

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในการศึกษาสภาวะการกลิ้งเหล็กสแตนเลสด้วยไบมีดเซรามิก โดยการให้ความร้อนกับพื้นผิวของชิ้นงานก่อนการกลิ้งด้วยแก๊สออกซิเจนและอะซิทีลีนนี้ มีทฤษฎีที่สำคัญที่จะต้องศึกษา เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการทดลองให้ได้ตามจุดประสงค์ที่ตั้งเอาไว้ เช่น การศึกษาเรื่องอุณหภูมิที่ได้จากแก๊สออกซิเจน-อะซิทีลีน ความเร็วตัดที่เหมาะสมในการกลิ้งเหล็กสแตนเลส เพื่อต้องการทราบว่าอุณหภูมิพื้นผิวชิ้นงานและค่าความเร็วตัด จะส่งผลต่อค่าความขรุขระของพื้นผิวชิ้นงานและทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะใด การทดลองในครั้งนี้ มีทฤษฎีต่าง ๆ ที่จะต้องศึกษาอย่างละเอียด ซึ่งได้แบ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องไว้ดังนี้

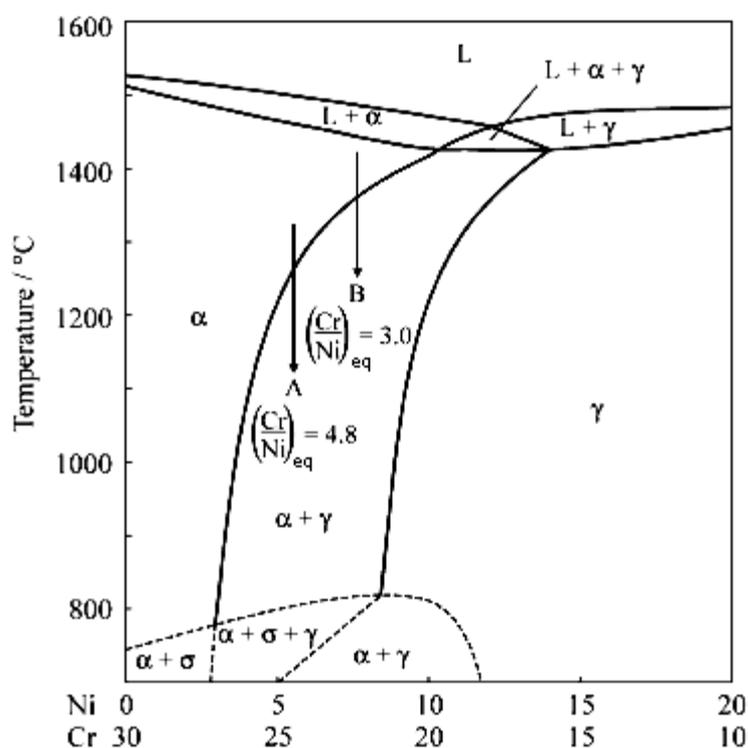
2.1 กรรมวิธีการให้ความร้อนเหล็ก

กรรมวิธีการให้ความร้อน เป็นการให้ความร้อนกับโลหะและทำให้โลหะเย็นตัวลงด้วยอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะนั้น กระบวนการดังกล่าวจะทำให้โลหะมีความแข็งเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อการเสียดสี การกระแทก การกัดกร่อน หรือในทางกลับกันสามารถจะทำให้โลหะที่มีความแข็งมาก มีความแข็งน้อยลงได้ เพื่อให้การตกแต่งด้วยเครื่องจักรกลทำได้ง่ายขึ้น กรรมวิธีการให้ความร้อนยังสามารถกำจัดความเค้น ความเครียด ลดขนาดของเม็ดเกรน เพิ่มความเหนียว เพิ่มความแข็ง หรือการทำให้แข็งเฉพาะผิวได้ การวิเคราะห์คุณสมบัติของโลหะจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ส่วนผสมของโลหะนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเนื้อโลหะจะเป็นธาตุที่บอกประเภทของเหล็กว่าเป็นเหล็กชนิดใด เช่น เหล็กคาร์บอน หรือเหล็กหล่อ และคาร์บอนยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของโลหะ นอกเหนือจากธาตุคาร์บอนแล้วยังมีส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโลหะได้อีกด้วย เช่น โครเมียม แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ทังสแตน ซิลิกอน วาเนเดียม ทองแดง เป็นต้น ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของโลหะและคุณสมบัติที่คาร์บอนไม่สามารถทำได้ [มนัส, 2538] ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้เหล็กสแตนเลส ชนิด ออสเทนนิติก เกรด 304 ก่อนการทดลองได้

นำไปทดสอบส่วนผสมที่มีอยู่ในชิ้นงานที่จะนำมาทดลอง เพื่อให้มั่นใจว่าเหล็กสเตนเลสที่นำมาใช้ มีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนด ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ในเหล็กสเตนเลสที่ใช้ในการทดลอง

	Concentration (%)						
	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
Stainless	0.058	0.292	0.028	0.029	1.679	9.186	18.366
Steel							
	Mo	V	Cu	W	Sn	Co	Al
	0.185	0.088	0.464	0.011	0.010	0.168	0.007



รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัดในแกนแนวตั้งของระบบสมดุลสามเฟสของเหล็กสเตนเลส
ที่มา : Materials Research.(2000).

จากรูปที่ 2.1 แผนภาพระบบสมดุลสามเฟสของเหล็กสเตนเลส ในการทดลองได้นำตัวอย่างเหล็กสเตนเลสไปทำการทดสอบ เพื่อหาส่วนผสมด้วยเครื่อง Scanning Electron

Microscopy ได้ค่าดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ประกอบด้วยส่วนผสมหลักคือ คือ โครเมียม 18.366% และนิกเกิล 9.186% และมีธาตุอื่น ๆ ผสมอยู่เล็กน้อย จะเหลือปริมาณของเหล็ก ประมาณ 70% ที่อุณหภูมิพื้นผิวของชิ้นงานไม่เกิน 300°C จากแผนภาพในรูปที่ 2.1 แสดงว่าเหล็ก สเตนเลสที่นำมาทดลองเป็นสเตนเลสชนิดออสเทนนิติก เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวของเหล็กสเตนเลส เปลี่ยนไปจะทำให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนแปลงไปด้วย จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และส่วนผสมของเหล็กสเตนเลสในขณะพื้นผิวของเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น ตามรูปที่ 2.1 จะเกิด โครงสร้างจุลภาคของเหล็กสเตนเลสได้ 2 โครงสร้าง คือ

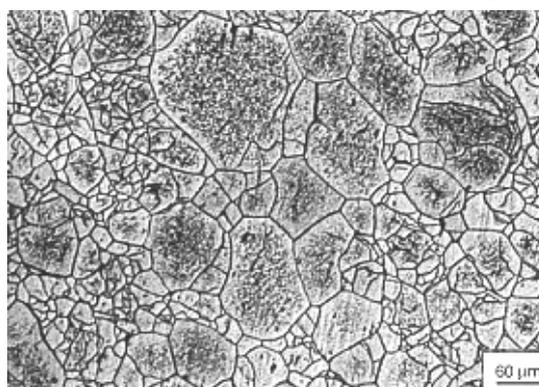
1. ออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างเหล็กสเตนเลสชนิดออสเทนนิติก

ที่มา : http://www.cryoking.co.in/site/micro-structure_how_to.htm

2. เฟอริติก (Ferritic Stainless Steel) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างเหล็กสเตนเลสชนิดเฟอริติก

ที่มา : http://www2.bvs.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522002000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=en

2.1.1 การให้ความร้อนด้วยก๊าซออกซิเจนอะซิเตน

การให้ความร้อนด้วยเปลวไฟกับชิ้นงานด้วยก๊าซออกซิเจนอะซิเตน สามารถให้ความร้อนกับพื้นผิวของชิ้นงานให้มีอุณหภูมิสูงในระยะเวลาอันสั้น เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานเกิดการขยายตัว ด้วยหลักการให้ความร้อนนี้เปลวไฟที่เหมาะสมที่สุด คือ การเผาไหม้ที่เกิดจากแก๊สออกซิเจนและอะซิเตน เมื่อเกิดการเผาไหม้จะให้ความร้อนสูงถึง 3,000 – 3,200 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อใช้เปลวไฟความร้อนที่เหล็กได้รับบริเวณพื้นผิวจะเร็วมาก โดยที่เนื้อเหล็กภายใต้พื้นผิวยังไม่ร้อน เพราะเหล็กสแตนเลสมีสมบัติการถ่ายเทความร้อนอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง หลักการให้ความร้อนกับพื้นผิวเหล็กสแตนเลสที่สำคัญ คือ การเผาโดยตรง ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบหัวเผา และเวลาที่ใช้ในการเผาจะต้องได้รับการควบคุมอย่างดี หลักการโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี คือ [มนัส, 2538]

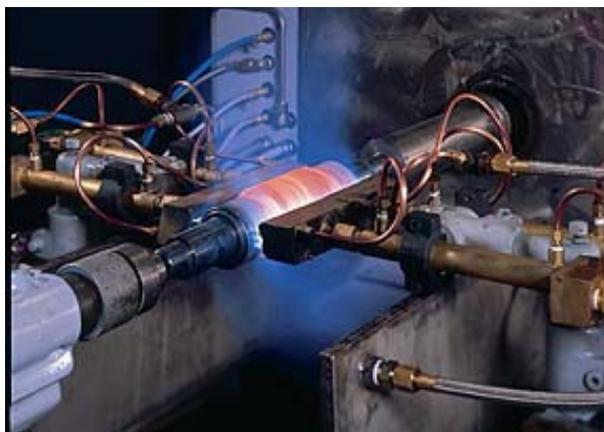
1. การให้ความร้อนแบบง่าย เป็นวิธีการใช้หัวเผาแบบธรรมดาเป่าลงบนพื้นที่ที่จะทำการให้ความร้อน เคลื่อนที่หัวเผาไปมาเพื่อให้ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ แล้วใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิ วัดความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการให้ความร้อนกับชิ้นงานแบบง่าย

ที่มา <http://www.gas-tec.com/applications.html>

2. การให้ความร้อนด้วยวิธีหมุนชิ้นงาน เป็นวิธีที่มีเหมาะสมกับงานทรงกระบอก มีรูปร่างคล้ายคลึงกันทุกด้าน วิธีนี้จะใช้การจับด้วยหัวจับ ลักษณะเหมือนกับเครื่องกลึง อาจะอยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงาน หมุนชิ้นงานด้วยความเร็วคงที่ เผาจนชิ้นงานได้รับความร้อนตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการให้ความร้อนด้วยวิธีหมุนชิ้นงาน

ที่มา <http://www.flametreatingsystems.com/allmeth.htm>

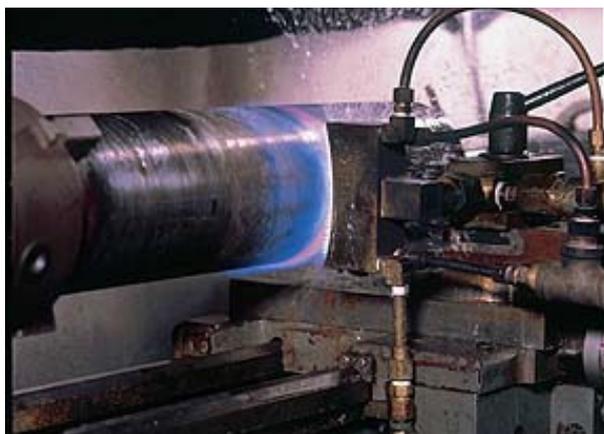
3. การให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง วิธีนี้เหมาะกับการให้ความร้อนที่เป็นพื้นที่ราบ ที่มีความกว้างและยาว ซึ่งไม่สามารถใช้ทั้ง 2 วิธี ข้างต้นได้ หลักการทำงานประกอบด้วยหัวเผา และหัวเผาจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 50-200 m./min ขึ้นอยู่กับความลึกที่ต้องการ หัวเผาอยู่ห่างจากชิ้นงานประมาณ 2-3 mm. เพื่อให้เปลวไฟให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการให้ความร้อนกับชิ้นงานแบบต่อเนื่อง

ที่มา <http://www.flametreatingsystems.com/allmeth.htm>

4. การให้ความร้อนแบบหมุนต่อเนื่อง เหมาะกับการให้ความร้อนเพลลาที่มีความยาวมาก ๆ ใช้วิธีการจับเพลลาให้หมุน ในขณะที่เดียวกันก็จะเคลื่อนที่หัวเผาที่มีลักษณะเป็นวงแหวน และเคลื่อนที่เผางานจนได้อุณหภูมิตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการให้ความร้อนกับชิ้นงานแบบหมุนต่อเนื่อง
ที่มา <http://www.flametreatingystems.com/allmeth.htm>

2.1.2 ชนิดของเปลวไฟในการให้ความร้อน

1. เปลวไฟแบบคาร์บูไรซิ่ง (Carburizing Flame) หรือ เปลวคาร์บอนมาก เป็นเปลวไฟลักษณะเป็นกรวยไฟ 3 ชั้น มีส่วนผสมของอะเซทิลีนมากกว่าออกซิเจนประมาณ 2 : 1 ซึ่งจะให้ค่าความร้อนของเปลวไฟประมาณ 3,150 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงเปลวไฟแบบคาร์บูไรซิ่ง

2. เปลวไฟแบบนิวทรัล (Neutral Flame) หรือเปลวกลาง เป็นเปลวไฟที่มีลักษณะเป็นกรวยไฟ 2 ชั้น มีส่วนผสมของอะเซทิลีนและออกซิเจน ประมาณ 1 : 1 ค่าความร้อนประมาณ 3,315 องศาเซลเซียส เป็นเปลวไฟที่เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ที่สุดและให้ค่าความร้อนมากที่สุด สามารถใช้เชื่อมโลหะได้เกือบทุกชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงเปลวไฟแบบนิวทรัล

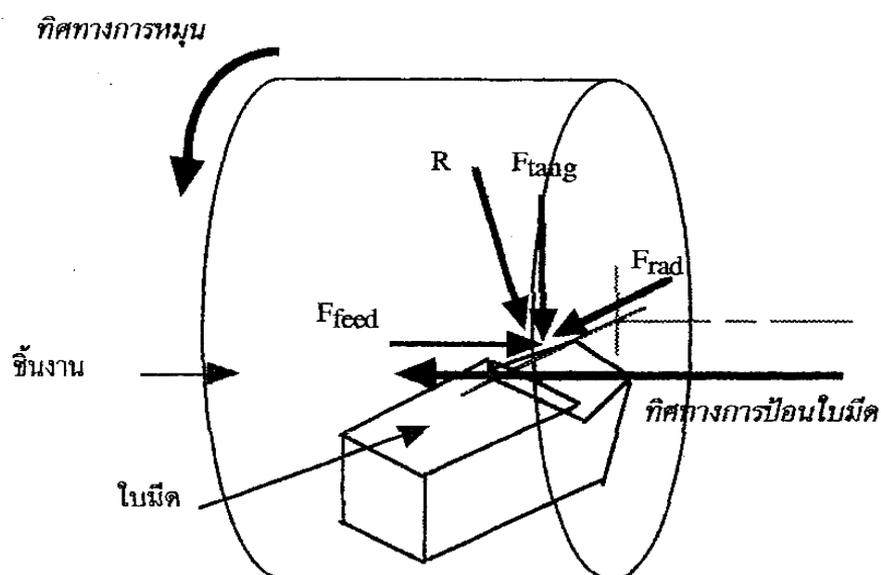
3. เปลวไฟแบบออกซิไดซิง (Oxydizing Flame) เป็นเปลวไฟที่มีลักษณะเป็นกรวยไฟ 2 ชั้น กรวยไฟชั้นในจะมีลักษณะปลายแหลมและสั้นกว่ากรวยไฟชั้นในของเปลวกลาง มีส่วนผสมของ อะเซทิลีนต่อออกซิเจนประมาณ 1 : 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงเปลวแบบไฟออกซิไดซิง

2.2 หลักการพื้นฐานในการตัดโลหะ

จากหลักการพื้นฐานในการตัดโลหะ [ศุภโชค, 2543] พบว่าแรงและกำลังอาจแปรเปลี่ยนไปตามตัวแปร 2 ประเภท ประเภทแรกคือ ตัวแปรเชิงเรขาคณิต (Geometrical Variable) ซึ่งได้แก่ มุมต่างๆของใบมีดเป็นต้น ส่วนประเภทที่ 2 คือตัวแปรสภาวะการตัด ซึ่งครอบคลุมความเร็วในการตัด (Cutting Speed) อัตราการป้อนใบมีด (Feed หรือ Feed Rate) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) และสภาวะการหล่อเย็น (Cutting Fluid Application) ซึ่งหมายถึงสภาวะของการใช้น้ำยาหล่อเย็น เช่น ใช้น้ำยาประเภทใด ฉีดน้ำยาอย่างไร ด้วยความเร็ว ความดัน หรืออัตราปริมาณเท่าไรเป็นต้น นอกจากนี้แล้ว วัสดุใบมีดและวัสดุชิ้นงานก็เป็นตัวแปรสภาวะการตัดที่สำคัญ ที่มีผลต่อความขรุขระของพื้นผิวและความคลาดเคลื่อนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ จำกัดลักษณะทางเรขาคณิตของใบมีดไว้ให้มีลักษณะเดียวเพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองจนเกินไป กลึงเหล็กสเตนเลสชนิด ออสเทนนิติก โดยกลึงแห้งในอากาศไม่ใช้น้ำยาหล่อเย็น ดังนั้นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อแรงและกำลังในการวิจัยครั้งนี้จึงมีเฉพาะตัวแปรสภาวะการตัด



รูปที่ 2.11 แสดงแรงตัดในการกลึงผิวทรงกระบอก

ที่มา : [ศุภโชค, 2543]

เมื่อกล่าวถึงการกลิ้งนั้น งานกลิ้งปอกผิวทรงกระบอกเป็นงานตัดวัสดุที่ใช้กันมากที่สุดงานหนึ่ง แรงที่ขึ้นงานกระทำบนคมมีดนิยมจำแนกออกเป็น 3 แรงย่อยในทิศทางตั้งฉากกัน คือแรงในทิศทางของเส้นสัมผัสกับเส้นรอบวงของพื้นที่หน้าตัด (Tangential Force, F_{tang}) แรงในทิศทางของการป้อนชิ้นงานเข้าหาคมมีด (Feed Force, F_{feed}) และแรงในทิศทางของเส้นรัศมี (Radial Force, F_{rad}) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

เมื่อนำการวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์โดยพิจารณาจากลักษณะทางเรขาคณิตดังในรูปที่ 2.11 และเทียบเคียงกับการตัดเฉียงโดยใบมีดคมเดียวจะพบว่า แรงตัด F_{tang} , F_{feed} และ F_{rad} จะแสดงได้โดยสมการดังต่อไปนี้ [ศุภโชค, 2543]

$$F_{tang} = F_p + F_{pe} \quad (2-1)$$

$$F_{feed} = (F_Q + F_{Qe}) \cos \Psi + (F_R + F_{Re}) \sin \Psi \quad (2-2)$$

$$F_{rad} = (F_p + F_{pe}) \sin \Psi - (F_R + F_{Re}) \cos \Psi \quad (2-3)$$

เมื่อ F_p คือ แรงพลัง (Power Force)

F_Q คือ แรงย่น (Thrust Force)

F_R คือ แรงด้านข้าง (Side Force)

Ψ คือ มุมหน้ามีด

โดยที่ F_p , F_Q และ F_R เป็นแรงตัดเมื่อพิจารณาเทียบเคียงเป็นการตัดเฉียงโดยใบมีดคมสนิท F_{pe} , F_{Qe} และ F_{Re} เป็นแรงตัดส่วนที่เกิดจากใบมีดไม่คมสนิทอย่างแท้จริง

ในทางปฏิบัติการคำนวณแรงโดยการวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์มีความซับซ้อน จึงมีความนิยมที่จะสร้างสมการที่ค่อนข้างจะง่ายจากผลการทดลองตัดวัสดุแล้วนำไปใช้คำนวณค่าแรงรูปแบบหนึ่งที่อยู่จักกันดีก็คือรูปแบบของสมการเอกซโปเนนเชียล [ศุภโชค, 2543] นั่นคือ

$$F_{tang} = 10^{e_{0t}} v^{e_{vt}} f^{e_{ft}} d^{e_{dt}} \quad (2-4)$$

$$F_{feed} = 10^{e_{0r}} v^{e_{vr}} f^{e_{fr}} d^{e_{dr}} \quad (2-5)$$

$$F_{red} = 10^{e_{0f}} v^{e_{vf}} f^{e_{ff}} d^{e_{df}} \quad (2-6)$$

เมื่อ v เป็นความเร็วของการตัด f เป็นอัตราป้อน d เป็นความลึกของการตัด $e0t$, $e0r$, $e0f$, evt , evr , evf , eft , efr , eff , edt , edr , และ edf เป็นค่าคงตัวที่ทราบจากผลการทดลองตัดวัสดุ ซึ่งจากการทดสอบสมการดังกล่าวข้างต้นในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์พบว่า สมการใช้ได้ดีกับใบมีดซีบีเอ็นและใบมีดเพชร ครอบคลุมวัสดุหลายชนิดรวมทั้งอะลูมิเนียมและทองเหลืองด้วย

2.3 ใบมีดเซรามิก (Ceramic Tool)

เซรามิกที่ใช้ทำใบมีดในสมัยเริ่มแรก จะเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 เริ่มนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประมาณปี พ.ศ. 2440 คือพร้อม ๆ กับเหล็กกล้าไฮสปีด แต่ในยุคแรกๆ ไม่ได้รับการนำไปใช้งานมากนักเนื่องจากเปราะและแตกหักง่ายมาก ปัจจุบันนี้มีการนำใบมีดเซรามิกมาใช้งานบ้าง แต่ก็ยังไม่สู้จะแพร่หลาย และใช้เฉพาะในการตัดชิ้นงานเหล็กหล่อ เหล็กชนิดแข็ง และโลหะอัลลอยที่ทนความร้อนสูง ซึ่งเป็นวัสดุที่ตัดยากเท่านั้น สมบัติที่เด่นของใบมีดเซรามิก ก็คือ มีความแข็งสูง คงความแข็งไว้ได้ดีที่อุณหภูมิสูง ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับวัสดุชิ้นงานส่วนมาก ยกเว้นเซรามิกบางชนิดกับเหล็กกล้าบางชนิด สามารถตัดโดยใช้ความเร็วสูงมาก โดยที่ใบมีดใช้งานได้ทนทาน ในสภาวะการตัดที่เหมาะสม ใบมีดเซรามิกจะตัดวัสดุออกไปได้อย่างรวดเร็ว

สมบัติอื่น ๆ ที่น่าสนใจของเซรามิก ได้แก่ ความหนาแน่นน้อยเมื่อเทียบกับโลหะ คือประมาณ 1/3 ของโลหะ มีความต้านทานการดึงต่ำมากคือเป็นวัสดุเปราะที่ทนความเค้นของแรงดึงได้ไม่ดี โมดูลัสของเซรามิกบริสุทธิ์จะสูง คือมีความยืดสูงกว่าเหล็กกล้า 2 เท่า หมายความว่าเมื่อมีความเค้นมากกระทำขนาดเท่าๆ กัน เซรามิกจะยืดหรือหดตัวน้อยกว่าเหล็กกล้า และมีค่าความนำความร้อนต่ำกว่าเหล็กกล้ามาก คือ มีความเป็นฉนวนความร้อนดีกว่าเหล็กกล้า แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.3.1 เซรามิกที่มีอลูมิเนียมออกไซด์เป็นหลัก (Al_2O_3 Based Ceramics)

หรือ ชนิด A ยังแบ่งเป็นชนิดย่อย ๆ 3 ชนิด กล่าวคือ [ศุภโชค, 2543]

1. เซรามิกชนิดบริสุทธิ์ หรือชนิด A1 เป็นเซรามิกรุ่นดั้งเดิม ใช้อลูมิเนียมออกไซด์เพียงอย่างเดียว ไม่มีเซรามิกอย่างอื่นเจือปน มีความแข็งแรงต่ำ ความเหนียวน้อยหรือเปราะมาก มีค่าการนำความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้ใบมีดแตกหักง่าย ไม่ทนทานต่องานตัดวัสดุ ถ้าเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์ลงเพียงเล็กน้อย ก็เพิ่มพูนคุณสมบัติของเซรามิกให้ดีขึ้น คือเหนียวขึ้น นอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าหากมีช่องว่างหรือโพรงอากาศในเนื้อเซรามิก ใบมีดจะกะเทาะและแตกหักเร็วขึ้นกว่าปกติ ใบมีดเซรามิกชนิดนี้เป็นชนิดดั้งเดิมที่มีใช้น้อยลง และถูกแทนที่โดยใบมีดเซรามิกชนิดอื่นๆ ที่ทันสมัยกว่า

2. เซรามิกชนิดผสม หรือชนิด A2 ใช้ alumina ออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ แต่มีเซรามิกอย่างอื่น คือ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) และไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) มี alumina เจือปนลงไป 20 – 40 % เซรามิก ชนิดผสมที่มี alumina ออกไซด์เป็นส่วนผสมหลักนี้ มีความแข็งแรงสูง ความเหนียวสูง และค่าการนำความร้อนสูงกว่าเซรามิกที่เป็น alumina ออกไซด์บริสุทธิ์ ซึ่งทำให้ไบมีดมีดทนทานขึ้น ไบมีดเซรามิกชนิดนี้เป็นชนิดที่นิยมใช้กันมาก

3. เซรามิกชนิดเสริมแรงหรือชนิด A3 ใช้ Al_2O_3 เป็นหลัก และใช้เส้นใยซิลิกอนคาร์ไบด์ผสมลงไปด้วยประมาณ 30% เส้นใยนี้เป็นผลึกเดี่ยวที่มีความยาวกว่า 0.020 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.001 mm เส้นใยจะทำให้เกิดโครงสร้างเสริมแรง (Re-Inforced Structure) ซึ่งส่งผลให้เพิ่มความแข็งแรง เพิ่มความเหนียว และเพิ่มความต้านการใช้งานได้ดีในการตัดชิ้นงานได้ดีในการตัดชิ้นงานที่ตัดยาก เช่น ชิ้นงานโลหะอัลลอยที่ทนอุณหภูมิสูง เหล็กกล้าชุบแข็งและเหล็กหล่อในมีดเซรามิกที่กำลังพัฒนา และคาดว่าจะเป็นที่นิยมใช้มาก

2.3.2 เซรามิกที่มีซิลิกอนไนไตรด์เป็นหลัก (Si_3N_4 Based Ceramics) หรือชนิด B เซรามิก ชนิด B นี้ จะมีคุณสมบัติเยี่ยมในการคงความแข็งที่อุณหภูมิ คือดีกว่า เซรามิกชนิด A แต่จะมีปัญหาที่ว่าเซรามิกชนิด B อาจจะทำปฏิกิริยาเคมีกับชิ้นงานเหล็กกล้า เซรามิกชนิดที่มีซิลิกอนไนไตรด์เป็นหลักนี้ เหมาะกับการตัดเหล็กหล่อเทา (Grey Cast Iron) เพราะสามารถตัดด้วยความเร็วสูง คือ สูงถึง 450 m/min

ไบมีดเซรามิก ไม่นิยมใช้ตัดชิ้นงานเหล็กกล้าธรรมดาต่างๆ ไป เพราะเซรามิกบางชนิดทำปฏิกิริยาเคมีกับเหล็กกล้า เป็นผลให้สึกหรอเร็ว ดังนั้นในการกลึงเหล็กกล้าจึงนิยมใช้ไบมีดคาร์ไบด์ชนิดเคลือบผิวเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามถ้าเลือกสภาวะการตัดเหมาะสม ไบมีดเซรามิกก็สามารถใช้ตัดวัสดุชิ้นงานโลหะในกลุ่มบางชนิดได้ เช่น เหล็กหล่อ หรือเหล็กอัลลอยด์

ตารางที่ 2.2 แสดงแนวทางการเลือกใช้ไบมีดเซรามิกตัดโลหะในกลุ่มเหล็ก

วัสดุชิ้นงาน	ชนิดของไบมีดเซรามิก			
	A1	A2	A3	A4
	$I_2O_3+ZrO_3$	$Al_2O_3+TiC+TiN$	$Al_2O_3 + SiC$	Si_3N_4
เหล็กหล่อทั่วไป	ใช้ได้	ใช้ได้	ไม่ควรใช้	ใช้ได้
เหล็กหล่อชนิดแข็ง	ไม่ควรใช้	ใช้ได้	ใช้ได้	ไม่ควรใช้
โลหะอัลลอยทนอุณหภูมิสูง	ไม่ควรใช้	ใช้ได้	ใช้ได้	ไม่ควรใช้
เหล็กกล้าชุบแข็ง	ไม่ควรใช้	ใช้ได้	ใช้ได้	ไม่ควรใช้
เหล็กกล้าต่างๆ ไป	ไม่ควรใช้	ไม่ควรใช้	ไม่ควรใช้	ไม่ควรใช้

2.4 อายุการใช้งานใบมีดตัด

ในการศึกษาเรื่องอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวชิ้นงานในการกลึงเหล็กสเตนเลสด้วยใบมีดเซรามิก จำเป็นจะต้องให้ความร้อนด้วยเปลวไฟออกซิเจน+อะเซทิลีนกับชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทำให้มีดที่ตัดชิ้นงานได้รับความร้อน ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาอายุของมีดเมื่อได้รับความร้อน จะมีอายุการใช้งานลดลงหรือไม่ ในการตัดวัสดุจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่จะนำมาตัดและคุณสมบัติของมีดตัดเพื่อให้การตัดวัสดุมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการผลิต ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางด้านอายุการใช้งานของมีดเซรามิกในการตัดวัสดุ ว่ามีอายุการใช้งานอย่างไร สามารถใช้งานได้นานเท่าไร (ชั่วโมงในการตัดวัสดุ) การสึกหรอที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะวางแผนการตัดได้ถูกต้อง อายุการใช้งานของใบมีดตัดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลักษณะของการหมัดอายุ ความง่ายในการตัดวัสดุชิ้นงานและตัวแปรที่เกี่ยวกับสภาวะการตัด เช่น ความเร็วในการตัด อัตราป้อน ความลึกในการตัด ชนิดน้ำหล่อเย็นและอัตราการฉีดน้ำหล่อเย็น เป็นต้น

2.4.1 หน่วยวัดอายุคมมีด (Unit of Tool Life) หน่วยที่นำมาใช้วัดหรือบ่งชี้อายุคมมีดมีอยู่มากมาย ดังนี้ [ศุภโชค, 2543]

1. เวลาในการตัดจริงจนคมมีดหมดสภาพการใช้งาน (Actual Cutting Time to Failure) หมายถึง เวลาที่คมมีดผ่าลงบนชิ้นงานจริง ๆ นิยมใช้หน่วยเป็นนาที (min) การระบุโดยเวลาตัดจริงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป ใช้กับกรรมวิธีการผลิตที่คมมีดสัมผัสกับชิ้นงานอย่างต่อเนื่องระยะเวลาในการตัด เช่น การกลึง การไส การเจาะด้วยดอกสว่าน

2. เวลาทั้งหมดในการตัดจนใบมีดหมดสภาพการใช้งาน (Total Time to Failure) หมายถึง เวลาทั้งหมดที่ใช้เครื่องจักรกล ไม่ว่าจะเป็นเวลาที่มีดตัดชิ้นงานหรือไม่ก็ตาม นิยมใช้กับกรรมวิธีการที่คมมีดสัมผัสกับชิ้นงานอย่างไม่ต่อเนื่องระหว่างการตัด เช่น การกัด ซึ่งการหาเวลาในการกัดจริงทำได้ยาก

3. ความยาวชิ้นงานที่ถูกตัดออกตั้งแต่เริ่มตัดจนหมดอายุ นิยมวัดเป็นหน่วยเมตรหรือฟุต ตามแต่ผู้ใช้นิยม เป็นวิธีการที่เข้าใจง่ายในการใช้งานในอุตสาหกรรม และเหมาะกับกรณีการตัดวัสดุด้วยความเร็วสูง ที่เวลาของอายุคมมีดอาจจะสั้น เช่น หมัดอายุภายในเวลาไม่เกิน 1 นาที แต่ก็สามารถผลิตชิ้นงานได้เป็นจำนวนมากมาย เนื่องจากผลิตด้วยความเร็วและอัตราป้อนสูงมาก

4. ปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกตัดออกไปตั้งแต่เริ่มตัดจนคมมีดหมดอายุ วัดเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร ลูกบาศก์นิ้วหรือแล้วแต่ผู้ใช้งานต้องการ เป็นอีกหนึ่งวิธีที่เข้าใจง่ายในการใช้งานในอุตสาหกรรม

5. จำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ก่อนที่คมมีดจะหมดอายุ เป็นวิธีที่สะดวกและเข้าใจง่ายในการวางแผนและควบคุมการผลิตในโรงงาน และง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์นับจำนวนชิ้นส่วนที่ผลิตได้

2.4.2 เกณฑ์ตัดสินว่าคมมีดหมดอายุ (Tool Life Criterion)

โดยทั่วไปเกณฑ์ในการตัดสินว่าคมมีดหมดอายุแล้วก็คือการที่คมมีดไม่สามารถตัดชิ้นงานให้เป็นชิ้นส่วนที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการ ซึ่งอาจจะหมายความอย่างใดอย่างหนึ่งดังต่อไปนี้

1. คมมีดแตกหักโดยสิ้นเชิง (Total Failure) ใช้งานต่อไปไม่ได้และอาจจะเป็นอันตราย
2. คมมีดเกิดการร้าว (Cracking) หรือการกะเทาะ (Chipping) ใกล้เคียงแตกหัก ต้องเลิกใช้งานก่อนจะแตกหักจริงจนเป็นอันตราย
3. คมมีดสึกหรอมากหมดสภาพการใช้งาน หรือใกล้เคียงแตกหักแล้ว การวัดค่า “ขนาดความสึกหรอ” เป็นเรื่องยุ่งยาก เพราะใบมีดมีลักษณะการสึกหรอมากมายหลายรูปแบบ จำเป็นต้องเลือกวิธีการวัดอย่างใดอย่างหนึ่งโดยมีวิธีที่ชัดเจนสามารถทำซ้ำหรือตรวจสอบได้
4. รอยแถบลึก ที่ผิวด้านหลังมีดหรือผิวหลังของคมมีด มีขนาดสูงเกินค่าที่ยอมรับได้ ถ้าชิ้นนี้ใช้คมตัดต่อไป จะเสี่ยงต่อการที่คมมีดแตกหัก
5. ความลึกของหลุมรอยสึกหรือความกว้างของหลุมที่ผิวหน้ามีดมีขนาดสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ถ้าใช้คมมีดตัดต่อไปก็เสี่ยงต่อการแตกหักของคมมีด
6. ปริมาตรหรือน้ำหนักของรอยสึก มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้
7. ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมาแล้ว มีขนาดผิดไปจากค่าที่กำหนดเกินกว่าที่จะยอมรับได้
8. ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมาแล้ว มีค่าความขรุขระของพื้นผิวเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้

2.4.3 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ต่ออายุของคมมีด

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออายุคมมีดตัดมีหลายตัวแปรแต่อาจจะแบ่งพิจารณาเป็นประเภทต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ตัวแปรต่อสภาวะการตัด เป็นตัวแปรที่มักจะใช้ควบคุมใน กรรมวิธีการผลิตและจำเป็นที่ต้องเลือกค่าที่เหมาะสม เช่น ความเร็วในการตัด อัตราป้อนชิ้นงานและความลึกในการตัด

2. ลักษณะทางเรขาคณิตของคมมีด ได้แก่ขนาดระยะทางเส้นตรงและมุมต่าง ๆ ของใบมีด โดยทั่วไปเป็นที่เข้าใจกันว่าภายใต้สภาวะผสมหนึ่งของ สารใบมีดสารชิ้นงาน สารหล่อเย็น จะมีค่าที่เหมาะสมที่สุดของมุมมีดแต่ละมุม รวมทั้งค่าของรัศมีมุมมีด ดังตัวอย่างในกรณีของมีดกลึง แต่เป็นการยากที่จะทราบค่าที่เหมาะสมที่สุดมีค่าเท่าใดแน่ โดยปกติผู้ตัดวัสดุมักจะถือเอาหรือสมมุติเอาว่ามุมต่าง ๆ ของใบมีดที่ผู้ผลิตใบมีดแนะนำให้เลือกมาใช้งาน จะเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด แต่ทั้งนี้อาจจะจริงหรือไม่จริงก็ได้

3. วัสดุใบมีด วัสดุที่มีความแข็งกว่าจะเข้าลึกหรือช้ากว่า ดังนั้นวัสดุใบมีดที่แข็งกว่ามักจะมีอายุการใช้งานนานกว่าวัสดุใบมีดที่อ่อนกว่า แต่ต้องมีการไม่เกิดการกะเทาะ แตกหักหรือร้าว

4. วัสดุชิ้นงานที่มีความแข็งโดยเฉลี่ยสูง จะทำให้ใบมีดสึกหรือเร็วและอายุการใช้งานคมมีดสั้น ยกเว้นกรณีที่สารชิ้นงานที่มีเนื้อแข็งมากหรืออ่อนมากปนกันอยู่

5. น้ำยาหล่อเย็น โดยทั่วไป การใช้น้ำยาหล่อเย็นชนิดบริเวณคมมีดจะช่วยลดอุณหภูมิของคมมีดทั้งผิวหน้ามีดและหลังมีด การลดอุณหภูมิจะทำให้อัตราการสึกหรือของคมมีดลดลง

6. ความสามารถของเครื่องจักรในการควบคุมอัตราป้อน ในกรณีเครื่องจักรธรรมดา การควบคุมอัตราป้อนระหว่างการกัดคมมีดเข้าสู่เนื้อชิ้นงานและการถอนคมมีดออกจากเนื้องานเป็นการควบคุมด้วยมือซึ่งทำได้ยาก ในกรณีเครื่องจักร CNC การควบคุมอัตราการป้อนทำได้ง่ายกว่าและลดการแตกหักได้น้อยกว่า

2.4.4 เกณฑ์การวัดอายุคมตัดมีดเซรามิกของ ISO

เนื่องจากการกำหนดเกณฑ์การหมดอายุของมีดมีความหลากหลาย ยากแก่การนำเกณฑ์การเปรียบเทียบกัน ISO ได้สร้างมาตรฐานเกี่ยวกับเกณฑ์การหมดอายุของคมตัดไว้ ในกรณีใบมีดปลายเดี่ยวคมตัดที่ใช้แท้จริงจะมีสองคม คือ คมตัดหลัก (Major Cutting Edge) และคมตัดรอง (Minor Cutting Edge) โดยจะพิจารณาการสึกหรือที่เกี่ยวข้องกับคมตัดหลัก และการสึกหรือที่คมตัดหลักจะเกิดขึ้น 2 บริเวณ บริเวณแรกคือ ที่ผิวหน้ามีดหลังคมตัดหลัก การสึกหรือจะ

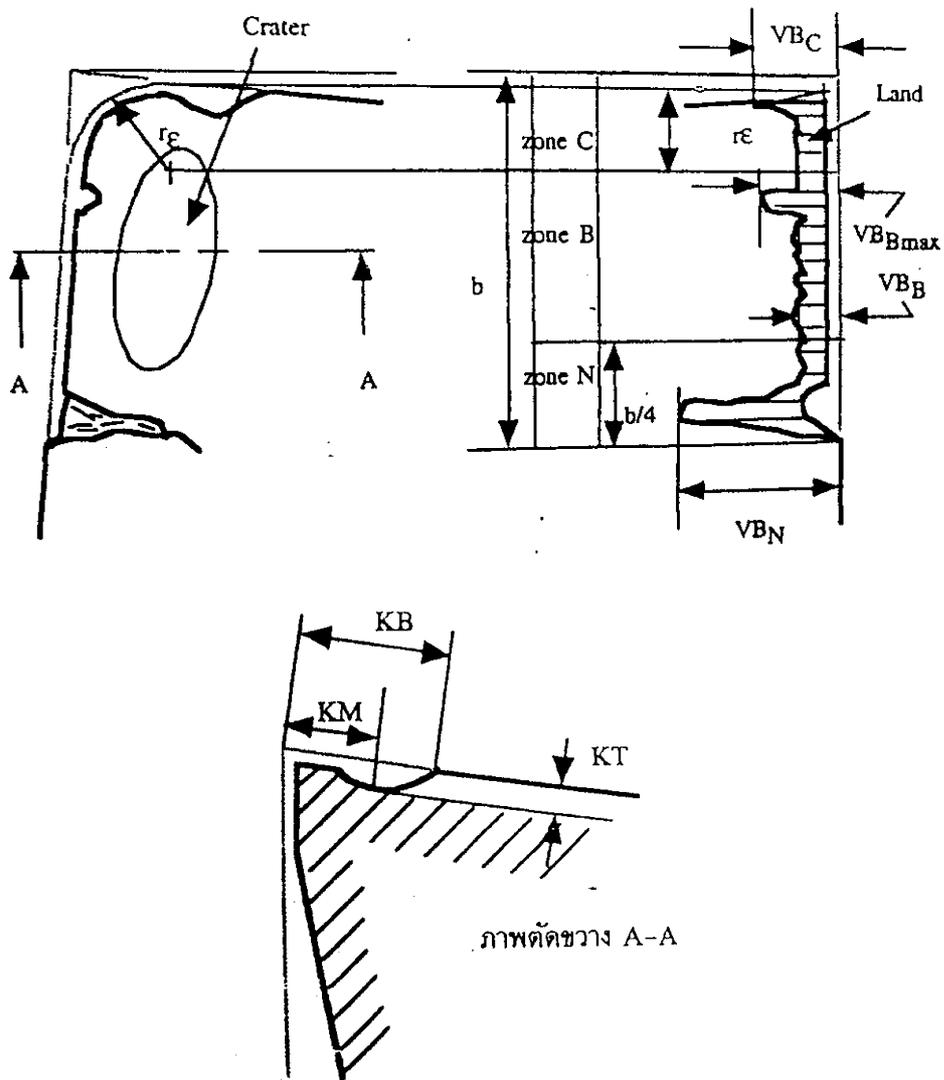
เป็นหลุม (Crater Wear) รูปร่างรีมีทิศทางขนานกับคมตัด ลักษณะและขนาดของหลุมจะระบุโดยค่าระยะห่างสุดของขอบหลุมวัดจากคมมีด (KB), ระยะห่างจากคมมีดถึงกึ่งกลางหลุม (KM) และความลึกสุดของหลุม (KT) ซึ่งในทางปฏิบัติในการหาอายุการใช้งานของมีดจะใช้ค่า KT ส่วนบริเวณที่สอง คือ ผิวหลังของคมตัดหลัก ลักษณะการสึกจะสึกเป็นแถบ (Land Wear) มีความยาว (b) ไปตามคมตัด ในการสึกเป็นแถบพบว่าความกว้างของแถบที่สึกหรือไม่สม่ำเสมอกันโดยแบ่งออกเป็น 3 โซน คือ โซน C บริเวณจมูกของมีดการสึกหรือจะยาวมากกว่าปกติ เป็นรูปคลื่นยอดแหลม ความสูงของยอดแหลมจะระบุโดยค่า VB_C โซน B บริเวณตอนกลางการสึกหรือส่วนมากจะสม่ำเสมอระบุได้โดยค่า VB_B หรือถ้าเกิดคลื่นยอดแหลมก็ให้ใช้ค่ายอดสูงสุด $VB_{B\ max}$ และโซน N ซึ่งเป็นโซนในสุดห่างจากรอยสึกด้านในสุดไปทางปลายมีดเป็นระยะทาง $\frac{1}{4}$ ของความยาวรอยสึก b ที่โซน N การสึกจะมีคลื่นยอดแหลมสูงมาก ระบุค่าโดย VBN

ลักษณะการสึกของใบมีดเซรามิก คมมีดจะหมดอายุเมื่อเกิดสภาวะอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้

1. ใบมีดแตกหักจริง ๆ
2. ค่าความสึกเฉลี่ยของ $VB_B = 0.3$ มิลลิเมตร ถ้าผิวหลังคมมีดในโซน B สม่ำเสมอ
3. ค่าความลึกสูงสุด $VB_B\ max = 0.6$ มิลลิเมตร ถ้าผิวหลังคมมีดในโซน B ไม่สม่ำเสมอ มีรอยขีดข่วน กะเทาะ หรือเป็นร่องลึก

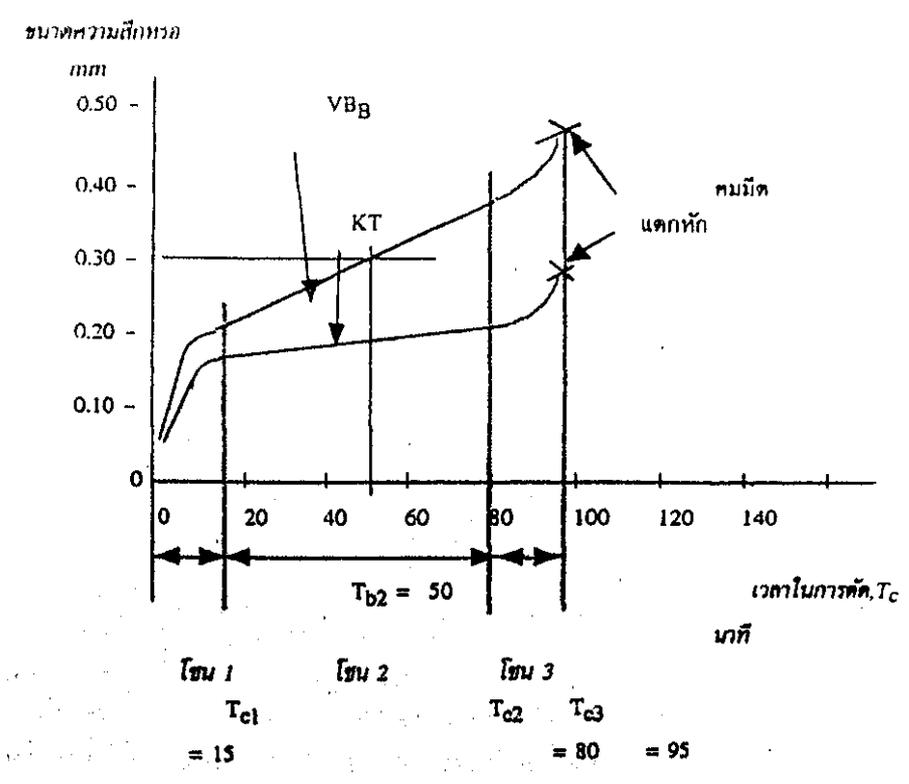
2.4.5 การสึกหรือของใบมีด

จากการทดลองกลึงโลหะ เมื่อกำหนดอัตราการป้อน (Feed) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) และความเร็วตัด (Cutting Speed) แล้วทำการกลึงวัดค่าการสึกหรือ VB_B และ KT และค่าเวลาในการตัด (Cutting Time, T_c) แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรือกับเวลาในการตัด

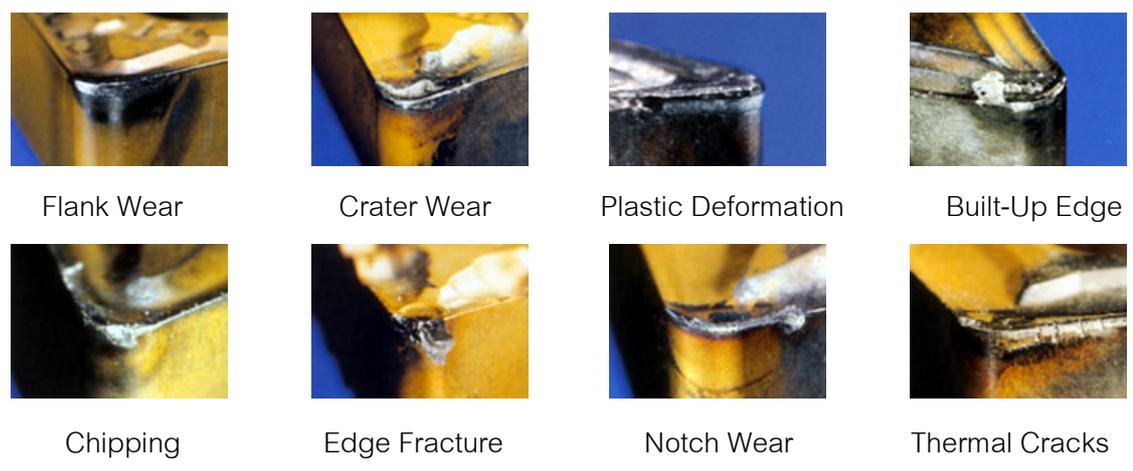


รูปที่ 2.12 แสดงรอยลึกตามแนวความคิดของ ISO

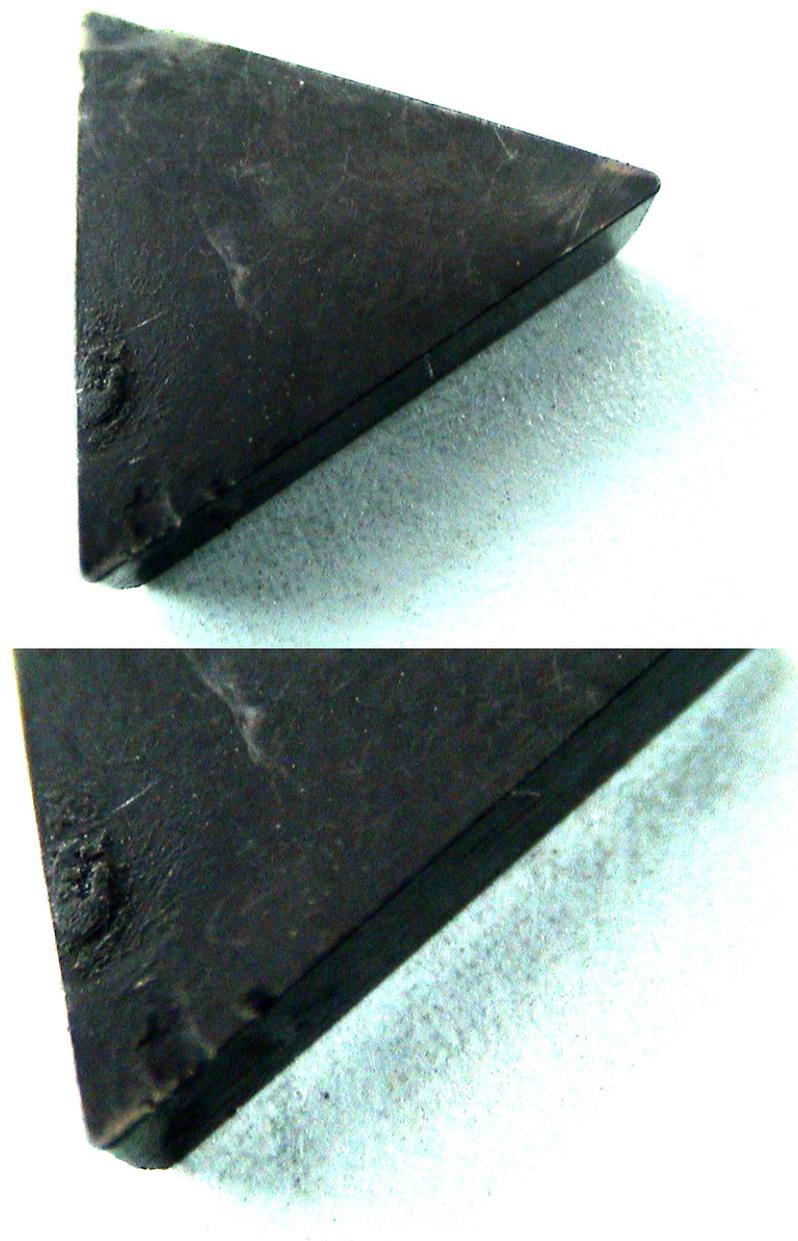
ที่มา : [ศุภโชค, 2543]



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหกรวมของใบมีดและเวลาในการตัด
ที่มา : [ศุภโชค, 2543]



รูปที่ 2.14 แสดงการสึกหกรอบแบบต่าง ๆ ของใบมีด
ที่มา : www.sandvik.com



รูปที่ 2.15 แสดงการสึกหรอของไบมิดเซรามิกที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

จากรูปที่ 2.15 แสดงการสึกหรอของไบมิดเซรามิกที่ใช้ในการทดลองผลปรากฏว่าเกิดการสึกหรอแบบ Notch Wear จากการที่คมของเศษเหล็กสแตนเลส จากการกรัดตัดเฉือนลงบนพื้นผิวของไบมิด

2.5 เหล็กสแตนเลส (Stainless Steels)

เหล็กสแตนเลส (Stainless Steel) หมายถึง เหล็กกล้าที่ผสมโครเมียมอย่างน้อย 10.5 % และทำให้มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน โดยที่เหล็กสแตนเลสจะสร้างฟิล์มของโครเมียมออกไซด์ที่บางและแน่นที่ผิว ซึ่งจะปกป้องผิวของเหล็กจากบรรยากาศภายนอก เหล็กสแตนเลสสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างจุลภาคได้เป็น 5 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้ [สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2549]

2.5.1 ชนิดของเหล็กสแตนเลส (Type of Stainless Steels)

1. เหล็กสแตนเลสเฟอร์ริติก (Ferritic Grade) เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียม (Cr) ประมาณ 12% หรือ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ Cr +/-1%) มีนิเกิลน้อยมาก (ติดมากับวัตถุดิบ) เหล็กสแตนเลสกลุ่มนี้จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์และมีคุณสมบัติที่แม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ปานกลาง มีค่าความยืด (Elongation) สูง เช่น เกรด 430, 409 เหล็กสแตนเลสชนิดเฟอร์ริติกมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มออสเทนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain Coarsening) และสูญเสียความแกร่ง (Toughness) หลังการเชื่อมการใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนเครื่องซักผ้า ชิ้นส่วนระบบท่อไอเสีย และในบางเกรดจะผสมโครเมียมสูงเพื่อใช้กับงานที่ต้องทนอุณหภูมิสูง

2. เหล็กสแตนเลสออสเทนนิติก (Austenitic Grade) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่ใช้กันมากจะผสมโครเมียมประมาณ 17% (ช่วงของส่วนผสมของ Cr +/-1%) และนิเกิล (Ni) ประมาณ 9% (ช่วงของส่วนผสมของ Ni +/-1%) การผสมนิเกิลทำให้เหล็กกลุ่มนี้ต่างจากกลุ่มเฟอร์ริติกโดยนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ เหล็กกลุ่มนี้บางเกรดจะผสมโครเมียมและนิเกิลเพิ่มเพื่อให้สามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบของเตาหลอม เหล็กกลุ่มออสเทนนิติกนี้จะทนทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกลุ่มเฟอร์ริติก ในด้านคุณสมบัติเชิงกล เหล็กกลุ่มออสเทนนิติกจะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) ใกล้เคียงกับเหล็กสแตนเลสของกลุ่มเฟอร์ริติก แต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) และค่าความยืด (Elongation) สูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก เหล็กสแตนเลสกลุ่มนี้มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กไม่ดูดติดในสภาพผ่านการอบอ่อน เช่น เกรด 304, 316L, 321, 301 การใช้งาน เช่น หม้อ ช้อน ถาด เป็นต้น

3. เหล็กสแตนเลสมาร์เทนซิติค (Martensitic Grade) เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติค จะผสมโครเมียมประมาณ 11.5-18% เหล็กสแตนเลสกลุ่มนี้มีคาร์บอนพอเหมาะและสามารถชุบแข็งได้ เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) สูงมาก แต่จะมีค่าความยืด (Elongation) ต่ำ เช่น เกรด 420 การใช้งาน เช่น ใช้ทำเครื่องมือตัด เป็นต้น

4. เหล็กสแตนเลสดูเพล็กซ์ (Duplex Grade) เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ จะมีโครงสร้างผสมระหว่างออสเทนไนต์และเฟอร์ไรต์ มีโครเมียมผสมประมาณ 21-28% และนิกเกิลประมาณ 3-7.5% เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากสูงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว (Ductility) สูง เช่น เกรด 2304, 2205, 2507

5. เหล็กสแตนเลสอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-Hardening Grade) เหล็กสแตนเลสอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก จะมีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 15-18% และนิกเกิลผสมอยู่ประมาณ 3-8% เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับทำแก๊สน้ำมัน หัววาล์ว ตัวอย่างเกรดของเหล็กกล้ากลุ่มนี้ เช่น PH13-9Mo, AM-350

2.5.2 ผลของธาตุผสมในเหล็กสแตนเลส [สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2549]

1. คาร์บอน (Carbon : C) เป็นธาตุที่มีในเหล็กสแตนเลส โดยทั่วไปจะไม่เกิน 0.15% (ยกเว้นเหล็กสแตนเลสกลุ่มมาร์เทนซิติค) เหล็กสแตนเลสที่มีคาร์บอนต่ำจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กสแตนเลสส่วนใหญ่ผสมคาร์บอนอยู่ 2 ช่วง คือ 0.02% ($\leq 0.03\%$) และ 0.07% (0.04-0.15%) นอกจากนี้ การผสมไทเทเนียมหรือไนโอเบียมไปในเหล็กสแตนเลสจะช่วยให้จับตัวกับคาร์บอนและให้ผลดีต่อคุณสมบัติทั้งสามข้อที่กล่าวมาเหมือนเหล็กสแตนเลสคาร์บอน 0.02% เหล็กสแตนเลสที่ในเกรดมีอักษร "L" กำกับจะควบคุมคาร์บอนไม่ให้เกิน 0.03% ทำให้สามารถเชื่อมได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) และความสามารถในการขึ้นรูปเย็นสูงกว่าเกรดที่มีคาร์บอนสูงกว่า

2. โครเมียม (Chromium : Cr) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไป โดยผสมอยู่ในเหล็กสแตนเลสอย่างน้อย 10.5% แต่เพื่อให้มั่นใจว่าเนื้อเหล็กสแตนเลสมีการกระจายของโครเมียมอย่างน้อย 10.5% อย่างสม่ำเสมอ จึงมักผสมโครเมียมมากกว่าเล็กน้อย เหล็กสแตนเลสส่วนใหญ่ผสมโครเมียมอยู่ 2 ช่วง คือ 12% (10.5-14.0%) และ 17% (16.0-24.0%) ถ้าผสมโครเมียมเกินกว่า 30% จะทำให้เหล็กเปราะ

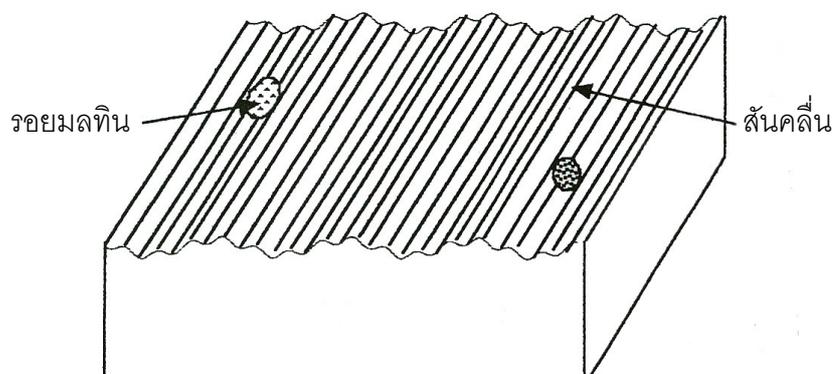
3. นิกเกิล (Nickel : Ni) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบมูมอับในสารละลายกรด เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กสเตนเลสส่วนใหญ่ผสมนิกเกิลอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และ 9% (6.0-15.0%)

4. โมลิบดีนัม (Molybdenum : Mo) ช่วยเสริมผลความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโครเมียม โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบมูมอับ และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพคลอไรด์ด้วย เหล็กสเตนเลสส่วนใหญ่ผสมโมลิบดีนัมอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และ 2% (1.0-3.0%)

5. ไทเทเนียม (Titanium : Ti) หรือไนโอเบียม (Nb) ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular Corrosion) โดยสารทั้งสองตัวจะช่วยป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้ ไทเทเนียมหรือไนโอเบียมยังเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็นและความสามารถในการเชื่อมด้วย

2.6 ความขรุขระของพื้นผิว (Surface Roughness)

พื้นผิว (Surface) หมายถึง ส่วนนอสุดของชิ้นงาน ที่จะสัมผัสกับอากาศ (Space) หรือสัมผัสเกี่ยวข้องกับวัตถุอื่น พื้นผิวของวัตถุส่วนมากจะมีลักษณะเหมือนคลื่นที่มีความยาวคลื่น (Wavelength) ยาว ผสมกับระลอกคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น ส่วนความขรุขระ (Roughness) หมายถึงระลอกคลื่นที่มีช่วงคลื่นสั้น ความขรุขระอาจแสดงได้โดยขนาด (Amplitude) ของคลื่น และโดยค่าความยาวคลื่น



รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างพื้นผิวสำเร็จ

ที่มา : [ศุภโชค, 2543]

2.6.1 การวัดค่าความขรุขระของพื้นผิว

โดยปกติแล้วจะใช้เครื่องมือที่มีลักษณะ คล้ายเข็มลากอย่างช้า ๆ ผ่านไปบนแกนนอน (แกน X) ของพื้นผิวที่จะวัดค่าความขรุขระ การเคลื่อนที่ของปลายเข็มในแนวตั้ง (Y) จะเป็นไปตามลักษณะเส้นขอบของพื้นผิว (Surface Profile) จากนั้นจะมีระบบบันทึกค่า และนำไปคำนวณต่อไปอีกเพื่อหาความขรุขระ ค่าความขรุขระแสดงได้ด้วยตัวแปรต่างๆ หลายตัวแปร ซึ่งจะได้นำมาพิจารณาดังต่อไปนี้ [ศุภโชค, 2543]

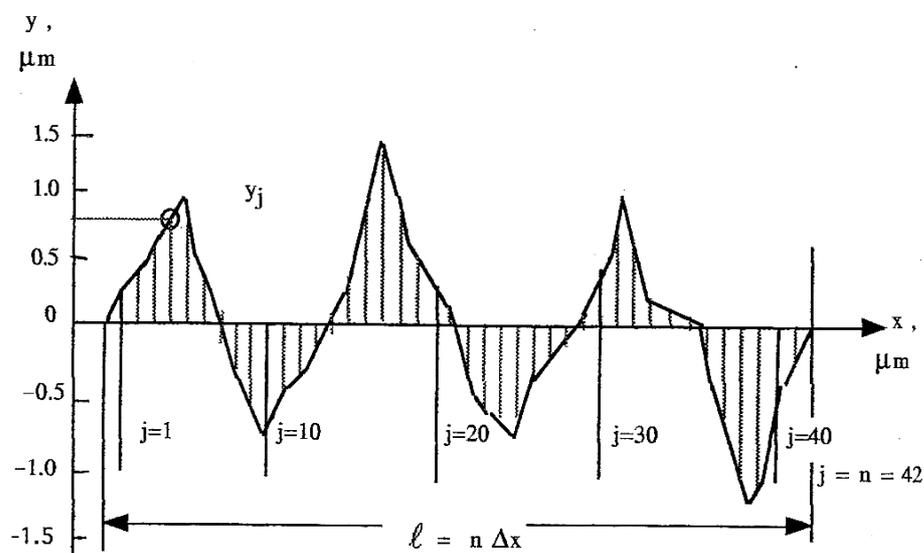
1. ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต (Arithmetic Average, R_a) ถ้าลากเส้นในแนวนอนผ่านกึ่งกลางของเส้นขอบรูปที่ตัดค่าความเป็นคลื่นออกจนเหลือแต่ความขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เส้นนี้เรียกว่าเส้นกึ่งกลาง (Central Line) โดยแบ่งพื้นที่ระหว่างเส้นขอบรูปกับเส้นกึ่งกลางเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ค่าในแกนตั้งวัดจากเส้นกึ่งกลางจะเรียกว่าค่า y และค่าความสูงเฉลี่ยทางเลขคณิต (R_a) จะนำมาใช้เป็นค่าความขรุขระ นั่นคือ $R_a =$ ผลรวมของค่าสัมบูรณ์ของพื้นที่ใต้เส้นขอบรูป / ระยะทางในการวัดตามแนวนอน หรือ

$$R_a = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda |y| dx \quad (2-7)$$

หรือ ถ้าแบ่งระยะทาง λ ออกเป็น n ส่วนโดยที่ n มีค่าสูงพอ จะพบว่า

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j| \quad (2-8)$$

ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิต R_a เป็นค่าที่นิยมใช้ระบุความขรุขระของพื้นผิวมาแต่ดั้งเดิม ก่อนค่าอื่นๆ ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและใช้กันมากจนกระทั่งปัจจุบัน แต่ต่อมามีการนำเอาตัวแปรอื่นๆ มาใช้ระบุค่าความขรุขระเพิ่มเติมอีก เพื่อให้การพิจารณาค่าความขรุขระมีหลายมุมมองยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.17 แสดงการแบ่งเส้นขอบของพื้นผิวเป็นอีลิเมนต์ย่อยๆ

ที่มา : [ศุภโชค, 2543]

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 รุท (root) ฐานสอง เพื่อให้หน่วยของการวัดเป็นหน่วยยกกำลังหนึ่ง ซึ่งเป็นหน่วยตามปกติที่คุ้นเคยกัน ค่าความขรุขระตามวิธีรูทมีนสแควร์ R_q หรือ R_{rms} หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n y^2} \quad (2-9)$$

3. ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด (Maximum Distance Between Peak to Valley, R_{max}) ค่า R_{max} หรือ ค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด เท่าที่วัดได้จากความยาว λ ที่วัดจากพื้นผิว ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.18 ค่า R_{max} หาได้ดังนี้

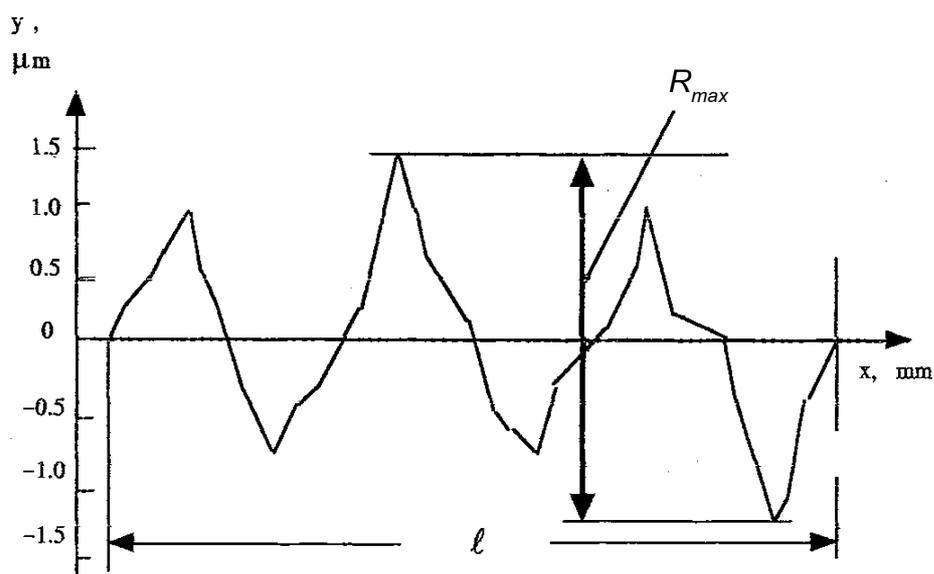
$$R_{max} = 1.5 + 1.2 = 2.7 \mu m \quad (2-10)$$

ค่า R_{max} มีความหมายในการปฏิบัติงาน คือ เป็นค่าที่จะบอกได้ว่า ในการจะจัดเนื้อผิวตัวอย่างนี้ จะต้องขจัดเนื้อผิวออกเป็นความลึกไม่น้อยกว่าค่าของ R_{max} จึงจะทำลายผิวเดิมได้หมด

แต่เนื่องจากค่า R_{max} วัดได้ไม่แน่นอนเพราะเป็นค่าสูงสุดค่าเดียวซึ่งจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นผิวที่วัด จึงนิยมวัดค่าเฉลี่ย R_z แทนค่า R_{max} โดยให้ R_z เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความสูงระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด จากค่าสูงสุดที่วัดได้ 5 ค่าแรก

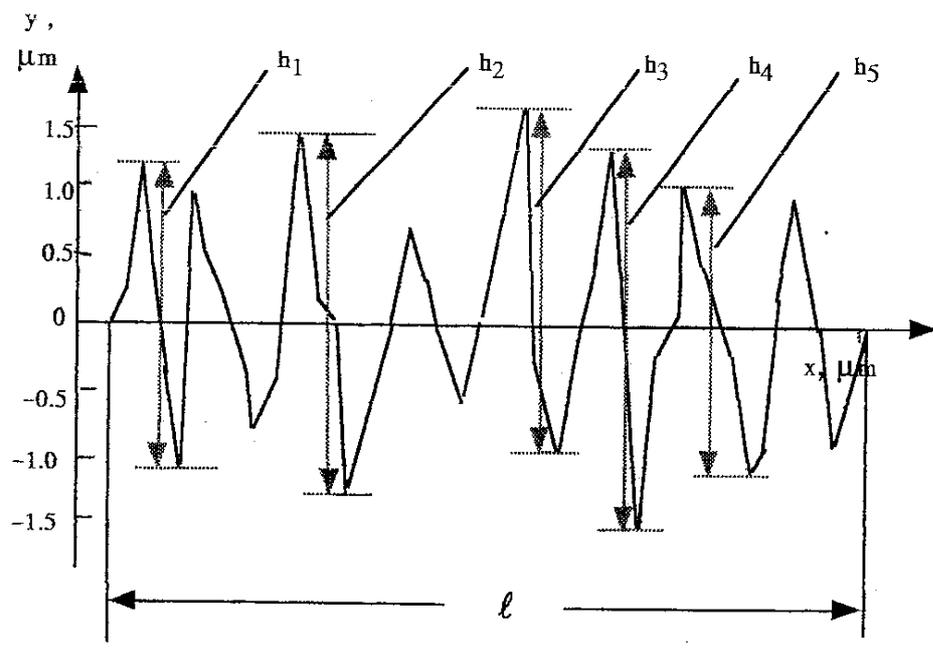
ถ้าค่า h_1, h_2, h_3, h_4 และ h_5 เป็นค่าความสูงระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด โดยเป็นค่าสูงสุด 5 ค่าแรก เท่าที่วัดได้จากความยาว λ ที่วัดจากพื้นผิว ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 ดังนั้นค่า R_z คำนวณได้จาก

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 h_j = \frac{1}{5} [h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5] \quad (2-11)$$



รูปที่ 2.18 แสดงค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุด R_{max}

ที่มา : [ศุภโชค, 2543]



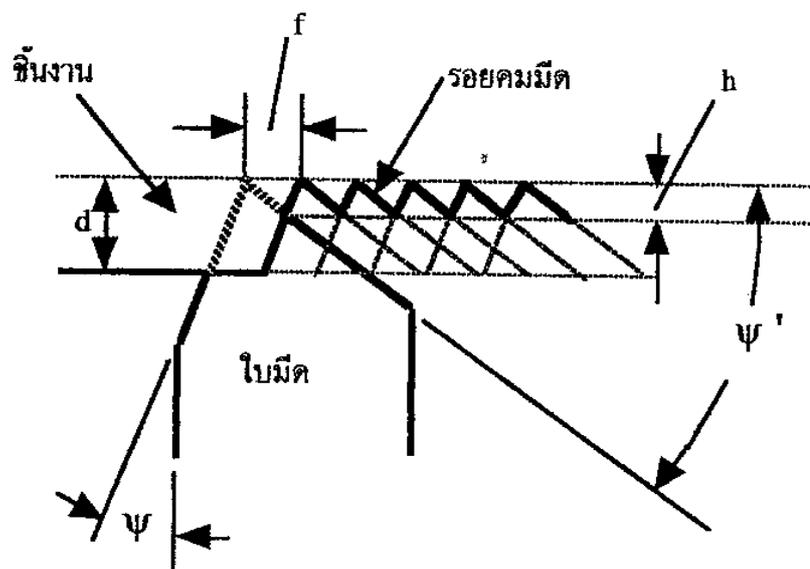
รูปที่ 2.19 แสดงค่าระหว่างยอดสูงสุดกับก้นร่องต่ำสุดห้าค่าแรก R_z

ที่มา : [ศุภโชค, 2543]

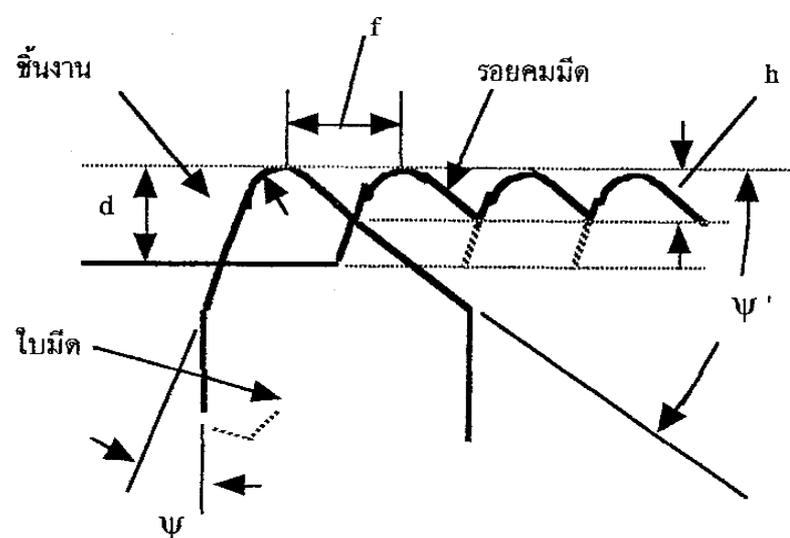
2.6.2 รอยคมมีด

ตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบัน มีความเข้าใจกันว่า พื้นผิวสำเร็จในการตัดวัสดุก็คือพื้นผิวที่คมมีดฝากรอยเอาไว้ และค่าความขรุขระก็จะคำนวณหาได้จากพื้นผิวที่คมมีดฝากรอยเอาไว้ นั่น แต่เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีความตระหนักว่าแนวคิดนี้อาจจะไม่ถูกต้อง แต่ยังมีอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ที่อาจจะมีความสำคัญ และต้องนำเข้ามาพิจารณาด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ในความเข้าใจโดยทั่วๆ ไป ยังมีความเชื่อกันว่าสาเหตุที่สำคัญที่สุดของความขรุขระของพื้นผิว มาจากการที่คมมีดฝากรอยเอาไว้บนชิ้นงานในระหว่างการตัด

E.J.A. Armarego [ศุภโชค, 2543] ได้เสนอลักษณะการฝากรอยของคมมีดในการกลึง ดังจะได้หยิบยกมาพิจารณาดังต่อไปนี้ เพื่อความสะดวก จะแบ่งการพิจารณาเป็นสองกรณี กรณีแรกเป็นกรณีของใบมีดปลายแหลมที่ไม่มีจุมมีด และกรณีที่สองเป็นกรณีของใบมีดที่มีจุมมีด และรัศมีของจุมมีดมากกว่าศูนย์



รูปที่ 2.20 แสดงรอยคมมีดในการกลึงเมื่อใช้ใบมีดปลายแหลม
ที่มา : [ศุภโชค, 2543]



รูปที่ 2.21 แสดงรอยคมมีดในการกลึงเมื่อใช้ใบมีดปลายมน
ที่มา : [ศุภโชค, 2543]

รูปที่ 2.20 เป็นกรณีของการกลึงโดยใช้ใบมีดปลายแหลมที่ไม่มีจุมมีด ซึ่งมักจะ
เป็นใบมีดที่ทำจากวัสดุเหนียว ที่ยากที่จะกะเทาะหรือร้าว เช่น เหล็กกล้าไฮสปีด และเป็นใบมีดดับ

คมมาใหม่ ๆ ยังไม่มีการสึกหรอที่จุมุกมิด ความสูงระหว่างยอดและร่อง (h) ทุกค่ามีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าสูงสุดของความสูงระหว่างยอดและร่อง R_{\max} ก็คือ

$$R_{\max} = h = f / (\tan \psi + \cot \psi') \quad (2-12)$$

ในกรณีที่เส้นขอบรูปของพื้นผิวสำเร็จ เป็นรูปสามเหลี่ยมอย่างง่าย และเส้นกึ่งกลางอยู่ตรงกลางระหว่างยอดและก้นร่อง ดังในกรณีนี้ จะสามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต R_a ได้โดยง่ายจากสมการ (2-7) นั่นคือ

$$R_a = \frac{h}{4} = \frac{f}{4(\tan \psi + \cot \psi')} \quad (2-13)$$

ในบางกรณี จะมีการลบลายใบมีดให้เป็นรอยมนที่เรียกกันว่าจุมุกมิด (Nose) โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือป้องกันการกระแทกหรือการสึกหรอของจุมุกมิด ในงานกลึงละเอียดที่แรงในการตัดมีค่าน้อย รัศมีจุมุกมิด (Nose Radius, r_n) จะมีค่าน้อย เช่น ใบมีดอินเซอร์ที่ทำการคาร์ไบด์ มักจะมีค่า $r_n = 0.6 - 1.0$ mm สำหรับงานกลึงละเอียด $r_n = 0.8 - 1.4$ mm สำหรับงานกลึงทั่วไป และ r_n ตั้งแต่ 1.4 mm ขึ้นไปสำหรับงานกลึงหยาบ ส่วนใบมีดเหล็กกล้าไฮสปีดซึ่งโดยปกติจะเป็นมีดปลายแหลม ซึ่ง $r_n = 0$ แต่เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งปลายของคมมีดจะสึกทำให้มีลักษณะโค้งมน ซึ่งมีค่า r_n ประมาณ 0.4 - 0.6 mm.

เส้นขอบรูปของผิวสำเร็จจากการกลึงโดยมีดปลายมนจะมีความซับซ้อนมาก ในที่นี้จะยกเฉพาะกรณีที่เกิดขึ้นบ่อยๆ แต่ไม่ซับซ้อนนักมาพิจารณา คือกรณีดังแสดงในรูปที่ 2.21 เงื่อนไขของกรณีนี้ ก็คือ

$$d \geq r(1 - \sin \psi) \quad (2-14)$$

และ

$$\int_{AB} < \int < \int_{BZ} \quad (2-15)$$

โดยที่

$$\int_{AB} = \sqrt{2rd - d^2} + r \sin \psi' + \cot \psi' [d - r(1 - \cos \psi')] \quad (2-16)$$

และ

$$\int_{BZ} = \frac{r\{1 - \sin(\psi - \psi')\}}{\sin \psi'} + \{d - r(1 - \sin \psi)\}\{\cot \psi' - \tan \psi'\} \quad (2-17)$$

ค่าของ R_{\max} ที่แสดงไว้โดย Armarego ก็คือ

$$R_{\max} = h \text{ ซึ่งนำไปสู่}$$

$$R_{\max} = r \frac{\{1 - \cos(\psi' - \psi) - \sin \psi' - \cos \psi'\} + \int \sin \psi' \cos \psi}{\cos(\psi' - \psi)} \quad (2-18)$$

จะเห็นได้ว่า การคำนวณหาค่าความขรุขระ ในกรณีของใบมีดปลายมน มีความซับซ้อนมาก สูตรการคำนวณหา R_{\max} ที่แสดงโดย Armarego ครอบคลุมกรณีต่าง ๆ นอกเหนือจากกรณีที่ยกมาแสดงอย่างกว้างขวาง

ค่าความขรุขระที่คำนวณได้จากรอยคมมีด บางครั้งเรียกว่า ค่าความขรุขระตามทฤษฎี(Theoretical Roughness Value) หรือบางทีก็เข้าใจกันว่าเป็นค่าความขรุขระต่ำสุดที่เป็นไปได้ บางครั้งจึงเรียกกันว่า ค่าความขรุขระในอุดมคติ (Ideal Surface Roughness Value) (แต่ความเข้าใจที่ว่าเป็นค่าความขรุขระต่ำสุดนี้ อาจจะไม่จริงก็ได้) อย่างไรก็ตามค่าความขรุขระในอุดมคติ ก็เป็นค่าที่มีประโยชน์ เพราะเป็นแนวความคิดที่รู้จักกันมานาน และเป็นเป้าหมายที่พยายามจะพัฒนาการตัดวัสดุให้สามารถบรรลุถึงได้ หากไม่ปัจจุบันก็อาจจะเป็นในอนาคต

2.7 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design)

Sir Ronald A. Fisher เป็นนักสถิติชาวอังกฤษ ได้ค้นคิดการใช้วิธีการทางสถิติ สำหรับการออกแบบการทดลองขึ้น เนื่องจากการที่ได้เข้าไปมีส่วนร่วมกับการรับผิดชอบทางสถิติ และการวิเคราะห์ข้อมูลที่สถานีทดลองทางการเกษตรรอบด้อม สแตต มหานครลอนดอน ประเทศอังกฤษเป็นเวลานานหลายปี Fisher เป็นทั้งผู้พัฒนาและเป็นบุคคลแรกที่นำเอาการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) มาใช้เป็นวิธีการเบื้องต้นในการวิเคราะห์ทางสถิติที่เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง ในปี ค.ศ. 1933 Fisher ก็ได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์ของมหาวิทยาลัยลอนดอนและเป็นอาจารย์รับเชิญบรรยายให้แก่มหาวิทยาลัยทั่วโลก นอกจาก Fisher จะเป็นผู้บุกเบิกสาขาวิชาการออกแบบการทดลองแล้ว ยังเป็นบุคคลสำคัญอีกจำนวนมาก

ที่มีส่วนในการให้การสนับสนุนสาขาวิชานี้ เช่น F. Yates, R. C. Bose, O. Kempthorne, W. G. Cochran เป็นต้น

การนำการออกแบบการทดลองไปใช้ในยุคแรก ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ทางการเกษตรและชีวภาพ ซึ่งทำให้คำศัพท์และคำนิยามส่วนมากที่ใช้กันอยู่ทางด้านนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับสาขาทางการเกษตรและชีวภาพ อย่างไรก็ตามการนำการออกแบบการทดลองมาใช้งานในทางอุตสาหกรรมครั้งแรกเริ่มปรากฏประมาณช่วง ปี ค.ศ. 1930 ซึ่งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องคืออุตสาหกรรมสิ่งทอ หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ยุติลง วิธีการออกแบบการทดลองก็เริ่มได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและกระบวนการผลิตในสหรัฐอเมริกาและยุโรปตะวันตก กลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้รับประโยชน์อย่างมากมาใช้ในการใช้การออกแบบการทดลอง สำหรับงานพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต นอกจากนี้แล้วอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำและอิเล็กทรอนิกส์ก็ยังได้มีการนำเอาวิธีการทดลองนี้ไปใช้งานและประสบความสำเร็จอย่างมากเช่นกัน หลายปีที่ผ่านมาได้มีการฟื้นฟูความสนใจเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองขึ้นในสหรัฐอเมริกา เพราะอุตสาหกรรมในอเมริกาจำนวนมากพบว่าคู่แข่งทางการค้าอยู่ในทวีปอื่น ๆ ซึ่งได้ใช้การออกแบบการทดลองมาเป็นเวลานานแล้ว [ปารเมศ, 2545]

2.7.1 หลักการพื้นฐาน การออกแบบการทดลอง จะให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ” (Statistical Design of Experimental) คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถสรุปข้อมูลที่ สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองเชิงสถิติจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้าปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเดียวที่นำมาในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ

1. เรพลีเคชัน (Replication) หมายถึงการทดลองซ้ำ เรพลีเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดกลายเป็นหน่วยของการชี้วัด

ขั้นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประเมินผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเราหลีกเลี่ยงทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประเมินผลกระทบนี้อ

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

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

2.7.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ที่เกี่ยวข้องในการทดลองต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้า ว่ากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลอย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บนั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา จะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบางครั้งจะต้องหาอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องการเข้าใจปัญหาอย่างชัดเจนเป็นผลอย่างมากต่อการหาคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้น

2. การเลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดของเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ดังนั้นผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการนั้นอย่างมาก ซึ่งอาจจะมาจากประสบการณ์หรือจากทฤษฎี มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมามีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรที่จะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองให้มีจำนวนน้อย ๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรของเขตให้กว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตของปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควร

มีค่ากว้าง ๆ และเมื่อเราทราบว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ก็อาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

3. เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบนี้ ผู้ทำการทดลองควรแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ หลายครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือทั้งคู่ ของกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรผลตอบ ซึ่งในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบและจะวัดค่าตัวแปรนั้นอย่างไร

4. เลือกการออกแบบการทดลอง การเลือกการออกแบบการทดลองเกี่ยวข้องกับพิจารณาขนาดตัวอย่าง (จำนวนเรพลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการใช้การแรนดอมไมเซชัน ในการเลือกทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มแล้วว่า ปัจจัยบางตัวมีผลต่อผลตอบที่จะเกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่จะเกิดขึ้น

5. ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน หากมีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลอง ถือว่าการทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนการทดลองในขั้นตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ควรนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการทดลอง เพื่อผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบมาเป็นอย่างดี และทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทดลองทางสถิติคือ การทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยวัดที่มีประสิทธิภาพ และถ้านำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมศาสตร์ ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกแบบมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7. สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อได้มีการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและนำเสนอแนะแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้จะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

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

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) หากมีค่าระดับซึ่งแตกต่างกันของปัจจัยเดียวที่ต้องการศึกษาเปรียบเทียบและค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่ม เราสามารถที่จะอธิบายค่าสังเกตต่าง ๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้นตรง คือ

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (2-19)$$

โดยที่ค่า Y_{ij} คือ ค่าสังเกตที่ ij
 μ คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกกันว่า “มัชฌิมรวม (Overall Mean)”
 τ_i คือ ค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่ i หรือผลกระทบจากระดับที่ i
 ε_{ij} คือ องค์ประกอบของความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error)

จุดประสงค์ก็เพื่อที่จะตรวจสอบสมมุติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบต่อระดับต่าง ๆ และทำการประเมินค่า สำหรับการทดสอบสมมุติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติและอิสระต่อกัน ด้วยมัชฌิมเท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2

ตารางที่ 2.3 แสดงข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว

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

ที่มา : [ปารเมศ, 2545]

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

2. การวิเคราะห์ทางสถิติ การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวของแบบจำลองแบบผลกระทบคงที่ ผลกระทบของระดับ (τ_i) มีนิยามเหมือนกับส่วนเบี่ยงเบนจากมัชฌิมรวม

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

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

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1 = \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ของ } (ij)$$

ถ้าหาก H_0 เป็นจริง ทุกระดับจะมีมัชฌิมที่เท่ากันคือ μ ซึ่งอาจจะเขียนในรูปสมมุติฐานใหม่ในรูปของผลกระทบของระดับ τ_i ได้ดังนี้

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 = \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 คู่ของ } i$$

จากการคาดหมายกำลังสองเฉลี่ย พบว่า โดยทั่วไป MS_E จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 ภายใต้สมมุติฐานหลัก $MS_{treatment}$ จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 เช่นกัน อย่างไรก็ตามถ้าสมมุติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหมายของ $MS_{treatment}$ จะมากกว่า σ^2 ดังนั้นภายในสมมุติฐานรอง ค่าคาดหมายของตัวตั้งของสถิติทดสอบ จะมากกว่าค่าคาดหมายตัวหาร และจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่าสถิติทดสอบมีค่ามากกว่า หรือค่าตกอยู่ในช่วงวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่

ด้านขวาของค่าวิกฤต $F_{\alpha, a-1, N-a}$ ดังนั้นก็จะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่า มีความแตกต่างระหว่าง
มัชฌิมของระดับถ้า

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

เมื่อ

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

ซึ่งค่า F_o สามารถคำนวณโดยการหาค่า P-Value ในการตัดสินใจก็ได้ สูตร
สำหรับการคำนวณผลรวมกำลังสองสามารถหาได้จากการลดรูปของ $MS_{treatment}$ และ SS_T ซึ่งจะได้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (2-20)$$

และ

$$SS_{Treatments} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (2-21)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมกำลังสองสามารถหาได้ดังนี้

$$SS_E = SS_T - SS_{Treatments} \quad (2-22)$$

ซึ่งขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งเรียกว่า “ตารางการ
วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance Table)”

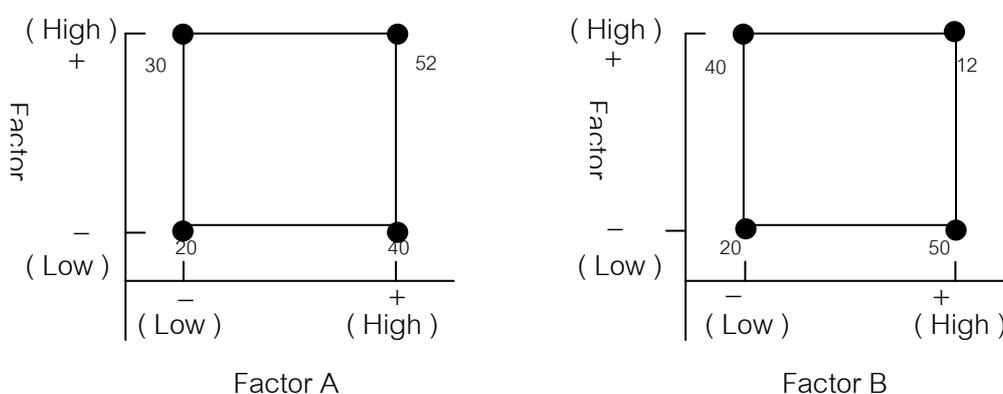
ตารางที่ 2.4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับ Fix Effect Model ตัวแปรเดียว

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	F_o
Between..treatments	$SS_{Treatments}$	$a-1$	$MS_{Treatments}$	$F_o = \frac{MS_{Treatments}}{MS_E}$
Error	SS_E	$N-a$	MS_E	
Total	SS_T	$N-1$		

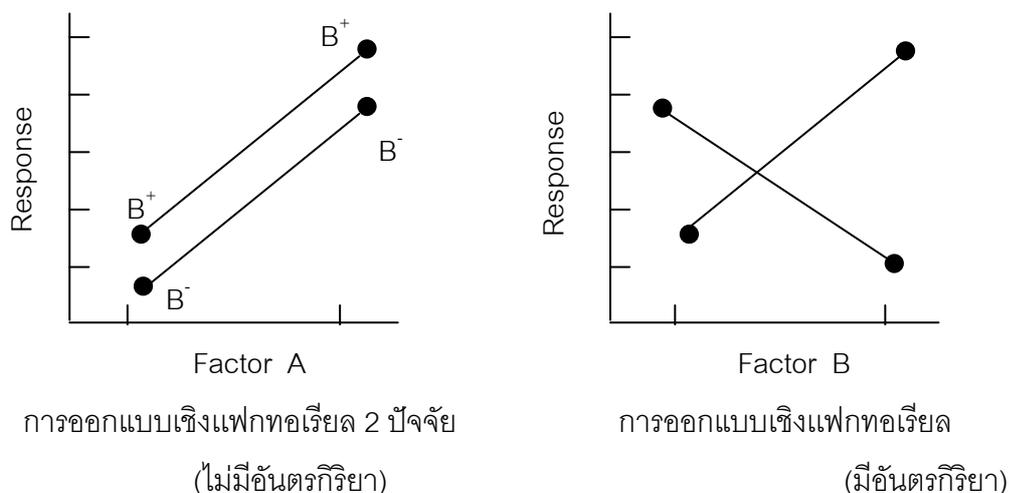
ที่มา : [ปารเมศ, 2545]

2.7.4 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 เพลทเคต จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือปัจจัยเหล่านั้นมีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

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



รูปที่ 2.22 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย



รูปที่ 2.23 แสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

ที่มา : [ปารเมศ, 2545]

1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ปัจจัย (Two Factor Factorials Design) เป็นการออกแบบการทดลองที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี ระดับ b ซึ่งมีจำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลองเท่ากับ $ab \dots n$ สำหรับแบบจำลองแบบตายตัว ตัวทดสอบเชิงสถิติที่ใช้ F -Test จำนวนชั้นความเสรีสำหรับผลหลักใด ๆ มีค่าเท่ากับ ระดับของปัจจัยจำนวนระดับลบด้วย 1 ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ปัจจัยได้ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2-23)$$

การคำนวณค่าผลรวมทั้งหมดของกำลังสอง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad (2-24)$$

ค่าผลรวมของกำลังสองของผลหลักหาได้ดังนี้

$$SS_A = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abn} \quad (2-25)$$

$$SS_B = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2-26)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (2-27)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B \quad (2-28)$$

ตารางที่ 2.5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับแบบจำลอง 2 ปัจจัย

Source of Variation	Sum of Square	Degrees of Freedom	Mean Square	F_o
A.treatments	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$F_o = \frac{MS_A}{MS_E}$
B.treatments	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$F_o = \frac{MS_B}{MS_E}$
Interaction	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_o = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	SS_E	$ab(n - 1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n - 1)}$	
Total	SS_T	$abn - 1$		

2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (Multivariate Analysis of Variance)

สถิติที่ใช้วิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรหลายตัวเรียกว่า การวิเคราะห์หลายตัวแปร (Multivariate Analysis) เทคนิคดังกล่าวสามารถใช้วิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยที่เป็นการทดลองที่มีการควบคุม ไปจนถึงงานวิจัยที่หาความสัมพันธ์ การวิเคราะห์หลายตัวแปรเป็นเรื่องเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลายตัว ใช้เรียกกันใน 3 กรณีคือ ตัวแปรตามมากกว่า 1 ตัว ตัวแปรต้นมากกว่า 1 ตัว และ ตัวแปรมากกว่า 1 ตัว

ในกรณีการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร (Multivariate Analysis of Variance – MANOVA) นั้นจะให้ผลดีเมื่อตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันปานกลาง ถ้าความสัมพันธ์เหล่านั้นสูงเกินไปทำให้มีความคลุมเครือในผลการวิเคราะห์ได้ ส่วนตัวแปรตามที่มีความสัมพันธ์กันต่ำเกินไปหรือไม่สัมพันธ์กันนั้น การวิเคราะห์หลายตัวแปรให้ผลพอ ๆ กับการวิเคราะห์หนึ่งตัวแปร

ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปร ในการวิเคราะห์หลายตัวแปรต้องมีการตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นว่าเป็นไปได้หรือไม่ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ได้ถ้าไม่เป็นจริง ข้อตกลงเบื้องต้นใน MANOVA มี 3 ประการคือ

1. ข้อมูลตัวแปรตามมีความเป็นอิสระ (Independence)
2. ข้อมูลตัวแปรตามทุกตัวที่ศึกษามีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร (Multivariate Normal Distribution)
3. เมทริกซ์ความแปรปรวน-ความแปรปรวนร่วม ของตัวแปรตามที่ศึกษาในแต่ละกลุ่มเท่ากัน (Homogeneity of Variance-Covariance Matrices)

2.8.1 ความเป็นอิสระ (Independence) ข้อมูลแต่ละตัวต้องมีความเป็นอิสระแก่กัน ผู้วิจัยต้องตรวจสอบความเป็นอิสระในแง่มุมมองต่างๆ ซึ่งความบกพร่องในเรื่องนี้เพียงเล็กน้อยสามารถมีผลกระทบต่อทั้งระดับนัยสำคัญและเพาเวอร์ของสถิติ F ใน ANOVA ได้มาก (และมีผลกระทบในทำนองเดียวกับ MANOVA ด้วย) นั่นคือทำให้ระดับ α ที่ใช้จริงมีค่าสูงกว่าระดับ α ที่ระบุได้หลายเท่า ความไม่เป็นอิสระของข้อมูลวัดได้

$$R = \frac{MS_b - MS_w}{MS_b + (n-1)MS_w} \quad (2-29)$$

ด้วยสหสัมพันธ์ภายในชั้น (Interclass Correlation –R) เมื่อ MS_b และ MS_w เป็นตัวเศษและส่วนในการคำนวณสถิติ F และ n เป็นจำนวนข้อมูลใน 1 กลุ่ม

2.8.2 การแจกแจงปกติหลายตัวแปร (Multivariate Normality) ตัวแปรแต่ละตัวมีการแจกแจงปกติตามที่ใช้ใน ANOVA บวกกับคุณสมบัติอื่นๆดังนี้

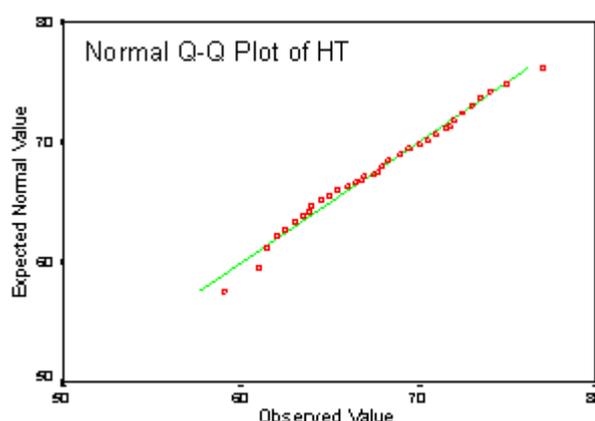
1. การเชื่อมโยงตัวแปรเชิงเส้นตรงใด ๆ มีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร
2. ชุดย่อยทุกชุดของตัวแปรจะมีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร ข้อนี้นำไปสู่การแจกแจงปกติสองตัวแปร (Bivariate Normality) สำหรับตัวแปรทุกคู่

การแจกแจงปกติสองตัวแปรแสดงได้ด้วยการลงจุด (Scatter Plots) ของตัวแปรแต่ละคู่ซึ่งจะเป็นรูปวงรี (Ellipse) ถ้าตัวแปรมีความสัมพันธ์กัน ยิ่งตัวแปรมีความสัมพันธ์กันสูงรูปวงรีจะพอมยิ่งขึ้นดังนั้นการลงจุดของตัวแปรแต่ละคู่ใช้เป็นหลักฐานส่วนหนึ่งในการตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นได้เมื่อเวกเตอร์ y มีการแจกแจงเป็นปกติหลายตัวแปร (สมมติ 2 ตัวแปร) โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น μ และความแปรปรวน Σ นั่นคือ

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

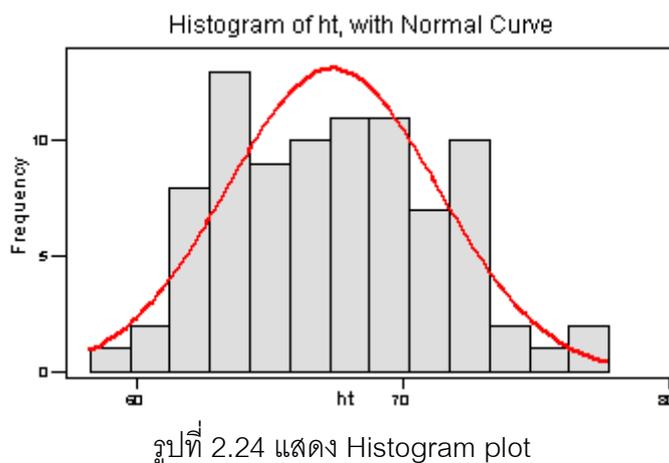
ฟังก์ชันความหนาแน่นของการแจกแจงปกติสองตัวแปร (Bivariate Normal Density Function) เมื่อ $\rho > 0$ แสดงเป็นรูปวงรีที่มีจุดศูนย์กลางที่ (μ_1, μ_2) ซึ่งเรียกว่าเซ็นทรอยด์ของการแจกแจง (Centroid of the Distribution) อย่างไรก็ตามถ้าพบว่าข้อมูลไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น ผู้วิจัยสามารถแปลงข้อมูลให้มีการแจกแจงปกติได้ โดยวิธีต่างๆเช่น การยกกำลังสอง การถอดรากที่สอง การหาส่วนกลับ การหาค่าลอการิทึม เป็นต้น

1. การตรวจสอบการแจกแจงปกติหนึ่งตัวแปร มีวิธีมากมายทั้งวิธีใช้กราฟและไม่ใช้กราฟในการทดสอบการแจกแจงปกติสำหรับตัวแปรแต่ละตัว วิธีหนึ่งก็คือการลงจุด Q-Q (Q-Q Plots) จุดเหล่านี้มาจากค่าควอไทล์ (Quantize) ที่คำนวณจากกลุ่มตัวอย่างและค่าควอไทล์ที่คาดหวังจากการแจกแจงปกติ ถ้าจุดเหล่านี้เรียงตัวเกือบเป็นเส้นตรง ข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับการแจกแจงปกติก็ยอมรับได้ และอีกวิธีหนึ่งที่เป็นการใช้กราฟคือ การตรวจสอบฮิสโตแกรมของตัวแปรตามในแต่ละตัวในแต่ละกลุ่ม



รูปที่ 2.23 แสดง Normal Q-Q plot

ที่มา [http://149.170.199.144/new_rd/contents/goodfit.htm\(8/2/2548\)](http://149.170.199.144/new_rd/contents/goodfit.htm(8/2/2548))



ที่มา [http://149.170.199.144/new_rd/contents/goodfit.htm\(8/2/2548\)](http://149.170.199.144/new_rd/contents/goodfit.htm(8/2/2548))

นอกจากนี้ยังดูได้จาก Stem and Leaf Plots และ Box Plots ได้อีกด้วย สำหรับวิธีการที่ไม่ใช้กราฟมี สถิติไค-สแควร์ทดสอบความพอเหมาะ Komogorov-Smirnov และ Shapiro-Wilk นอกจากนี้ยังมี สัมประสิทธิ์ความเบ้ (Skew Ness) และความโด่ง (Kurtosis)

2. การตรวจสอบการแจกแจงปกติหลายตัวแปร วิธีการตรวจสอบการแจกแจงปกติหลายตัวแปรสามารถกระทำได้ด้วยการคำนวณค่า Mahalanobis Distances (D^2) สำหรับข้อมูลแต่ละตัวและลงจุดที่คำนวณได้นี้กับค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของไค-สแควร์ ถ้าประชากรมีการแจกแจงปกติหลายตัวแปรและทั้ง n และ $n-p$ มีค่าสูงกว่า 25 (โดยประมาณ) แต่ละค่าของ D^2 จะมีลักษณะเหมือน ไค-สแควร์

2.8.3 การเท่ากันของเมทริกซ์ความแปรปรวน – แปรปรวนร่วม

ในกรณีของ MANOVA ซึ่งมีตัวแปรตามหลายตัว ในแต่ละกลุ่มเราต้องหาเมทริกซ์ของความแปรปรวน – แปรปรวนร่วม S (S เป็นค่าประมาณของเมทริกซ์ ความแปรปรวน – แปรปรวนร่วมของประชากรซึ่งใช้สัญลักษณ์ Σ) ถ้าข้อตกลงเบื้องต้นนี้เป็นจริง เมทริกซ์ S ในแต่ละกลุ่มต้องเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสถิติที่ใช้ทดสอบคือ สถิติบ็อกซ์ (Box Test) ถ้าพบว่าไม่มีนัยสำคัญแสดงว่าดำเนินการทดสอบสมมติฐานได้ แต่ถ้าพบว่ามีความสำคัญ เมื่อขนาดกลุ่มตัวอย่างเท่ากัน ควรแปลงข้อมูลเพื่อให้ได้เมทริกซ์ของความแปรปรวน-แปรปรวนร่วมที่เท่ากัน ถ้าขนาดของกลุ่มต่างกันมากให้เปรียบเทียบค่า $|S|$ ของกลุ่มต่างๆ ว่ามีขนาดสอดคล้องกับขนาดกลุ่มหรือไม่แล้วปรับค่าระดับ α ในกรณีที่ค่า $|S|$ และขนาดกลุ่มตัวอย่างมีลักษณะผสมซึ่งไม่เป็นไปตามระบบ ผลกระทบที่มีต่อ α จะไม่รุนแรงเนื่องจากการตัดผลกระทบกันเอง

2.8.4 การเปรียบเทียบด้วย Tukey's HSD การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยบางที่เรียกว่า Tukey's Honestly Significant Difference หรือ HSD ใช้ในการทดลองความแตกต่างเฉลี่ยที่ละคู่ วิธีการนี้จะใช้กลุ่มตัวอย่างที่เท่ากันเท่านั้น สูตรที่ใช้คำนวณ คือ

$$T_\alpha = q_{\alpha(a,f)} \sqrt{\frac{MS_E}{n}} \quad (2-31)$$

2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายตัวแปรสำหรับกรณีหลายแฟคเตอร์

การวิเคราะห์ความแปรปรวนในแบบแผนที่มีสองแฟคเตอร์ทำให้ผู้วิจัยสามารถศึกษาผลร่วมของสองแฟคเตอร์ที่มีต่อตัวแปรตาม ซึ่งเรียกว่าผลของปฏิสัมพันธ์ (Interaction effect) นอกจากนี้การทดสอบผลของทรีทเมนต์ยังมีพาวเวอร์สูงกว่าแบบแผนแฟคเตอร์เดียว ซึ่งวิเคราะห์แบบ MCRF-IJ (Multivariate Completely Randomized Factorial Design) สามารถเขียนโมเดลการวิเคราะห์ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2-32)$$

โดยที่ $\varepsilon_{ijk} \sim \text{IN}(0, \Sigma)$

ตารางที่ 2.6 แสดงรูปแบบข้อมูลการวิเคราะห์แบบ MCRF-IJ

$$\begin{bmatrix} y'_{111} \\ y'_{112} \\ y'_{121} \\ y'_{122} \\ y'_{131} \\ y'_{132} \\ y'_{211} \\ y'_{212} \\ y'_{221} \\ y'_{222} \\ y'_{231} \\ y'_{232} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1p} \\ \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1p} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2p} \\ \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1p} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2p} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \dots & \beta_{3p} \\ \gamma_{111} & \gamma_{112} & \dots & \gamma_{11p} \\ \gamma_{121} & \gamma_{122} & \dots & \gamma_{12p} \\ \gamma_{131} & \gamma_{132} & \dots & \gamma_{13p} \\ \gamma_{211} & \gamma_{212} & \dots & \gamma_{21p} \\ \gamma_{221} & \gamma_{222} & \dots & \gamma_{22p} \\ \gamma_{231} & \gamma_{232} & \dots & \gamma_{23p} \end{bmatrix} + E$$

ที่มา : [ผจญจิต, 2545]

รูปโมเดล GLM (General Linear Model) ในกรณีทั่วไปคือ

$$\begin{matrix} Y \\ N \times p \end{matrix} = \begin{matrix} X \\ N \times q \end{matrix} \begin{matrix} B \\ q \times p \end{matrix} + \begin{matrix} E \\ N \times p \end{matrix} \quad (2-33)$$

สมาชิกในแต่ละแถวในเมทริกซ์ Y คือ y'_{ijk} เป็นข้อมูล p ตัวดังนี้

$$\begin{matrix} Y \\ N \times p \end{matrix} = \begin{matrix} X \\ N \times p \end{matrix} \begin{matrix} B \\ q \times p \end{matrix} + \begin{matrix} E \\ N \times p \end{matrix} \quad (2-34)$$

สัญลักษณ์นอกนั้นยังเหมือนเดิมเมื่อกำหนดเงื่อนไขต่อไปนี้ให้กับโมเดล

$$\sum_{i=1}^I \alpha_i = 0 \quad (2-35)$$

$$\sum_{j=1}^J \beta_j = 0 \quad (2-36)$$

$$\sum_{i=1}^I \gamma_{ij} = 0 \quad (2-37)$$

$$\sum_{j=1}^J \gamma_{ij} = 0 \quad (2-38)$$

(แต่ละเวกเตอร์มีขนาด $p \times 1$)

ดังนั้นพารามิเตอร์ในโมเดลสำหรับ MCRF-IJ สามารถประมาณได้ดังนี้

$$\hat{\mu} = \bar{y} \quad (2-39)$$

$$\hat{\alpha}_i = \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..} \quad (2-40)$$

$$\hat{\beta}_j = \bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..} \quad (2-41)$$

$$\hat{\gamma}_{ij} = \bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..} \quad (2-42)$$

ตารางที่ 2.7 แสดง MANOVA Table สำหรับแบบแผน MCRF-IJ

Source	df	SSCP
A (Row)	I-1	$SSCP_A$
B (Column)	J-1	$SSCP_B$
AB (Interaction)	(I-1)(J-1)	$SSCP_{AB}$
w (with in group)	N-IJ	$SSCP_w$
Total	N-1	$SSCP_{Total}$

ที่มา : [ผจงจิต, 2545]

โดยที่ค่าของเทอม SSCP ต่างๆคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$SSCP_A = Jn_{ij} \sum_{i=1}^I (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})(\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})' \quad (2-43)$$

$$SSCP_B = In_{ij} \sum_{j=1}^J (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})(\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})' \quad (2-44)$$

$$SSCP_{AB} = n_{ij} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..}) (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..})' \quad (2-45)$$

$$SSCP_w = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{n_{ij}} (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij}) (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij})' \quad (2-46)$$

เทอม SSCP เหล่านี้ใช้ทดสอบสมมติฐานได้ดังนี้

สมมติฐานเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effect)

$$H_{0(AB)} : \gamma_{ij} = 0 \text{ สำหรับทุกคู่ } (ij)$$

$$H_{1(AB)} : \gamma_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งตัว}$$

สมมติฐานเกี่ยวกับผลของแฟคเตอร์ A

$$H_{0(A)} : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_I = 0$$

$$H_{1(A)} : \alpha_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งตัว}$$

สมมติฐานเกี่ยวกับผลของแฟคเตอร์ B

$$H_{0(B)} : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_J = 0$$

$$H_{1(B)} : \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งตัว}$$

สถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน

สถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐานมีทั้งหมดสี่ตัวคือ Wilk's lambda, Roy, Layley-Hotelling และ Pillai ซึ่งสถิติทุกตัวจะให้ผลเหมือนกัน

สำหรับสถิติ Wilks' Λ นั้นใช้ Likelihood Ratio ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$\Lambda = \frac{|SSCP_w|}{|SSCP_{AB} + SSCP_w|} \quad \text{ใช้ทดสอบ } H_{0(AB)} \quad (2-47)$$

$$\Lambda = \frac{|SSCP_w|}{|SSCP_A + SSCP_w|} \quad \text{ใช้ทดสอบ } H_{0(A)} \quad (2-48)$$

$$\Lambda = \frac{|SSCP_w|}{|SSCP_B + SSCP_w|} \quad \text{ใช้ทดสอบ } H_{0(B)} \quad (2-49)$$

และ H_0 จะถูกปฏิเสธเมื่อ Λ มีค่าต่ำ การทำการทดสอบ Likelihood นี้มีเงื่อนไขว่า $p \leq IJ(n-1)$ เพื่อให้ $SSCP_w$ เป็น Positive Definite ซึ่งค่าไอเกนของเมทริกซ์นี้ทุกค่าเป็นบวก

ในกรณีกลุ่มตัวอย่างมีขนาดใหญ่ และในแต่ละเซลล์มี n เท่ากันสถิติ Wilk's lambda สามารถประมาณเป็น โค-สแควร์ได้ H_0 ต่างๆจะถูกปฏิเสธด้วยเงื่อนไขดังนี้

$H_{0(AB)}$ จะถูกปฏิเสธที่ระดับ α ถ้า

$$-\left[IJ(n-1) - \frac{P+1-(I-1)(J-1)}{2} \right] \ln \Lambda > \alpha \chi_{p(I-1)(J-1)}^2 \quad (2-50)$$

$H_{0(A)}$ จะถูกปฏิเสธที่ระดับ α ถ้า

$$-\left[IJ(n-1) - \frac{P+1-(I-1)(J-1)}{2} \right] \ln \Lambda > \alpha \chi_{p(I-1)}^2 \quad (2-51)$$

$H_{0(B)}$ จะถูกปฏิเสธที่ระดับ α ถ้า

$$-\left[IJ(n-1) - \frac{P+1-(I-1)(J-1)}{2} \right] \ln \Lambda > \alpha \chi_{p(J-1)}^2 \quad (2-52)$$

เมื่อ $\alpha \chi_{df}^2$ เป็น α เปอร์เซ็นไทล์บนของการแจกแจงโค-สแควร์ที่มี df ที่กำหนด