลือเฉพาะในแนวดิ่งอันเนื่องมาจากความขรุขระ (y) ซึ่งจะนำไปคำนวณค่าความขรุขระต่อไป

ค่าความขรุขระแสดงได้ด้วยตัวแปรต่างๆ หลายตัวแปร ซึ่งจะได้นำมาพิจารณาดังต่อไปนี้

2.2.2.1 ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (Arithmetic Average, R_a)

ถ้าลากเส้นในแนวนอนผ่านกึ่งกลางของเส้นขอบรูปที่ตัดค่าความเป็นคลื่นออกจนเหลือแต่ความขรุขระ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2 เส้นนี้เรียกว่าเส้นกึ่งกลาง (Central Line) โดยแบ่งพื้น

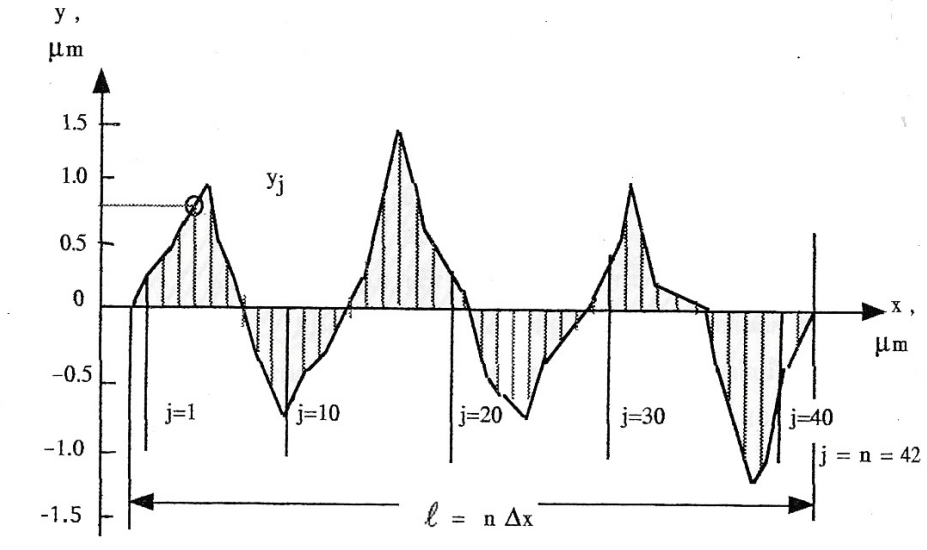
ที่ระหว่างเส้นขอบรูปกับเส้นกึ่งกลางเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ค่าในแกนดิ่งวัดจากเส้นกึ่งกลางจะเรียกว่าค่า y และค่าความสูงเฉลี่ยทางเลขคณิต R_a จะนำมาใช้เป็นค่าความขรุขระ นั่นคือ R_a = ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของพื้นที่ใต้เส้นขอบรูป / ระยะทางในการวัดตามแนวนอน หรือ

$$R_a = \frac{1}{\ell}\int_0^{\ell} |y|\,dx \qquad (2\text{-}1)$$

หรือ ถ้าแบ่งระยะทาง ออกเป็น n ส่วนโดยที่ n มีค่าสูงพอ จะพบว่า

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} |y_j| \qquad (2\text{-}2)$$

ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต R_a เป็นค่าที่นิยมใช้ระบุความขรุขระของพื้นผิวมาแต่ดั้งเดิมก่อนค่าอื่นๆ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและใช้กันมากจนกระทั่งปัจจุบัน แต่ต่อมามีการนำเอาตัวแปรอื่นๆ มาใช้ระบุค่าความขรุขระเพิ่มเติมอีก เพื่อให้การพิจารณาค่าความขรุขระมีหลายมุมมองยิ่งขึ้น



ภาพประกอบที่ 2.3 การแบ่งเส้นขอบของพื้นผิวเป็นอีลีเมนท์ย่อยๆ

2.2.2.2 ค่าเฉลี่ยรูทมีนสแควร์ (Root Mean Square Average, R_q หรือ R_{rms})

การคำนวณหาค่าความขรุขระตามวิธีรูทมีนสแควร์ เป็นความพยายามที่จะนำเอาหลักการทางสถิติมาใช้ในการวัดค่าความขรุขระ โดยใช้สูตรการคำนวณโดยอาศัยหลักการยกกำลังสองของ y เพื่อให้ค่า y ที่มีค่าลบกลายเป็นค่าบวกของ y^2 จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของ y^2 แล้วจึงถอดกรณฑ์ หรือ รูท (Root) ฐานสอง เพื่อให้หน่วยของการวัดเป็นหน่วยยกกำลังหนึ่ง ซึ่งเป็นหน่วยตามปกติที่คุ้นเคยกัน

ค่าความขรุขระตามวิธีรูทมีนสแควร์ R_q หรือ R_{rms} หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{1}^{n} y^2} \qquad (2\text{-}3)$$

2.2.2.3 ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด (Maximum Distance between Peak to Valley, R_{max})

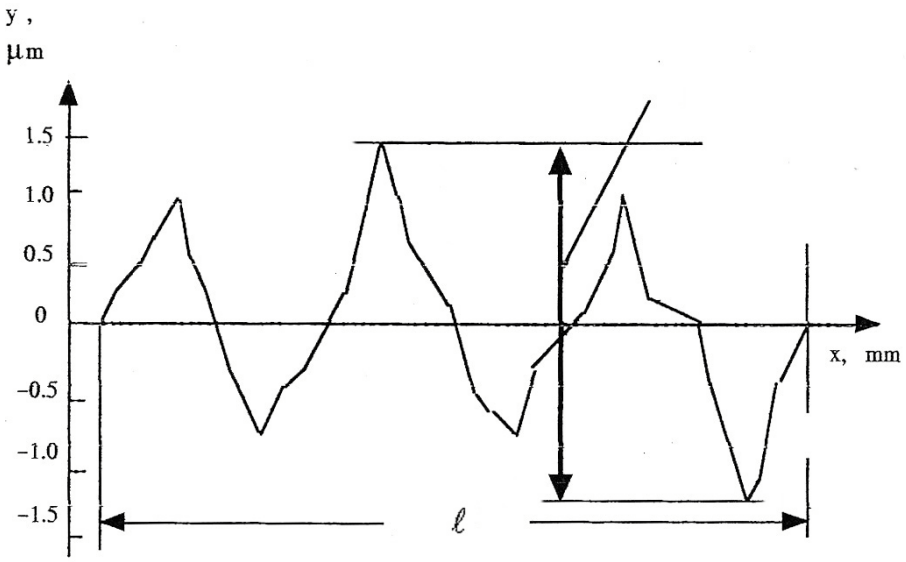
ค่า R_{max} หรือ ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด เท่าที่วัดได้จากความยาว λ ที่วัดจากพื้นผิว ได้แสดงไว้ดังภาพประกอบ 2.3 ค่า R_{max} หาได้ดังนี้

$$R_{\max} = 1.5 + 1.2 = 2.7\mu m \qquad (2\text{-}4)$$

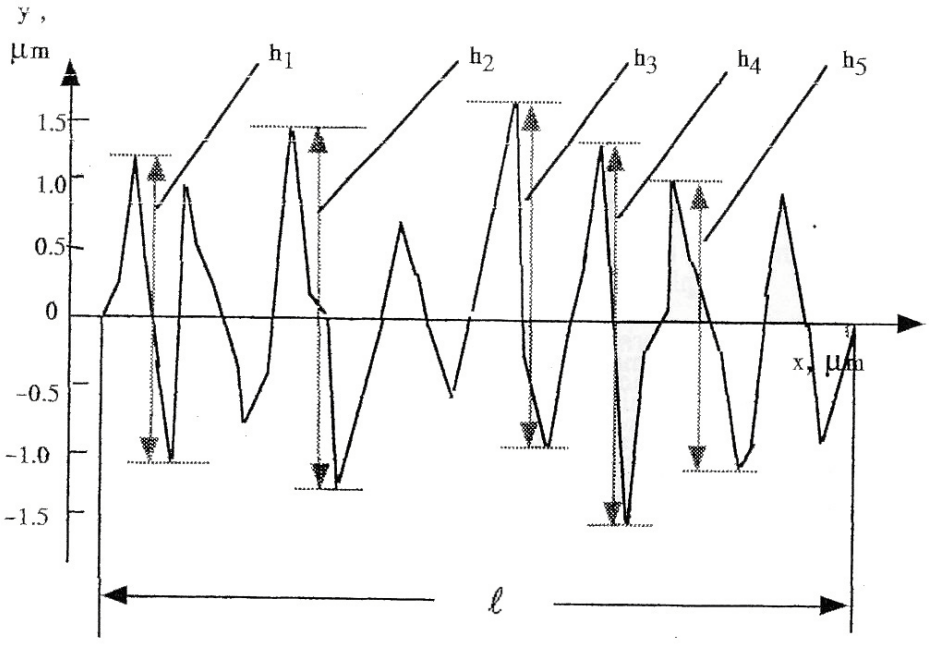
ค่า R_{max} มีความหมายในการปฏิบัติงาน คือ เป็นค่าที่จะบอกได้ว่า ในการจะขจัดเนื้อผิวตัวอย่างนี้ จะต้องขจัดเนื้อผิวออกเป็นความลึกไม่น้อยกว่าค่าของ R_{max} จึงจะทำลายผิวเดิมได้หมด แต่เนื่องจากค่า R_{max} วัดได้ไม่แน่นอนเพราะเป็นค่าสูงสุดค่าเดียวซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นผิวที่วัด จึงนิยมวัดค่าเฉลี่ย R_z แทนค่า R_{max} โดยให้ R_z เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความสูงระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุดจากค่าสูงสุดที่วัดได้ 5 ค่าแรก ถ้าคำ h_1 , h_2 , h_3 , h_4 และ h_5 เป็นค่าความสูงระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด โดยเป็นค่าสูงสุด 5 ค่าแรก เท่าที่วัดได้จากความยาว λ ที่วัดจากพื้นผิว ดังได้แสดงไว้โดยภาพประกอบ 2.4 ดังนั้นค่า R_z คำนวณได้จาก

$$R_z = \frac{1}{5}\sum_{j=1}^{5} hj = \frac{1}{5}\left[h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5\right] \qquad (2\text{-}5)$$

ยังมีวิธีวัดค่าความขรุขระวิธีอื่นอีกหลายวิธี แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้งานมากนัก จึงไม่นำมาพิจารณา



ภาพประกอบที่ 2.4 แสดงค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด R_{max}



ภาพประกอบที่ 2.5 แสดงค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุดห้าค่าแรก R_z

2.3 ไม้ยางพารา

2.3.1 ลักษณะของไม้ยางพารา

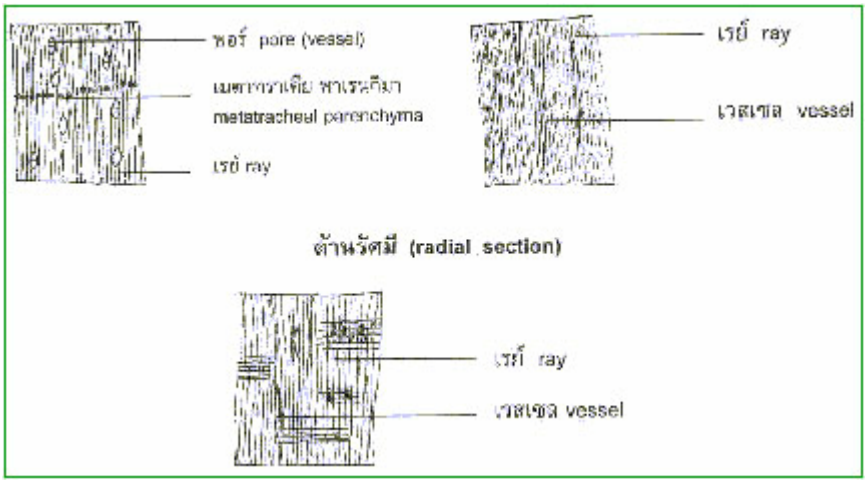
ชื่อวิทยาศาสตร์ : Hevea Brasiliensis Muell.Arg พันธุ์ยางปัจจุบันให้ขนาดลำต้นค่อนข้างเล็ก ดังนั้นขนาดของเนื้อไม้มีความโตไม่มากประมาณ 20-40 ซม. หรือเล็กกว่านี้

สี : เนื้อไม้มีสีขาวนวล บางทีอาจมีแถบสีชมพูอ่อนแทรกอยู่ ส่วนของกระพี้และแก่นมองเห็นไม่เด่นชัด ด้านหน้าตัด เมื่ออบแห้งแล้วเนื้อไม้จะมีสีเข้มขึ้น คล้ายกับสีฟางข้าว

ลักษณะเนื้อไม้ : ค่อนข้างละเอียดถึงหยาบปานกลาง เสี้อนไม้เป็นเสี้อนตรง บางส่วนมีลักษณะเสี้อนสน มากบ้าง น้อยบ้างตามลักษณะการเจริญเติบโต เมื่อไสตกแต่งเกิดเป็นรอยหยัก เกิดจากส่วนที่เป็นพาเรงคิมา (Wood Parenchyma) ลายไม้เกิดจากความแตกต่างระหว่างด้านสัมผัส ความแน่นของไฟเบอร์ และปริมาณความหนาแน่นของกลุ่มเซลล์พาเรงคิมาทางด้านข้าง พอร์ (Pore) มีลักษณะเดี่ยว และแฝด 2-3 พอร์ คละกันกระจายตัวห่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอ (สุชาติ, 2544)

2.3.2 ความคงทนตามธรรมชาติ

เนื้อไม้ยางพาราไม่คงทนต่อการถูกทำลายโดยเชื้อราและแมลง เฉพาะอย่างยิ่งการถูกทำลาย โดยเชื้อราสีน้ำเงิน (Blue-Stain Fungi) และมอดเจาะไม้ ความทนทานตามธรรมชาติโดยเฉลี่ยไม่เกิน 2 ปี



ภาพประกอบที่ 2.6 แสดงลักษณะเนื้อไม้ยางพารา

ตารางที่ 2.1 : สมบัติทางกลและความแข็งแรงของไม้ยางพาราเปรียบเทียบกับไม้สัก

คุณสมบัติ		ไม้ยางพารา	ไม้สัก
ความหนาแน่นที่ความชื้น 12%	กรัม/ซม^3	0.60-0.70	0.64
ความชื้นไม้ทดสอบ	%	12	12
การรับแรงดัด			
- ความเค้นในขีดยืดหยุ่น	กก./ซม.^{2}	600	665
- โมดูลัสแตกร้าว	กก./ซม.^{2}	973	1,023
- โมดุลัสยืดหยุ่น	กก./ซม.^{2}	96,000	103,900
- พลังงานชำรุดแตกหัก	กก.-ซม./ซม.^{2}	2.4	1.9
การรับแรงกดขนานเสี้ยน			
- ความเค้นในขีดยืดหยุ่น	กก./ซม.^{2}	328	425
การรับแรงกดตั้งฉากเสี้ยน			
- ความเค้นในขีดยืดหยุ่น	กก./ซม.^{2}	93	92
การรับแรงดึงตั้งฉากเสี้ยน			
- ด้านรัศมี	กก./ซม.^{2}	28	23
- ด้านสัมผัส	กก./ซม.^{2}	29	24
การรับแรงเฉือน			
- ด้านรัศมี	กก./ซม.^{2}	155	124
- ด้านสัมผัส	กก./ซม.^{2}	169	153
ความแข็งผิวหน้า			
- ด้านรัศมี	กก./ซม.^{2}	544	486
- ด้านสัมผัส	กก./ซม.^{2}	532	510
การรับแรงกระแทก			
- น้ำหนักสูดสุดที่ใช้	กก.	149	118
- พลังงานที่ใช้	กก.-ม.	2.9	1.7

ที่มา : อรุณ ชมชาญและคณะ, 2521

2.3.3 การแปรรูปและความยากง่ายในการตกแต่งด้วยเครื่องมือ

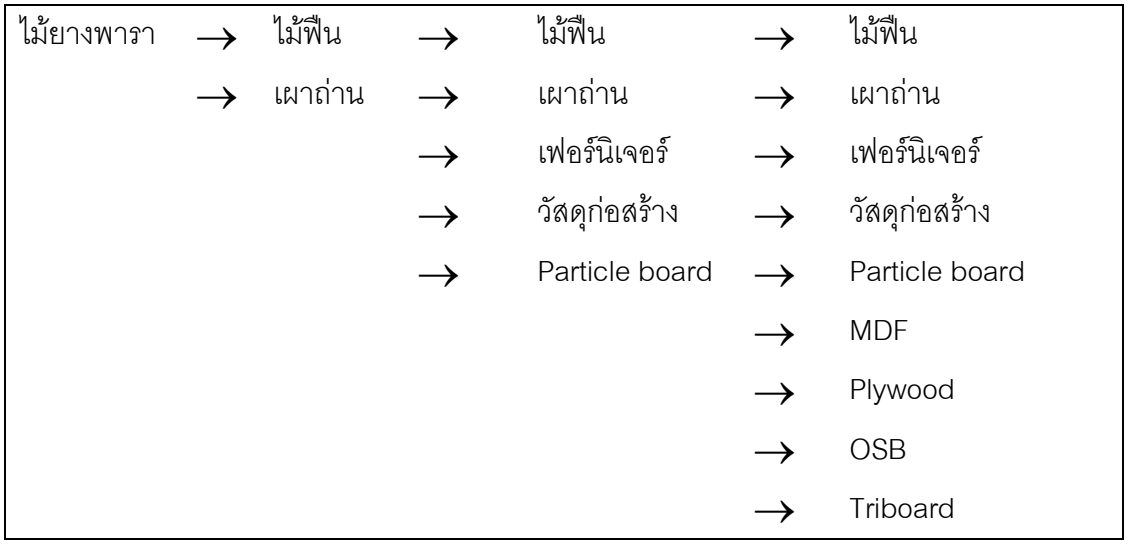
การแปรรูปและตกแต่งด้วยเครื่องมือทำได้ง่าย ผิวด้านมีรอยยุบหรือเสี้ยนเป็นตำหนิตามธรรมชาติบริเวณที่เป็นเสี้ยนสนควรหลีกเลี่ยงเพราะบิดง่ายหรือไสตกแต่งให้เรียบค่อนข้างยาก

2.3.4 การผึ่งและอบแห้ง

ไม้ยางพาราทำให้แห้งได้ค่อนข้างช้า ตำหนิจากการบิดงอมีพอควร เนื้อไม้ถูกทำลายการเชื้อราและแมลงได้ง่าย นิยมอัดน้ำยารักษาเนื้อไม้ก่อนเข้าอบแห้ง การป้องกันการบิดงอทำได้โดยใช้น้ำหนักทับกองไม้โดยใช้ระยะห่างไม้ขั้นประมาณ 45 ซม. สามารถลดตำหนิดังกล่าวให้ขนาดไม้ยางพาราที่แปรรูป มีความหนาประมาณ $1^{1}/_{2}$ นิ้ว เมื่อนำเข้าอบแห้งพร้อมกัน ทำให้แห้งและตำหนิเกิดไม่มากนัก ทั่วไปใช้เวลาอบแห้งประมาณ 6 - 8 วัน จากจุดหมาดถึงความชื้นในไม้ 10% (จุดหมาดของไม้ยางพาราประมาณ 22%)

2.3.5 ตำหนิที่พบในไม้ยางพาราแปรรูป

ลักษณะตำหนิที่พบบ่อยในไม้ยางพาราแปรรูป ได้แก่ การโค้ง (Bow) การโก่ง (Spring) และการบิด (Twist) พันธุ์ยางที่หลากหลายมีอิทธิพลทางธรรมชาติต่อตำหนิไม้ เช่น ตาไม้และตำหนิจากการเจริญเติบโตที่เร็วของต้นยาง ปัจจุบันพบว่าบางสวนยางอายุประมาณ 18 ปี ถูกตัดโค่นลงทำให้เนื้อไม้มีแรงเค้นจากการเจริญเติบโต (Growth Stress) ผลการเจริญอย่างรวดเร็วนี้เซลล์เนื้อไม้ไม่อาจหดหรือขยายตัวได้โดยอิสระทำให้เกิดแรงเค้นสะสมภายในลำต้น หากสังเกตที่ไส้ไม้อยู่ไม่ตรงกลางของลำต้น เนื่องจากการเอียงที่เกิดจากอิทธิพลของกระแสลมและความต้องการแสงของเรือนยอดไส้ไม้ไม่อยู่กึ่งกลางลำต้นเรียกว่า ไม้ปฏิกริยา (Reaction Wood) นอกจากตำหนิที่กล่าวมาแล้ว ยังมีตำหนิที่เกิดจากการกรีดหน้ายางถูกเชื้อราเข้าทำลายเกิดความผิดปกติและรอยแผลที่มีสารสีน้ำตาลปรากฏเป็นตำหนิที่หน้าไม้ไม่เหมาะที่นำมาใช้ประโยชน์



ภาพประกอบที่ 2.7 แผนผังแสดงวิวัฒนาการการใช้ประโยชน์จากไม้ยางพารา

2.3.7 ลักษณะของการไสไม้ยางพารา

2.3.7.1 ไสพื้น (Surfacing) คือ การไสไม้ผิวพื้นไม้ด้านล่างให้ออกมาได้เรียบและตรง ซึ่งมีความสำคัญมากในกระบวนการไสอัตโนมัติสี่หน้า เพราะพื้นผิวด้านนี้เป็นด้านแรกและรองรับระหว่างหน้าโต๊ะเครื่องกับชุดป้อนชิ้นงาน

2.3.7.2 ไสชิด (Jointing) คือ การไสด้านข้างไม้ซึ่งสัมผัสฉากด้านในของเครื่อง เพื่อให้ชิ้นงานได้ฉาก

2.3.7.3 ไสความกว้าง (Widthwise Planing) คือ การไสด้านซ้ายของชิ้นงานให้ตรงขนานกับด้านฉากในและได้ระยะความกว้างที่ต้องการ

2.3.7.4 ไสความหนา (Thickness Planing) คือ การไสไม้โดยหัวกบตัวบน เพื่อให้ได้ขนานกับไสพื้น ในขณะเดียวกันเป็นการไสให้ได้ความหนาที่ต้องการ

2.3.8 ประเภทของการไสเรียบไม้ยางพารา

2.3.8.1 การไสเรียบหนึ่งหน้า คือการไสในส่วนที่เป็นการไสพื้น (Surfacing) เป็นการไสไม้ผิวพื้นไม้ด้านล่าง ให้ออกมาได้เรียบและตรงโดยใช้กบตัวล่าง

2.3.8.2 การไสเรียบสองหน้า คือ การไสในส่วนที่เป็นการไสพื้น (Surfacing) และการ

ไสความหนา (Thickness Planing) เป็นการไสไม้โดยหัวกบตัวบน เพื่อให้ได้ขนานกับไสพื้น ในขณะเดียวกันเป็นการไสให้ได้ความหนาที่ต้องการ

2.3.8.3 การไสเรียบสี่หน้า คือ การไสทั้งสี่ส่วนของไม้คือ ไสพื้น (Surfacing) ไสชิด (Jointing) ไสความกว้าง (Widthwise Planing) ไสความหนา (Thickness Planing) โดยใช้กบทั้งหมดสี่ตัวในการไส

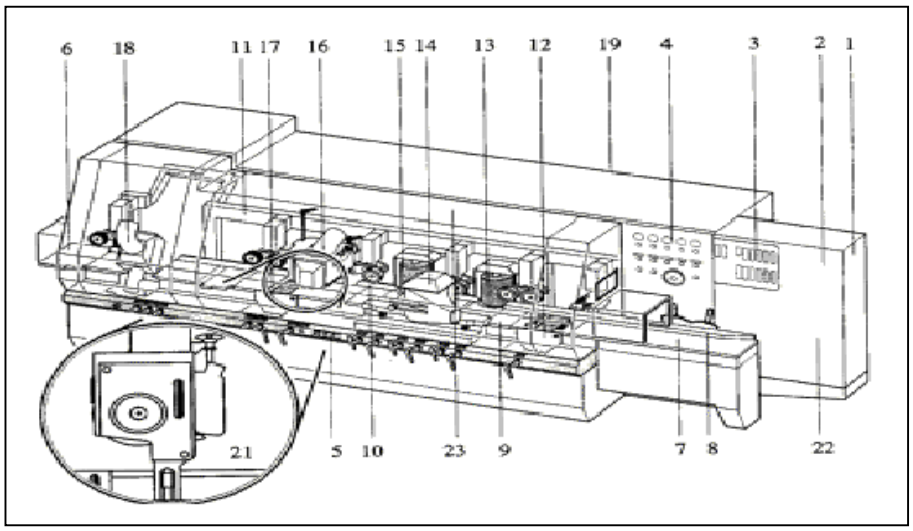
2.4 เครื่องไสไม้สี่หน้า

2.4.1 ข้อมูลของเครื่อง

เป็นเครื่องไม้สี่หน้าอัตโนมัติ ยี่ห้อ WEINIG รุ่น UNIMAT 23 E มีความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 6,000 รอบ/นาที อัตราป้อนชิ้นงานปรับได้ตั้งแต่ 0-36 เมตร/นาที

ภาพประกอบที่ 2.8 เครื่องไสสี่หน้าอัตโนมัติ ยี่ห้อ WEINIG รุ่น UNIMAT 23 E

2.4.1.1 Overview of Machine



ภาพประกอบที่ 2.9 ส่วนประกอบของเครื่องไสไม้สี่หน้า

Machine controls

1 Master switch on control cabinet
2 Control systems (optional)
3 Control panel with Emergency OFF button
4 Pneumatic control panel
4 Pneumatic control panel
5 Control panels

Workpiece guidance

6 Outfeed table driver or
7 Infeed table
8 Edge jointing fence
9 Machine table
10 Machine fence

Spindles

12 First bottom spindle
13 First right-hand spindle
14 First left-hand spindle
15 Second right-hand spindle
16 First top spindle
17 Second bottom spindle
17 Second bottom spindle
18 Universal spindle

Depending on model

19 Hydraulic unit for feed
20 Mechanical feed drive (not illustrated) inside the enclosure
21 Outboard bearing for
11 Feed beam

Protected components for accident prevention

22 Control cabinet, locked by master switch in position“I”
23 Machine hood: machine cuts off when hood is open

2.5 การออกแบบการทดลอง

Ronald A. Fisher เป็นคนค้นคิดการใช้วิธีการทางสถิติสำหรับการออกแบบการทดลองขึ้น เนื่องจากการที่ได้เข้าไปมีส่วนร่วมกับการรับผิดชอบทางสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลที่สถานีทดลองทางการเกษตรรอตทัมสเตต มหานครลอนดอน ประเทศอังกฤษเป็นเวลานานหลายปี Fisher เป็นทั้งผู้พัฒนาและเป็นบุคคลแรกที่นำเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง ในปี ค.ศ. 1933 Fisher ก็ได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์ของมหาวิทยาลัยลอนดอนและเป็นอาจารย์รับเชิญบรรยายให้แก่มหาวิทยาลัยทั่วโลก นอกจาก Fisher จะเป็นผู้บุกเบิกสาขาวิชาการออกแบบการทดลองแล้ว ยังเป็นบุคคลสำคัญอีกจำนวนมากที่มีส่วนในการให้การสนับสนุนสาขาวิชานี้ เช่น F. Yates, R. C.Bose, O. Kempthorne, W. G. Cochran เป็นต้น (Montgomery,1997)

การนำการออกแบบการทดลองไปใช้ในยุคแรก ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ทางการเกษตรและชีวภาพ ซึ่งทำให้คำศัพท์และคำนิยามส่วนมากที่ใช้กันอยู่ทางด้านนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสาขาทางการเกษตรและชีวภาพ อย่างไรก็ตามการนำการออกแบบการทดลองมาใช้งานในทางอุตสาหกรรมครั้งแรกเริ่มปรากฏประมาณช่วง ปี ค.ศ. 1930 ซึ่งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องคืออุตสาหกรรมสิ่งทอ หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ยุติลง วิธีการออกแบบการทดลองก็เริ่มได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและกระบวนการผลิตในสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตก กลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้รับประโยชน์อย่างมากมายในการใช้การออกแบบการทดลองสำหรับงานพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต นอกจากนี้แล้วอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำและอิเล็คทรอนิคส์ก็ยังได้มีการนำเอาวิธีการทดลองนี้ไปใช้งาน และประสบความสำเร็จอย่างมากเช่นกัน หลายปีที่ผ่านมาได้มีการฟื้นฟูความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองขึ้นในสหรัฐอเมริกา เพราะอุตสาหกรรมในอเมริกาจำนวนมากพบว่าคู่แข่งทางการค้าอยู่ในทวีปอื่น ๆ ซึ่งได้ใช้การออกแบบการทดลองมาเป็นเวลานานแล้ว

2.5.1 หลักการพื้นฐาน

การออกแบบการทดลองจะให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ” (Statistical Design of Experimental) คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่

เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถสรุปข้อมูลที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเดียวที่นำมาในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ

1. เรพลิเคชั่น (Replication) หมายถึงการทดลองซ้ำ เรพลิเคชั่นมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลิเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดกลายเป็นหน่วยของการชี้วัดขั้นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมวลผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลิเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมวลผลกระทบนี้

2. แรนดอมไมเซชัน (Randomization) เป็นหลักพื้นฐานสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและลำดับของการออกแบบการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมุติฐานนี้เป็นจริง การที่ทำแรนดอมไมซ์การทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจ ต่าง ๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

2.5.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง มีความจำเป็น

อย่างยิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องในการทดลองต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้า ว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลอย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บนั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา จะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบางครั้งจะต้องหาอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องการเข้าใจปัญหาอย่างชัดเจนเป็นผลอย่างมากต่อการหาคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น

2.5.2.2 การเลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดของเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ดังนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการนั้นอย่างมาก ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรือจากทฤษฎี มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดมีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรจะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองให้มีจำนวนน้อย ๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรของเขตให้กว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตของปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้าง ๆ และเมื่อเราทราบว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ก็อาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

2.5.2.3 เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบนี้ ผู้ทำการทดลองควรแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ หลายครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือทั้งคู่ ของกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรผลตอบ ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบและจะวัดค่าตัวแปรนั้นอย่างไร

2.5.2.4 เลือกการออกแบบการทดลอง การเลือกการออกแบบการทดลองเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดตัวอย่าง (จำนวนเรพลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการใช้การแรนดอมไมเซชัน ในการเลือกทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มแล้วว่า ปัจจัยบางตัวมีผลต่อผลตอบที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่จะเกิดขึ้น

2.5.2.5 ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน หากมีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลอง ถือว่าการทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนการทดลองในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

2.5.2.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการทดลอง เพื่อผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบมาเป็นอย่างดี และทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมานั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทดลองทางสถิติคือ การทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยวัดที่มีประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกแบบมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

2.5.2.7 สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและนำเสนอแนะแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.5.3 การทดลองปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์

การทดลองปัจจัยเดียวเป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว คือมี a ระดับของปัจจัย (a เงื่อนไข) โดยการทดลองเป็นแบบการสุ่มสมบูรณ์ ลำดับการทดลองแบบสุ่มเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการหลีกเลี่ยงผลของตัวแปรรบกวนที่ไม่ทราบค่า ซึ่งบางครั้งอาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไป หรือไม่สามารถควบคุมได้ในขณะทำการทดลอง

2.5.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

หากมีค่าระดับซึ่งแตกต่างของปัจจัยเดียวที่ต้องการศึกษาเปรียบเทียบและค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่ม เราสามารถที่จะอธิบายค่าสังเกตต่าง ๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้นตรง คือ

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \begin{cases} i = 1,2\ldots, a \\ j = 1,2\ldots, a \end{cases} \qquad (2\text{-}6)$$

โดยที่ค่า Y_{ij} คือค่าสังเกตที่ ij

μ คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกกันว่า "มัชฌิมรวม (Overall Mean)"

τ_i คือค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่ i หรือผลกระทบจากระดับที่ i

ε_{ij} คือองค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error)

จุดประสงค์ก็เพื่อที่จะตรวจสอบสมมุติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบต่อระดับต่าง ๆ และทำการประเมินค่า สำหรับการทดสอบสมมุติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติและอิสระต่อกัน ด้วยมัชฌิมเท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว

Treatment (Level)	Observations				Total	Averages
1	Y_{11}	Y_{12}	. . .	Y_{1n}	$Y_{1.}$	$\overline{Y}_{1.}$
2	Y_{22}	Y_{22}	. . .	Y_{2n}	$Y_{2.}$	$\overline{Y}_{2.}$
.	.	.	. . .	.	.	.
.	.	.	. . .	.	.	.
a	Y_{a1}	Y_{a2}	. . .	Y_{an}	Y_{a1}	$\overline{Y}_{a.}$
					$Y_{..}$	$Y_{..}$

แบบจำลองนี้เรียกว่า "การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว" เพราะมีเพียงแค่ปัจจัยเดียวที่นำมาพิจารณา ยิ่งกว่านั้นลำดับในการทดลองจะต้องเป็นแบบสุ่มเพื่อที่จะให้สิ่งแวดล้อมของการทดลองในต่าง ๆ จะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากที่สุด ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบนี้จึงเป็นการทดลองที่เรียกว่า การออกแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design)นอกจากนี้อาจจะต้องมีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ซึ่งเรียกกันว่า "แบบจำลองผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model)"

2.5.3.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวของแบบจำลองแบบผลกระทบคงที่ ผลกระทบของระดับ (τ_i) มีนิยามเหมือนกับส่วนเบี่ยงเบนจากมัชฌิมรวม

$$\sum_{i=1}^{a} \tau_i = 0$$

มัชฌิมของระดับ i คือ $E(Y_{ij}) \equiv \mu_i = \mu + \tau_i$, i = 1, 2, ..., a ซึ่งในการทดสอบความเท่ากันของมัชฌิม a ระดับ คือ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \ldots = \mu_a$$
$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ (i,j)}$$

ถ้าหาก H_0 เป็นจริง ทุกระดับจะมีมัชฌิมที่เท่ากันคือ μ ซึ่งอาจจะเขียนในรูปสมมุติฐานใหม่ในรูปของผลกระทบของระดับ τ_i ได้ดังนี้

$$H_0 : \tau = \tau_2 = \ldots = \tau_2$$
$$H_1 : \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ i}$$

จากการคาดหมายกำลังสองเฉลี่ย พบว่า โดยทั่วไป MS_E จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 ภายใต้สมมุติฐานหลัก $MS_{treatment}$ จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าสมมุติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหมายของ $MS_{treatment}$ จะมากกว่า σ^2 ดังนั้นภายในสมมุติฐานรอง ค่าคาดหมายของตัวตั้งของสถิติทดสอบ จะมากกว่าค่าคาดหมายตัวหาร และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่าสถิติทดสอบมีค่ามากกว่า หรือค่าตกอยู่ในช่วงวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่ด้านขวาของค่าวิกฤต ($F_{\alpha, a-1, N-a}$) ดังนั้นก็จะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่า มีความแตกต่างระหว่างมัชฌิมของระดับถ้า

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$$

เมื่อ

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

ซึ่งค่า F_0 สามารถคำนวณโดยการใช้ค่า P – Value ในการตัดสินใจก็ได้ สูตรสำหรับการคำนวณผลรวมกำลังสองสามารถหาได้จากการลดรูปของ $MS_{treatment}$ และ SS_T ซึ่งจะได้

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N} \qquad (2\text{-}7)$$

และ

$$SS_{treatment} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N} \qquad (2\text{-}8)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมกำลังสองสามารถหาได้ดังนี้

$$SS_E = SS_T - MS_{treatment} \qquad (2\text{-}9)$$

ซึ่งขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-3 ซึ่งเรียกว่า “ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance Table)”

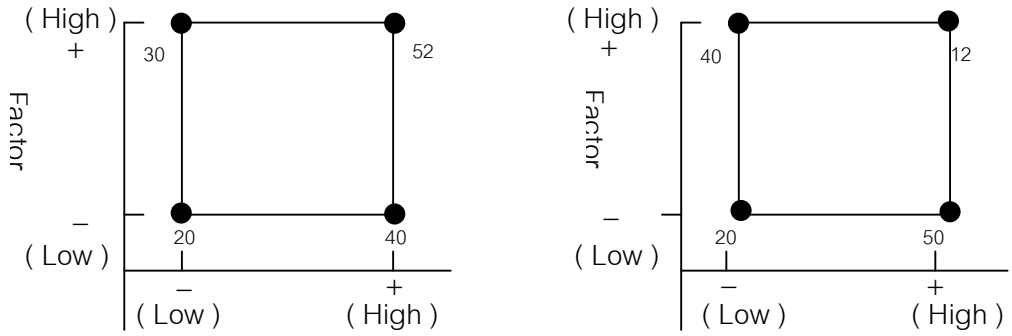
ตารางที่ 2.3 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ Fix Effect Model ตัวแปรเดียว

Source of Variance	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Squares	F_0
Between treatment	$SS_{treatment}$	$a-1$	$MS_{treatment}$	$F_0 = \frac{SS_{treatment}}{SS_E}$
Error	SS_E	$N-a$	MS_E	
Total	SS_1	$N-1$		

2.5.4 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

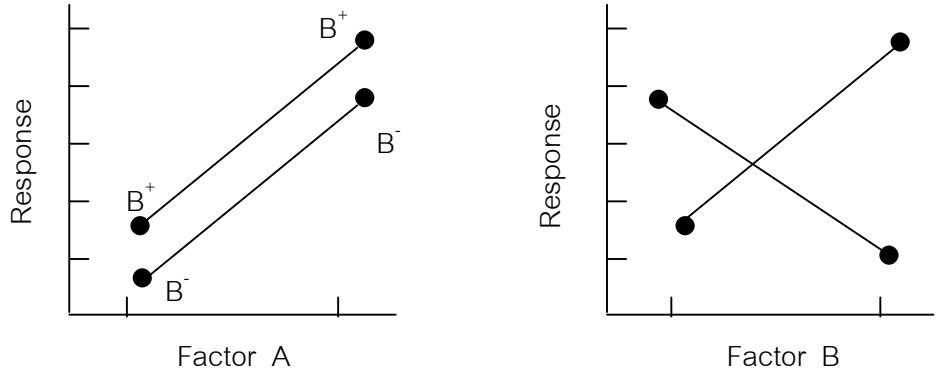
การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น เช่น กรณี 2 ปัจจัยคือ ปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลิเคต จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั้นคือปัจจัยเหล่านั้นมีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องมาจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ในการทดลองบางอย่าง อาจจะพบว่าความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่น ๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึงว่า ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะเกิดขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น เรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง



Factor A Factor B

ภาพประกอบที่ 2.10 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย



การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย (ไม่มีอันตรกิริยา)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (มีอันตรกิริยา)

ภาพประกอบที่ 2.11 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

2.5.4.1 การออกแบบการทดลองเชิงเฟกทอเรียลแบบ 3 ปัจจัย

เป็นการออกแบบการทดลองที่ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี ระดับ b และปัจจัย C มี c ระดับ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลองเท่ากับ abc…n

สำหรับแบบจำลองแบบตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติที่ใช้ F – Test จำนวนขั้นความเสรีสำหรับผลหลักใด ๆ มีค่าเท่ากับระดับของปัจจัยจำนวนระดับลบด้วย 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 3 ปัจจัยได้ดังนี้

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \begin{cases} i = 1, 2..., a \\ j = 1, 2..., b \\ k = 1, 2..., c \\ l = 1, 2..., n \end{cases} \tag{2-10}$$

การคำนวณค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{n} Y_{ijkl}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} \tag{2-11}$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้ดังนี้

$$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i=1}^{a} Y_{i...}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} \qquad (2\text{-}12)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{j=1}^{a} Y_{.j..}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} \qquad (2\text{-}13)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{k=1}^{a} Y_{..k.}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} \qquad (2\text{-}14)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} Y_{ij..}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$= SS_{Subtotals(AB)} - SS_A - SS_B \qquad (2\text{-}15)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{bn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} Y_{i.k.}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$= SS_{Subtotals(AC)} - SS_A - SS_C \qquad (2\text{-}16)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an}\sum_{j=1}^{a}\sum_{k=1}^{b} Y_{.jk.}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$= SS_{Subtotals(BC)} - SS_B - SS_C \qquad (2\text{-}17)$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{n} Y_{ijkl}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B -$$

$$SS_C - SS_{AB} - SS_{BC} - SS_{AC}$$
$$= SS_{Subtotals(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{BC} - SS_{AC} \quad (2\text{-}18)$$

และ

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotals(ABC)} \quad (2\text{-}19)$$

ตารางที่ 2.4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 3 ปัจจัย แบบ Fixed Effect

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	a –1	MS_A	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	b –1	MS_B	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	c –1	MS_C	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	(a –1) – (b – 1)	MS_{AB}	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	(a –1) – (c – 1)	MS_{AC}	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	(b –1) – (c – 1)	MS_{BC}	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	(a –1) – (b – 1) – (c – 1)	MS_{ABC}	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	abc(n – 1)	MS_E	
Total	SS_T	abcn – 1		

2.5.4.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงเฟกทอเรียลใช้งานมากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการที่จะศึกษาถึงผลร่วมที่มีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงเฟกทอเรียลที่มีความสำคัญที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดันหรือเวลา หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวมานั้นจะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่ง ๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้น ๆ ก็ได้ ใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times 2 \ldots \times 2 = 2^K$ ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า “การออกแบบการทดลองเชิงเฟกทอเรียลแบบ 2^K “

2.5.4.2 การออกแบบการทดลองเชิงเฟกทอเรียลแบบ 2^3

เป็นการทดลองที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.5 เมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix)

	Factor			Replicate		
Run	A	B	C	1	2	3
1	-	-	-			
2	+	-	-			
3	-	+	-			
4	+	+	-			
5	-	-	+			
6	+	-	+			
7	-	+	+			
8	+	+	+			

ค่าเฉลี่ยของผลของตัวแปรหลักสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A = \frac{1}{4n}[a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \quad (2\text{-}20)$$

$$B = \frac{1}{4n}[b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (2\text{-}21)$$

$$C = \frac{1}{4n}[c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (2\text{-}22)$$

$$AB = \frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{4n} \quad (2\text{-}23)$$

$$AC = \frac{1}{4n}[(1) - a + b - ab - c + ac - bc - abc] \quad (2\text{-}24)$$

$$BC = \frac{1}{4n}[(1) + a - b - ab - c + ac + bc + abc] \quad (2\text{-}25)$$

$$ABC = \frac{1}{4n}[abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \quad (2\text{-}26)$$

ตารางที่ 2.6 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^K

Source of Variation	Sum of Square	degree of Freedom
k main effect		
A	SS_A	1

Source of Variation	Sum of Square	degree of Freedom
B	SS_B	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
K	SS_K	1
$\left\{ \binom{k}{2} \right\}$ Two – factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
JK	SS_{JK}	1
$\left\{ \binom{k}{3} \right\}$ Three - factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
IJK	SS_{IJK}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$\left\{ \binom{k}{k} \right\}$ = 1 k - factor interactions		
ABC…K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SS_E	$2^k(n-1)$
Total	SS_T	$n2^k - 1$

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^K มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงแรก เมื่อปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบนี้จะทำให้การทดลองมีจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยการใช้การออกแบบการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้นจึงจึงมีการนำการออกแบบการทดลองเชิงเฟกทอเรียลแบบ 2^K มาใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อที่จะกรองปัจจัยที่มีอยู่จำนวนมากให้เหลือน้อยลง นอกจากนี้แล้วการออกแบบการทดลองเชิงเฟกทอเรียลยังมีประโยชน์อีกหลายประการ ทั้งยังเป็นการออกแบบทีมีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองที่ละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงเฟกทอเรียลยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนี้แล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลทำให้เราสามารถประมวลผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้สามารถที่จะสรุปผลได้สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลอง