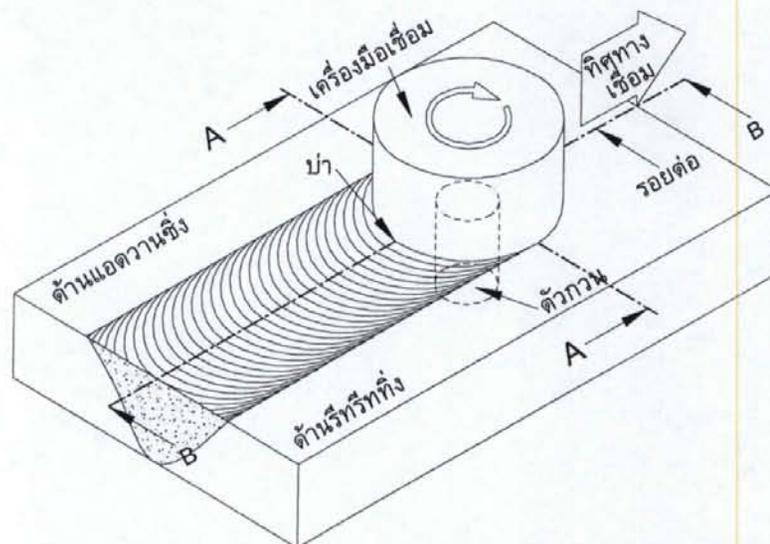


## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง

เนื่องจากการเชื่อมรอยต่อชนอลูมิเนียมผสมเกรด 6063 ได้มีการรายงานไว้หลายงานวิจัย [9-10] แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม และการวัดอุณหภูมิของแนวเชื่อม ด้วยการคำนวณด้วยพลศาสตร์ของไหลนั้นไม่ได้มีการศึกษาไว้ ด้วยเหตุนี้การเตรียมข้อมูลเบื้องต้น การค้นหาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการเชื่อมและโลหะวิทยาของอลูมิเนียม รวมไปถึงงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในบทนี้กล่าวถึง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง การทดลอง และการวิเคราะห์ผลต่างๆ เพื่อเป็น ข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลองต่อไป

### 2.1 การเชื่อมฟริกชันสเตอร์



รูปที่ 2.1 ภาพรวมกระบวนการ FSW [11]

การเชื่อมฟริกชันสเตอร์ (Friction Stir Welding: FSW) เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid State Welding) ที่คิดค้นขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1991 เพื่อใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมที่มีความยากต่อการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมหลอมละลาย (Conventional Fusion Welding) [1-2] ที่ทำให้รอยเชื่อมมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าโลหะหลักที่ใช้เชื่อม ลักษณะกระบวนการเชื่อมโดยสังเขปแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเชื่อมเริ่มต้นที่ตัวกวน (Stirrer) ถูกสอดลงเข้าไปในรอยต่อของวัสดุจนกระทั่งป้าเครื่องมือเชื่อมสัมผัสกับผิวของรอยต่อ และทำให้เกิดความร้อนเสียดทานขึ้น ทำให้

อลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัว และเคลื่อนที่รอบตัวแกน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนของรอยต่อ จากนั้นบ่าเครื่องมือจะกดอลูมิเนียมที่อ่อนตัวและไหลวนและทำให้เกิดแนวเชื่อมต่อไป

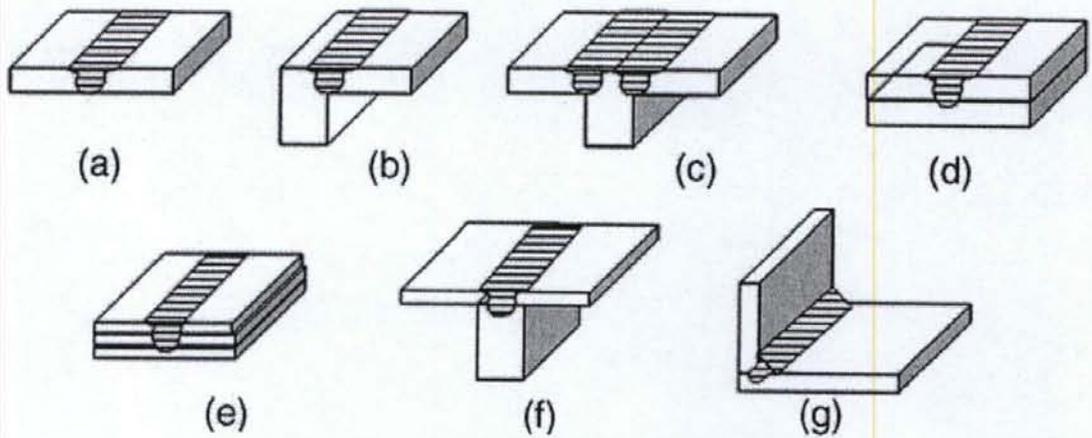
เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการ FSW กับวิธีการเชื่อมอื่นๆ กระบวนการนี้สามารถแสดงให้เห็นข้อดีที่เห็นได้ชัด คือ เป็นกระบวนการเชื่อมในสถานะของแข็ง วัสดุจะไม่เกิดการหลอมเหลวและไม่ทำให้เกิดโครงสร้างงานหล่อที่มักเกิดในการเชื่อมแบบหลอมละลาย เช่น การเชื่อมอาร์ค และมีความสามารถรับแรงได้ต่ำ มีความร้อนที่เกิดต่ำทำให้เกิดการกระจายความร้อนต่ำและไม่ทำให้งานเกิดการบิดเบี้ยวเสียรูป มีความสามารถในการทรงรูปได้ดี ถึงแม้จะถูกทำการเชื่อมซ้ำหลายๆ ครั้ง ไม่มีการสูญเสียโลหะผสมในโลหะ หรือแนวเชื่อมเนื่องจากโลหะที่เกี่ยวข้องไม่เกิดการหลอมละลาย ขนาดเม็ดเกรนในรอยต่อมีขนาดเล็กละเอียดและสามารถ รับแรงได้สูง โดยที่ผ่านมามีค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อม FSW จะมีค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 80-120% ของวัสดุหลักที่ใช้เชื่อม [12] รอยแตกร้าวที่มักเกิดจากการถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็วของการเชื่อมแบบหลอมละลาย ไม่เกิดขึ้นในการเชื่อมนี้ รอยต่อที่ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถทดแทนการใช้นัทสกรู หรือ ริเวทได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้เมื่อพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อมแล้วพบว่า ไม่จำเป็นต้องใช้แก๊สปกคลุมแนวเชื่อม เนื่องจากโลหะไม่เกิดการหลอมละลายและอากาศไม่สามารถเข้าไปรวมตัวกับแนวเชื่อมขณะทำการเชื่อมได้ ไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดหลังการเชื่อม เนื่องจากไม่มีแนวปกคลุมแนวเชื่อม (Flux) และผิวชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อนเหมือนดังในการเชื่อมอาร์ค ไม่จำเป็นต้องเจียรในตักแต่ง เนื่องจากผิวหน้าแนวเชื่อมมีลักษณะราบเรียบและไม่มีเศษ หรือรอยนูนของแนวเชื่อมที่ต้องกำจัด ประหยัดวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม เช่น ลวดเชื่อม หรือแก๊สต่างๆ

## 2.2 ตัวแปรการเชื่อมพริกซ์สเตอร์

รอยต่อของอลูมิเนียมผสมที่เกิดจากการเชื่อมพริกซ์สเตอร์ สามารถเกิดขึ้นได้จากการไหลตัวของอลูมิเนียมที่อ่อนตัวจากความร้อนเสียตทาน และเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุ ตัวแปรการเชื่อมเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งชี้การเกิดขึ้นของการไหลอย่างมีประสิทธิภาพของวัสดุ และค่าความแข็งแรงของรอยต่อที่เพียงพอต่อการไปใช้งาน ตัวแปรการเชื่อมที่สำคัญประกอบด้วย

- ความหนาของวัสดุ ส่งผลโดยตรงต่อการให้ความร้อนแก่แนวเชื่อม เนื่องจากความร้อน 98% ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าแนวเชื่อม [3] ดังนั้นความหนาที่สูงหมายถึงระยะทางในการนำความร้อนเพิ่มมากขึ้น และจะทำให้ด้านล่างของชิ้นงานนั้นมีความร้อนต่ำ

- ชนิดของรอยต่อ รูปแบบรอยต่อที่เป็นไปได้ในการประยุกต์การเชื่อมด้วยการเสียดทานในการเชื่อมนั้นประกอบไปด้วยรอยต่อดังแสดงในรูปที่ 2.2 อย่างไรก็ตามในรายงานวิจัยที่ได้จากการสืบค้นนั้น ส่วนมากในการเชื่อมอลูมิเนียมผสมนั้นได้ทำการเชื่อมรอยต่อชนและเกยเท่านั้น



รูปที่ 2.2 รูปแบบของรอยต่อการเชื่อมฟริกชันสเตอร์ [13]

- ชนิดของวัสดุ วัสดุโลหะส่วนใหญ่ใช้ในการเชื่อมอลูมิเนียมได้ [13] แต่สมบัติที่แตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการเชื่อมที่แตกต่างกัน เช่น การเชื่อมเหล็ก ต้องใช้ความเร็วรอบที่สูงและใช้วัสดุที่มีความแข็งสูงกว่าเหล็กในการสร้างตัวกวน เป็นต้น

- รูปร่างของเครื่องมือเชื่อม ส่งผลโดยตรงต่อการรวมตัวของวัสดุ เช่น การออกแบบตัวกวนให้มีรูปร่างแบบเกลียววนขวา (Right Screw) ที่ทำให้อลูมิเนียม 2024 สามารถรวมตัวเข้ากับอลูมิเนียม 6061 ได้ดีและเพิ่มความแข็งแรงของรอยต่อ [14] หรือการใช้ตัวกวนเกลียววนขวาในการเชื่อมรอยต่อระหว่างอลูมิเนียมและเซรามิก แต่อัตราการสึกกร่อนของตัวกวนที่เกิดมีค่าสูง [15] หรือการประยุกต์ใช้ตัวกวนที่มีรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เกลียววนขวา และเกลียววนซ้าย ในการเชื่อมอลูมิเนียม 1018 ที่แสดงการรวมตัวของวัสดุเป็นไปได้ดีในการใช้ตัวกวนเกลียววนขวาและการทดสอบความแข็งแรงด้วยการดัดโค้ง ชิ้นทดสอบไม่แสดงการแตกหักบริเวณรอยเชื่อม [16] การออกแบบตัวกวนเกลียววนขวาทรงกระบอกและทรงกรวยในการเชื่อมอลูมิเนียม 2014 และค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณร้อยละ 75 ของความแข็งแรงของอลูมิเนียมสามารถทำได้โดยตัวกวนเกลียววนขวาทรงกรวย เนื่องจากตัวกวนดังกล่าวสามารถทำให้ขนาดของเกรนเล็กและละเอียดขึ้น [17]

- ความเร็วรอบของตัวกวน การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิและสมบัติของแนวเชื่อม ดังนั้นการเลือกใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมสามารถทำให้ได้แนวเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงได้ [18]

- ความเร็วในการเดินแนวเชื่อม มีผลตรงกันข้ามกับความเร็วรอบตัวกวน คือ การเพิ่มความเร็วดำเนินแนวเชื่อมทำให้อุณหภูมิของแนวเชื่อมลดลง หรือการลดความเร็วดำเนินแนวเชื่อมทำให้อุณหภูมิของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นทำให้สมบัติต่างๆ ของแนวเชื่อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น การเพิ่มความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียมหล่อ A356 มีค่าเพิ่มเมื่อความเร็วในการ

เดินแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคซิลิกอนเกิดการตกผลึกในสารละลายอลูมิเนียมและทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการละลาย [19] (Solid Solution Hardening) ค่าความแข็งแรงดึงของรอยต่อมีค่าสูงที่สุดมากกว่าค่าความแข็งแรงของอลูมิเนียม 20% อย่างไรก็ตาม Erickson and Sandstrom [20] พบว่าค่าความแข็งแรงต่อความล้าของรอยต่อชนอลูมิเนียม A6082 มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเดินแนวเชื่อมโดยในรายงานไม่ได้ระบุถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรอยเชื่อมที่ทำการเชื่อมอาร์คด้วยลวดทังสเตน (Gas Tungsten Arc Welding: GTAW) หรือการเชื่อมทิก (Metal Inert Gas: TIG) แล้ว รอยเชื่อม FSW มีค่าความต้านทานความล้ามากกว่า Lie *et al.* [21] แสดงค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อชนอลูมิเนียม 2017-T351 ลดลงเมื่อระยะห่างการเคลื่อนที่ (Revolution Pitch or Welding Speed/Rotating Speed) มีค่าเพิ่มขึ้น และพื้นที่รอบๆ การเกิดการกวนของวัสดุ คือ พื้นที่ที่มีความแข็งต่ำสุดและเป็นตำแหน่งที่เกิดการพังทลายของชิ้นทดสอบ จากตัวอย่างทั้ง 3 งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติของรอยต่อของอลูมิเนียม ด้วยเหตุนี้จึงมีความเป็นไปได้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการเชื่อม FSW เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุดต่อไป

- ความเอียงของตัวกวน ไม่มีรายงานใดๆ ที่กล่าวถึงการศึกษาค่าความเอียงของตัวกวน แต่อย่างไรก็ตามความเอียงตัวกวนที่เหมาะสมมีค่าประมาณ  $2-3^{\circ}$  [13]

### 2.3 โลหะวิทยาพื้นฐานของอลูมิเนียม

อลูมิเนียมเป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองในโลก [22] และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอลูมิเนียมแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 อลูมิเนียมมีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือประมาณหนึ่งในสามส่วนของเหล็กกล้า (7.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) มีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมในบรรยากาศน้ำทะเล ปิโตรเคมี และระบบเคมีอื่นๆ ผิวของอลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูง อลูมิเนียมมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงและน้ำหนักมีค่าสูงกว่าเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง อลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความแข็งแรงดึงสูงถึง 90 MPa และความแข็งแรงดึงสามารถเพิ่มขึ้นถึง 680 MPa เมื่อทำการขึ้นรูปเย็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [23]

อย่างไรก็ตามการใช้งานอลูมิเนียมบริสุทธิ์ค่อนข้างจำกัด ส่วนมากมักใช้กับงานที่ต้องการความสามารถในการขึ้นรูปสูง เช่น อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์ขนถ่ายและจัดเก็บสารเคมี เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการเติมธาตุผสมต่างๆ ลงไปในอลูมิเนียมและทำให้เกิดอลูมิเนียมเกรดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 นอกจากนั้นสัญลักษณ์ที่แสดงชนิดของอลูมิเนียมยังมีตัวอักษรย่อท้ายต่อจากตัว

เลข 4 ตัวที่เป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกให้ทราบถึงรายละเอียดของการผลิตดังแสดงในตารางที่ 2.3-2.4 สมบัติทางกลและการใช้งานของอลูมิเนียมผสมบางเกรดแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ [24]

สัญลักษณ์	Al
หมายเลขอะตอม	13
ความถ่วงจำเพาะ	2.7
โครงสร้างผลึก	FCC
จุดหลอมเหลว	660°C
โมดูลัสยืดหยุ่น	69,000 MPa
สินแร่	บอกไซต์ (สารมลทินผสมระหว่าง $Al_2O_3$ และ $Al(OH)_3$ )
ธาตุผสม:	Cu, Mg, Mn, Si, Zn
การใช้งาน:	บรรจุภัณฑ์ อลูมิเนียมแผ่นบาง ตัวนำไฟฟ้า หม้อ กระทะ ชิ้นส่วนโครงสร้าง ยานอวกาศ รถยนต์ หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา

ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดของอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสม [24]

กลุ่ม	บริสุทธิ์	Cu	Mn	Si	Zn	Sn
ผ่านการรีด	1XXX	2XXX	3XXX	4XXX	7XXX	8XXX
ผ่านการหล่อ	1XXX	2XX.X		4XX.X	7XX.X	2XX.X

ตารางที่ 2.3 อักษรห้อยท้ายที่แสดงรายละเอียดของการผลิต [24]

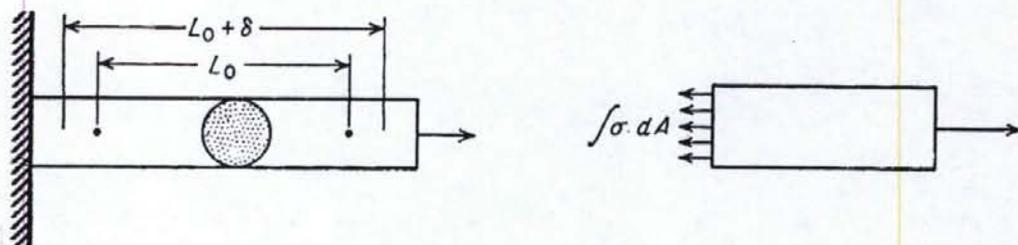
สัญลักษณ์	คำอธิบาย
F	จากการผลิต โดยตรงไม่ผ่านการอบชุบ
H	การแปรรูปเพื่อเพิ่มความแข็ง (Strain hardening)
O	การอบอ่อน (Annealing) เพื่อลดความแข็งจากการแปรรูป และเพิ่มความเหนียวเนื่องจากแรงดึง
T	การอบคืนไฟ (Tempering)
W	การอบบ่ม (Age hardening)

ตารางที่ 2.4 สมบัติของอลูมิเนียมผสม [24]

รหัส	ส่วนผสมทางเคมี (%)						การอบ	ความแข็งแรง (MPa)	%การยืดตัว
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si			
1050	99.5	-	0.4	-	-	0.3	O	76	39
							H18	159	7
1100	99.0	-	0.6	-	-	0.3	O	90	40
							H18	165	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	20
							T3	485	18
3034	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	22
							H36	260	7
4043	93.6	0.3	0.8	-	-	5.2	O	130	25
							H18	285	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18
							H38	200	3
6063	98.5	-	0.3	0.7	-	0.4	O	90	25
							T4	172	20

#### 2.4 การทดสอบสมบัติทางกล

สมบัติทางกลของวัสดุเป็นหนึ่งในคุณลักษณะสำคัญในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ เพื่อนำไปทำการรับแรงในการใช้งานจริง โดยสมบัติทางกลที่มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง คือ การทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุ ซึ่งมีรายละเอียด คือ



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดความเค้นและความเครียด [25]

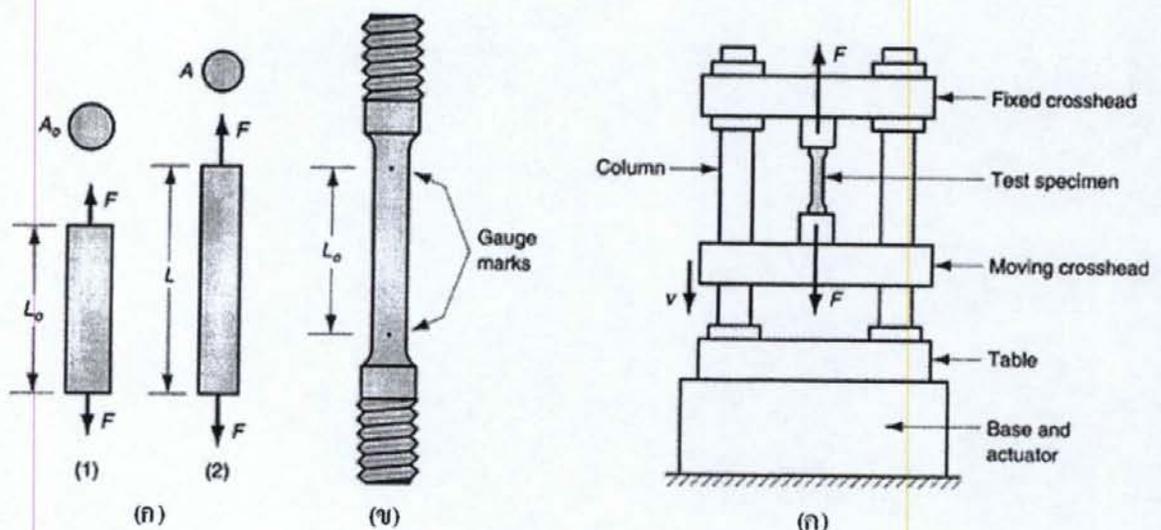
พิจารณารูปที่ 5.3 เมื่อชิ้นงานทรงกระบอกถูกดึงออกมาให้ยืดตัวออกไป วัสดุจะเกิดแรงต้านเล็กน้อย ในเนื้อวัสดุลักษณะนี้เรียกว่าความเค้น (Stress) โดยสามารถหาค่าได้โดยหาอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำและพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่ตั้งฉากกับแนวแรงดึงสมการที่ 2.1 ขณะที่ค่าความเครียดคือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่ยืดออกเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานดังสมการที่ 2.2 ค่าความสัมพันธ์และสัญลักษณ์ในสมการที่ 2.1-2.5 แสดงในรูปที่ 2.4

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

$$e_t = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2.2)$$

$$\% \text{elongation} = \frac{(L - L_0)}{L_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\% R.A. = \frac{(A - A_0)}{A_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

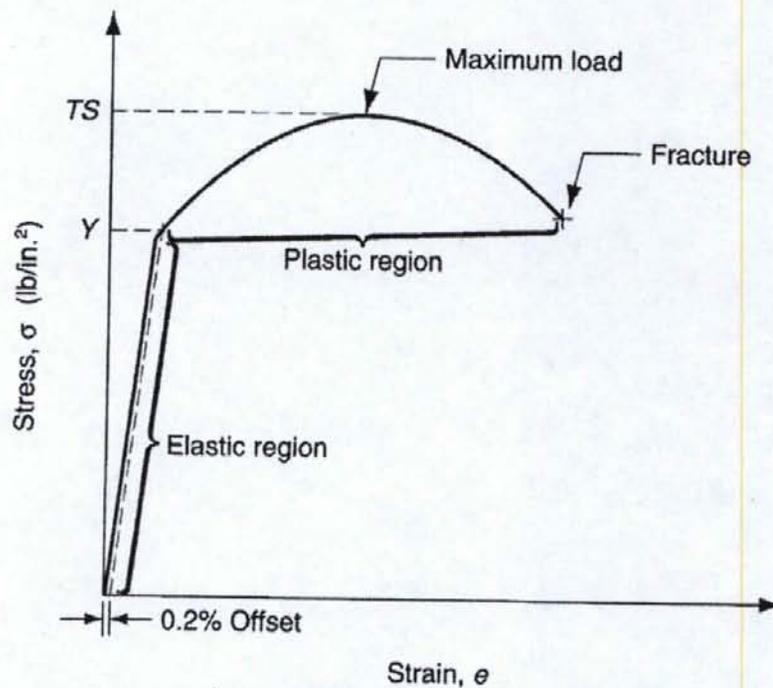


รูปที่ 2.4 การทดสอบแรงดึง: (ก) การให้แรงแก่ชิ้นงาน (ข) ชิ้นทดสอบ (ค) เครื่องทดสอบ [25]

เมื่อ  $\sigma_t$  = ความเค้น  
 $F_t$  = แรงกระทำ  
 $e_t$  = ความเครียด

- $L$  = ความยาวสุดท้าย  
 $L_0$  = ความยาวเริ่มต้น  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดสุดท้าย  
 $A_0$  = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น

นอกจากนั้น ในกรณีของการทดสอบแรงดึงสามารถหาค่าที่จำเป็นในการออกแบบชิ้นงาน 2 ค่า คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% elongation) และค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (% reduction of area: %R.A.) ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.5 เส้นโค้งการทดสอบแรงดึง [25]

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการทดสอบแรงดึงวัสดุชนิดหนึ่ง พบส่วนประกอบต่างๆ ที่มีความสำคัญดังนี้

- ช่วงยืดหยุ่น (Elastic region) เกิดเมื่อเริ่มทำการดึงวัสดุ ช่วงนี้เมื่อทำการปล่อยแรงออก วัสดุจะหดกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น ค่าความยาวสุดท้ายเท่ากับความยาวเริ่มต้น เป็นช่วงที่ความเค้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเครียดความชันของกราฟคือ  $E$  ช่วงนี้จะสามารถทราบค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นซึ่งมีค่าดังสมการที่ 2.5 หรือสมการตามกฎของฮุก (Hook's law)
- จุดคราก (Yield point: Y) คือ จุดที่วัสดุเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร เป็นจุดที่เมื่อปล่อยแรงออก วัสดุจะไม่หดกลับไปที่ความยาวเริ่มต้น โดยปกติจุดครากจะสังเกตค่อนข้างยาก แต่สามารถทำได้

โดยวิธีการที่เรียกว่า “0.2%ความเค้นพิสูจน์ (0.2% Proof stress)” สามารถทำได้โดยการลากเส้น โดยแบ่งส่วนของด้านความเค้นคอดออกเป็น 100 ส่วน และจากจุดเริ่มต้น ที่ระยะประมาณ 0.2 ลากเส้นขนานกับเส้นกราฟการทดสอบขึ้นไป โดยมีระยะขนานไปกับเส้นช่วงยืดหยุ่นดังแสดง คิวเส้นประในรูปที่ 2.5 จุดที่เส้นประตัดกับเส้นการทดสอบจุดนั้น คือ จุดคราก ค่าความแข็งแรงครากของโลหะบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.5

$$E = \frac{\sigma_t}{e_t} \quad (2.5)$$

ตารางที่ 2.5 ความแข็งแรงครากและความแข็งแรงสูงสุดของโลหะบางชนิด [24]

โลหะ	ความแข็งแรงคราก (MPa)	ความแข็งแรงสูงสุด (MPa)
อลูมิเนียมผสม	175	350
เหล็กหล่อ	275	275
ทองแดงผสม	205	410
แมกนีเซียมทองแดง	175	275

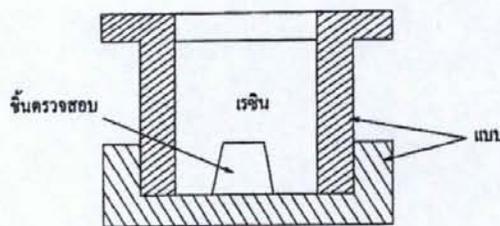
- ช่วงเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic region) เป็นช่วงที่ต่อเนื่องมาจากช่วงยืดหยุ่น หากทำการเพิ่มแรงในการดึงวัสดุจะเปลี่ยนรูปถาวรเมื่อปล่อยแรงออกวัสดุจะไม่หดกลับที่ความยาวเริ่มต้น วัสดุจะแสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดๆหนึ่งจะได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่เรียกว่า “ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength: TS)” ซึ่งโลหะแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5.3 จากนั้นเมื่อทำการออกแรงต่อไป ค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งเกิดการแตกหักที่จุดสุดท้าย (Fracture point) ค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดแตกหักเรียกว่า “ความแข็งแรงที่จุดแตกหัก (Fracture strength)”
- การเพิ่มความแข็งของโลหะ โดยความเครียด หรือการแปรรูปถาวร (Strain or work hardening) คือ การเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเนื่องจากแปรรูปอย่างถาวรที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ เช่น ในเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C เป็นต้น

## 2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจตุภาค

### 2.5.1 การเตรียมชิ้นงาน

การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจตุภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ โครงสร้างจตุภาคนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดการผิดพลาด

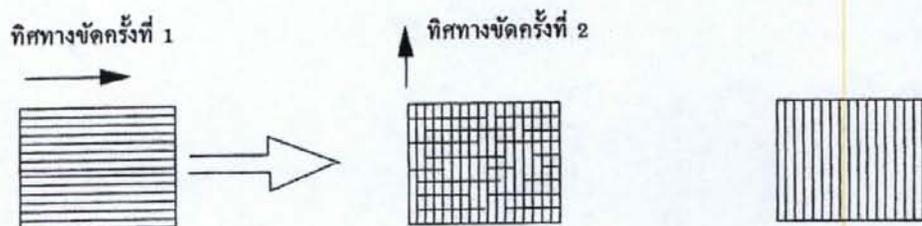
สำหรับขนาดของชิ้นตรวจสอบ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร หรือ 1 นิ้ว และความสูงไม่น้อยกว่า 15 มิลลิเมตร แต่ถ้าเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าควรมีขนาด  $25 \times 25 \times 20$  มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การขัดผิวกระทำได้ง่าย แต่ถ้าชิ้นตรวจสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นตรวจสอบด้วยเรซิน โดยให้หน้าตัดของชิ้นตรวจสอบอยู่ภายนอกเรซิน และขนาดของเรซินนั้นก็ควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นตรวจสอบ



รูปที่ 2.6 การเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจตุภาค [26]

หลังจากได้ชิ้นตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการขั้นต่อไป เพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ขั้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การขัดผิวชิ้นตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 600 800 1000 และขัดจนถึงเบอร์ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระดาษเรียบแล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายแผ่นสุดท้าย



รูปที่ 2.7 การขัดผิวชิ้นทดสอบ [26]

อนึ่ง การขัดผิวตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกร่องจนทำให้การตรวจสอบ โครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด

- การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวในขั้นตอนนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบ ด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium oxide) หรืออาจจะใช้ การเพชรขัดผิวของชิ้นตรวจสอบที่มีความแข็งแรงสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน และการขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

- การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วย แอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็น้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กจะใช้กรดไนตริกร้อยละ 2-4 ผสมแอลกอฮอล์

- การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นตรวจสอบถูก กัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องอย่างยั้งที่จะต้องศึกษาการทำงานของกล้อง จุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจและเกิดทักษะเสียก่อน

### 2.5.2 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) คือ เครื่องมือขยายขอบเขตของประสาทสัมผัสทางตา ให้เห็น สิ่งที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่า เช่น จุลินทรีย์ เซลล์เม็ดเลือด เป็นต้น

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องช่วยตาใน การศึกษาลักษณะ โครงสร้างของเซลล์ให้ละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งกล้องจุลทรรศน์มีความสามารถขยาย (Magnification) ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการแยกแยะรายละเอียด (Resolution / Resolving power) หมายถึงความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กัน ที่สุดให้มองเห็น แยกเป็นสองจุดได้ (Two points of discrimination) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น

แสงที่ส่องผ่านเลนส์ ซึ่งถ้าแสงมีความยาวคลื่นที่สั้น จะช่วยเพิ่ม resolving power และความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ (Numerical aperture of objective lens / NA) โดยที่ค่า NA ยิ่งมาก ภาพที่ได้ก็จะยิ่งคมชัดมากขึ้นตาม

ประเภทของกล้องจุลทรรศน์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายๆ แบบดังนี้

- กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงแบบธรรมดา ประกอบด้วยเลนส์ 2 ชนิดคือ เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตาโดยใช้แสงผ่านวัตถุแล้วขึ้นมาที่เลนส์จนเห็นภาพที่บนวัตถุอย่างชัดเจน
- กล้องที่ใช้แสงแบบสเตอริโอ เป็นกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์ที่ทำให้เกิดภาพแบบ 3 มิติใช้ศึกษาวัตถุที่มีขนาดใหญ่แต่ตาเปล่าไม่สามารถแยกรายละเอียดได้จึงต้องใช้กล้องชนิดนี้ช่วยขยายกล้องชนิดนี้มีข้อแตกต่างจากกล้องทั่วๆ ไป คือ ภาพที่เห็นเป็นภาพเสมือนมีความชัดลึกและเป็นภาพสามมิติ เลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยายต่ำ (น้อยกว่า 1 เท่า) และใช้ศึกษาได้ทั้งวัตถุโปร่งแสงและวัตถุทึบแสง

## 2.6 เทอร์โมคัพเพิล

### 2.6.1 เทอร์โมคัพเปิดแบบ S (Type S Platinum 10% Rhodium V.S. Platinum)

ในปี ค.ศ. 1886 Le Chatelier ได้ประดิษฐ์เทอร์โมคัพเปิด โดยสายลวดทำจากแพลทินัม และสายลวดทำจากโลหะผสม 90% ของแพลทินัม + 10% ของโรเดียม สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1400 °C ซึ่งต่อมาเทอร์โมคัพเปิดชนิดนี้ได้กลายเป็นค่ามาตรฐานสากลตาม IPTS 68 ระบุว่าสามารถใช้ในการสอบเทียบค่า และเปรียบเทียบมาตรฐาน (Calibration and Comparision) ตั้งแต่จุดแข็งของตัวแอติโมนี (630.74 °C) จนถึงจุดแข็งตัวของทอง (1064.43 °C)

### 2.6.2 เทอร์โมคัพเปิดแบบ R (Type R Platinum 13% Rhodium V.S. Platinum)

เทอร์โมคัพเปิดแบบ R สายลวดทำจากแพลทินัม สายลวดทำจากแพลทินัม 87% โรเดียม 13% ผลที่ได้จะทำให้แบบ R ให้แรงเคลื่อนที่เอาต์พุตสูงกว่าแบบ S เทอร์โมคัพเปิดแบบ R มีคุณสมบัติเหมือนกับแบบ S ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 1400°C

### 2.6.3 เทอร์โมคัพเปิดแบบ B (Type B Platinum 30% Rhodium/Platinum 6% Rhodium)

เทอร์โมคัพเปิดแบบ B สายลวดทำจากแพลทินัม 70% + โรเดียม 30% สายลวดทำจากแพลทินัม 94% + โรเดียม 6% เทอร์โมคัพเปิดแบบ B จะให้แรงเคลื่อนที่ต่ำกว่าแบบ S และแบบ R แต่คุณสมบัติที่เด่นกว่าคือแข็งแรงและทนทานกว่า สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1704 °C

(3100 °F) ในสถานะที่เป็น Oxidizing หรือ Inert แต่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสถานะ Reducing หรือ Vacuum และในงานที่มีไอของโลหะและอโลหะเช่นเดียวกับแบบ R และแบบ S

#### 2.6.4 เทอร์โมคัปเปิลแบบ J (Type J Iron V.S. Constantan)

เนื่องจากแพลทินัมเป็นธาตุที่มีราคาแพง เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลมีราคาถูกลงได้มีการค้นคว้าหาวัสดุที่มีราคาที่ถูกกว่าเพื่อใช้แทนแพลทินัม วัสดุที่เริ่มทดลองใช้ เช่น เหล็ก นิกเกิล นิกเกิลบริสุทธิ์เปราะมากในสภาพงานที่เป็น Oxidizing จากการทดลองต่อมาพบว่า โลหะผสมระหว่าง 60% ของทองแดง + 40% ของนิกเกิล ที่ต่อมาเรียกว่า Constantan สามารถแก้ปัญหานี้ได้ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้สายบวกทำด้วยเหล็ก และสายลบทำด้วย Constantan จึงถือกำเนิดขึ้น และต่อมากลายเป็นแบบมาตรฐานแบบ J

คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบ J เหมาะสำหรับสภาพงานที่เป็น Vacuum Oxidizing Reducing หรือ Inert ที่อุณหภูมิไม่เกิน 760 °C ไม่เหมาะสำหรับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C และที่อุณหภูมิสูงกว่า 538 °C (1000 °F) สายที่เป็นเหล็กจะเกิดสนิมด้วยอัตราสูงมากกว่าปกติมาก สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่า 538 °C จะต้องใช้สายเทอร์โมคัปเปิลขนาดใหญ่จะช่วยให้อายุการใช้งานยืนยาวขึ้น

#### 2.6.5 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K Chromel V.S. Alumel)

เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า จึงได้มีผู้ประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิลแบบใหม่ที่สายบวกทำจากโลหะผสมนิกเกิล 90% + โครเมียม 10% และสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95% + 5% ของส่วนผสมระหว่างอลูมิเนียม แมงกานีส และซิลิคอน ซึ่งต่อมาได้กลายมาเป็นแบบมาตรฐานแบบ K เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด สามารถใช้ในสถานะงานที่เป็น Oxidizing หรือ Inert ได้ดีกว่าแบบอื่น สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260 °C (2300 °F) และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250 °C (-420 °F) ในสภาพงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน แบบ K ก็สามารถใช้งานได้ดีเช่นกัน

คุณสมบัติที่เด่นมากของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K คือให้แรงเคลื่อนที่เอาต์พุตสูง แต่ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K สัมผัสโดยตรงกับบรรยากาศต่อไปนี้

- ในสถานะที่เป็น Reducing หรือการใช้งานสลับกันระหว่าง Oxidizing และ Reducing
- สถานะที่มีไอของซัลเฟอร์ เพราะซัลเฟอร์จะทำลายโลหะทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิล โดยเฉพาะสายลบจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว
- สถานะที่งานเป็น Vacuum ยกเว้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ

ถ้าจำเป็นต้องใช้งานเทอร์โมคัปเปิลกับสภาพดังกล่าวนี้จะต้องใช้ Protecting Tube ป้องกันเสียก่อน อายุการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K นี้ประมาณ 20 ปี เพราะหลังจากนั้นส่วนผสมจะเปลี่ยนไปโดยจะมีเหล็กเพิ่มขึ้นประมาณ 2% และส่วนผสมบางอย่างเช่น แมงกานีส จะลดปริมาณลง

#### 2.6.6 เทอร์โมคัปเปิลแบบ T (Type T Copper V.S. Constantan)

เทอร์โมคัปเปิลแบบ T เป็นเทอร์โมคัปเปิลแบบที่เหมาะสมสำหรับวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ สายบวกของเทอร์โมคัปเปิลแบบ T ทำจากทองแดง และสายลบทำจาก Constantan ในสภาพการใช้งานปกติสามารถวัดอุณหภูมิได้ถึง  $-184^{\circ}\text{C}$  แต่อุณหภูมิทางบวกวัดได้ต่ำกว่าแบบอื่นๆ คือ ประมาณ  $370^{\circ}\text{C}$  เท่านั้น เพราะอุณหภูมิสูงกว่า  $370^{\circ}\text{C}$  อัตราการเกิด Oxide ของโลหะเทอร์โมคัปเปิลจะเพิ่มมากขึ้น เป็นแบบที่ทนการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีความชื้นได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถใช้งานในสภาวะที่เป็น Vacuum Reducing หรือ Inert ได้ดี

#### 2.6.7 เทอร์โมคัปเปิลแบบ E (Type E Chromel V.S. Constantan)

เทอร์โมคัปเปิลแบบ E สายบวกทำจากส่วนผสมระหว่าง 10% ของโครเมียม + 90% ของนิกเกิลและสายลบทำจาก Constantan อุณหภูมิใช้งานปกติอยู่ระหว่าง  $-250^{\circ}\text{C}$  ถึง  $871^{\circ}\text{C}$  เหมาะกับสภาพงานที่เป็น Oxidizing คุณสมบัติด้านอื่นๆคล้ายกับเทอร์โมคัปเปิลแบบ K แต่ให้แรงเคลื่อนเอาต์พุตสูงกว่า

### 2.7 โปรแกรมแมทแลป (MATLAB)

โปรแกรม MATLAB เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ชั้นสูง (High-level Language) สำหรับคำนวณทางเทคนิคที่ประกอบด้วยการคำนวณเชิงตัวเลข กราฟิกที่ซับซ้อน และการจำลองแบบเพื่อให้มองภาพงานได้ง่ายและชัดเจนชื่อของ MATLAB ย่อมาจาก matrix laboratory เดิมโปรแกรม MATLAB ได้เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณทาง matrix หรือ matrix software ที่พัฒนาจากโปรแกรมชื่อ LINKPACK และ EISPACK

โปรแกรม MATLAB ได้พัฒนามาด้วยการแก้ปัญหาที่ส่งมาจากหลายๆผู้ใช้เป็นระยะเวลาหลายปีจึงทำให้โปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชันต่างๆให้เลือกใช้มากมาย ตลอดจนในด้านอุตสาหกรรมได้ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในงานวิจัย พัฒนาและวิเคราะห์

โปรแกรม MATLAB มีกล่องเครื่องมือที่ใช้ในการหาคำตอบเรียกว่า Toolbox โดยโปรแกรม MATLAB จะมี Toolbox ในแต่ละสาขา เช่น การประมวลผลสัญญาณ (signal processing toolbox)

การประมวลผลภาพ (image processing toolbox) ระบบควบคุม (control system toolbox) โครงข่ายประสาท (neural network toolbox) ฟัชซีลอจิก (fuzzy logic toolbox) เวฟเลท (wavelet toolbox) การติดต่อสื่อสาร (communication toolbox) สถิติ (statistics toolbox) และสาขาอื่นๆมากมาย ภายใน toolbox แต่ละสาขาก็จะมีฟังก์ชันต่างๆ ที่เกี่ยวกับการแก้ปัญหาในสาขานั้นๆ ให้เลือกประยุกต์ใช้งานเป็นจำนวนมาก

### 2.7.1 โครงสร้างของ MATLAB

โครงสร้างของโปรแกรม MATLAB ประกอบด้วย 5 ส่วนใหญ่คือ

- ภาษาโปรแกรม MATLAB (The MATLAB language) MATLAB เป็นภาษาขั้นสูงที่ใช้ควบคุม flow statements ฟังก์ชัน โครงสร้างข้อมูล อินพุท/เอาต์พุท และลักษณะโปรแกรม Object-Oriented Programming ทำให้การเขียนโปรแกรมไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาอื่น เช่น C, Fortran, Basic เป็นต้น

- สถาปัตยกรรมในการทำงานของ MATLAB (The MATLAB working environment) MATLAB จะมีกลุ่มของเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงานของผู้ใช้โปรแกรม หรือโปรแกรมเมอร์ ประโยชน์ที่กล่าวนี้คือการจัดการตัวแปรใน workspace การนำข้อมูลหรือการผ่านค่าตัวแปรเข้า/ออกและกลุ่มของเครื่องมือต่างๆ นี้ก็จะใช้สำหรับพัฒนา จัดการ ตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรม (debugging) ที่เขียนขึ้นมา

- ฟังก์ชันในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ (The MATLAB mathematical function library) MATLAB จะมีไลบรารีทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณอย่างกว้างขวาง เช่น sine cosine และพีชคณิตเชิงซ้อน โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นฟังก์ชัน ไลบรารีเพิ่มเติมขึ้นจากไลบรารีที่ใช้งานกัน โดยทั่วไป เช่น ฟังก์ชันในการหา eigen values และ eigenvectors การแยกตัวประกอบและส่วนประกอบของเมตริกซ์ด้วยวิธีต่างๆ การวิเคราะห์ข้อมูล การหาความน่าจะเป็น และการแก้ปัญหาาระบบของสมการเชิงเส้นที่เป็นพื้นฐานของสาขาวิชาต่างๆ เป็นต้น ทำให้โปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชันสำหรับการใช้งานค่อนข้างมากและครอบคลุมในรายละเอียดของการคำนวณในสาขาวิชาต่างๆ ได้มากขึ้น

- Handle Graphics ระบบกราฟิกของ MATLAB จะประกอบด้วยคำสั่งขั้นสูงสำหรับการพล็อตกราฟโดยมีพื้นฐานอยู่บนแนวความคิดที่ว่าทุกๆ สิ่งบนหน้าต่างรูปภาพของโปรแกรม MATLAB จะเป็นวัตถุ(Object) ซึ่งมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว Handle Graphics ประกอบด้วยคำสั่งขั้นสูงให้คุณได้เลือกใช้ในการสร้าง Graphic User Interface บนพื้นฐานการประยุกต์ใช้วานของคุณ

นอกจากโปรแกรม MATLAB ยังมีฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการแสดงภาพสองมิติ ภาพสามมิติและการสร้างภาพเคลื่อนไหว

- The MATLAB Application Program Interface (API) API จะใช้เพื่อสนับสนุนการติดต่อจากภายนอกโดยใช้โปรแกรมที่เป็น mex ไฟล์ซึ่งเป็นไฟล์ที่เขียนขึ้นโดยใช้ mex ฟังก์ชันใน MATLAB ซึ่งจะเรียกใช้รูทีนจากโปรแกรมภาษา C และ Fortran หรืออาจกล่าวได้ว่า API เป็นไลบรารีที่เขียนด้วยโปรแกรมภาษา C และ Fortran ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโปรแกรม MATLAB ด้วยไฟล์ที่เป็น mex ฟังก์ชันอีกทั้ง MEALAB API นี้ยังมีความสามารถสำหรับการเรียก routine จาก MATLAB (dynamic linking) ก็ได้

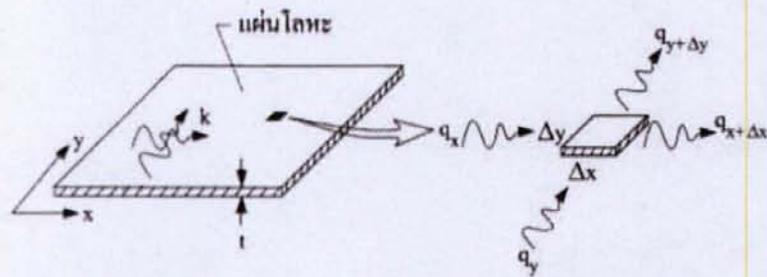
โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคำนวณเกี่ยวกับเวกเตอร์และเมตริกซ์ทั้งในระบบจำนวนจริงและระบบเชิงซ้อน ดังนั้นโปรแกรม MATLAB จึงได้นำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการคำนวณและวิเคราะห์โปรแกรม MATLAB จะมีการกำหนดฟังก์ชันคณิตศาสตร์ ค่าตัวแปร และคำสั่งที่ใช้ในการจัดการไฟล์และไดเรกทอรี ทั้งนี้ก็เพื่ออำนวยความสะดวกต่อผู้ใช้งาน

การพล็อตกราฟมีความสำคัญมากสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล โดยจะเป็นการแสดงค่าข้อมูลที่ต้องการพล็อตบนหน้าต่างกราฟในรูปแบบที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการทำงาน โดยเฉพาะทางด้านสถิติ โปรแกรม MATLAB จะมีฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการพล็อตกราฟในรูปแบบต่างๆมากมายทั้งในลักษณะกราฟ 2 มิติและ 3 มิติ เป็นต้น ตลอดจนสามารถเก็บไฟล์หน้าต่างรูปภาพที่ทำการพล็อตไว้เป็นไฟล์นามสกุล .fig ได้อีกด้วยเพื่อจะได้นำกลับมาใช้งานได้อีก

## 2.8 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล

### 2.8.1 สมการเชิงอนุพันธ์

การแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของความร้อนจะใช้การแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อยู่ในรูปแบบของสมการเอลลิปติก ที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนภายใต้สถานะอู่ตัวในสองมิติบนแผ่นโลหะดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.8 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำในแผ่นโลหะ

ก) สมการการถ่ายเทความร้อนภายใต้สถานะอยู่ตัว (Steady State)

เมื่อเราพิจารณา สมการการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำภายใต้สถานะอยู่ตัวในแผ่นโลหะที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) เท่ากับ  $k$  โดยแผ่นโลหะมีความหนาเท่ากับ  $t$  สำหรับปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยการใช้สมการในหลักความจริงที่ว่า การถ่ายเทความร้อนภายใต้สถานะอยู่ตัวที่ว่า

ปริมาณความร้อนเข้า-ปริมาณความร้อนออก = 0 นั่นคือ

$$(q_x + q_y) - (q_{x+\Delta x} + q_{y+\Delta y}) = 0 \quad (2.6)$$

โดย  $q$  แทนปริมาณความร้อนที่ไหลในทิศทางโคออร์ดิเนต  $x$  หรือ  $y$  ดังแสดงในรูปปริมาณความร้อนนี้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นโลหะชนิดนั้นๆ รวมทั้งพื้นที่หน้าตัดที่มีความร้อนไหลผ่านและความชันของอุณหภูมิตามกฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law) ดังนี้

$$q_x = -k(t\Delta y) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.7)$$

ตามสมการที่(2.7) เป็นการพิจารณาทางด้านแกน  $x$  ส่วนการพิจารณาทางด้านแกน  $y$  ได้สมการในลักษณะเดียวกันดังนี้

$$q_y = -k(t\Delta x) \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.8)$$

ข) สมการอนุพันธ์เชิงเส้น

จากการแทนค่าสมการ(2.7)และ(2.8)ลงในสมการที่ (2.6) แล้วและประยุกต์ใช้อนุกรมเทย์เลอร์ จากนั้นทำการหารสมการตลอดด้วย  $\Delta x \Delta y$  แล้วจึงให้  $\Delta x \rightarrow 0$  และ  $\Delta y \rightarrow 0$  จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.9)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่ หากเราสมมติค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) เท่ากับ  $k$  นั้นคงที่ โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและไม่ขึ้นกับตำแหน่ง  $x$  และ  $y$  บนแผ่นโลหะ นั้นเราจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ที่อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นดังนี้

$$\left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2.10)$$

สมการอนุพันธ์ของการอนุรักษ์โมเมนตัมหรือเรียกอีกอย่างว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) ในรูปแบบอนุพันธ์ โดยตั้งสมมติฐานว่าของไหลเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (newtonian fluid) กล่าวคือ สามารถนำกฎความเสียดทานของสโตกส์ (Stokes's Law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดภายในของไหล มาประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

$$\sigma_x = -\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.11)$$

$$\sigma_r = -\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial r} \quad (2.12)$$

$$\tau_{rx} = \tau_{xr} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (2.13)$$

จัดรูปใหม่จะได้สมการดังนี้

แนวแกน  $x$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (2.14)$$

และแนวรัศมี  $r$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial p}{\partial r} = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $u$  คือ ความเร็วของของไหล ในแนวแกน  $x$ , m/s

$v$  คือ ความเร็วของของไหล ในแนวรัศมี  $r$ , m/s

$p$  คือ ความดันของของไหล, N/m<sup>2</sup>

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล, m<sup>3</sup>/kg

$\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ (Dynamic Viscosity) ของของไหล, kg/m-s

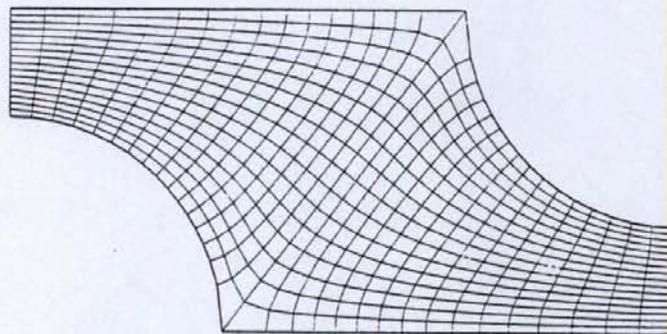
$r$  คือ รัศมีของท่อ, m

จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นได้นำมาพิจารณาเพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ความเร็วของของไหลที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงและความเค้นที่เกิดขึ้นในการไหลของของไหลภายในการกระจายตัวของความร้อนซึ่งในหัวข้อวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการกระจายตัวของความร้อนเท่านั้น

## 2.8.2 ระบบพิกัดอ้างอิง

รูปแบบของสมการควบคุมโดยส่วนมากจะแตกต่างกันเนื่องจากระบบพิกัดอ้างอิงรูป 2.9 เป็นตัวอย่างของการใช้พิกัดอ้างอิง

- Cartesian Coordinate หมายถึง พิกัดฉากเป็นพิกัดอ้างอิงของแกนตั้งฉากซึ่งกันและกัน
- Cylindrical Coordinate หมายถึง พิกัดอ้างอิงของทรงกระบอกซึ่งบ่งบอกแกนเป็นความยาว รัศมีและมุม
- Spherical Coordinate หมายถึง พิกัดอ้างอิงของทรงกลม
- Curvilinear Orthogonal หมายถึง พิกัดอ้างอิงของเส้นโค้งที่ตัดกันไปมาเป็นสี่เหลี่ยม
- Non-Orthogonal หมายถึง พิกัดอ้างอิงตัดกันไม่เป็นสี่เหลี่ยม



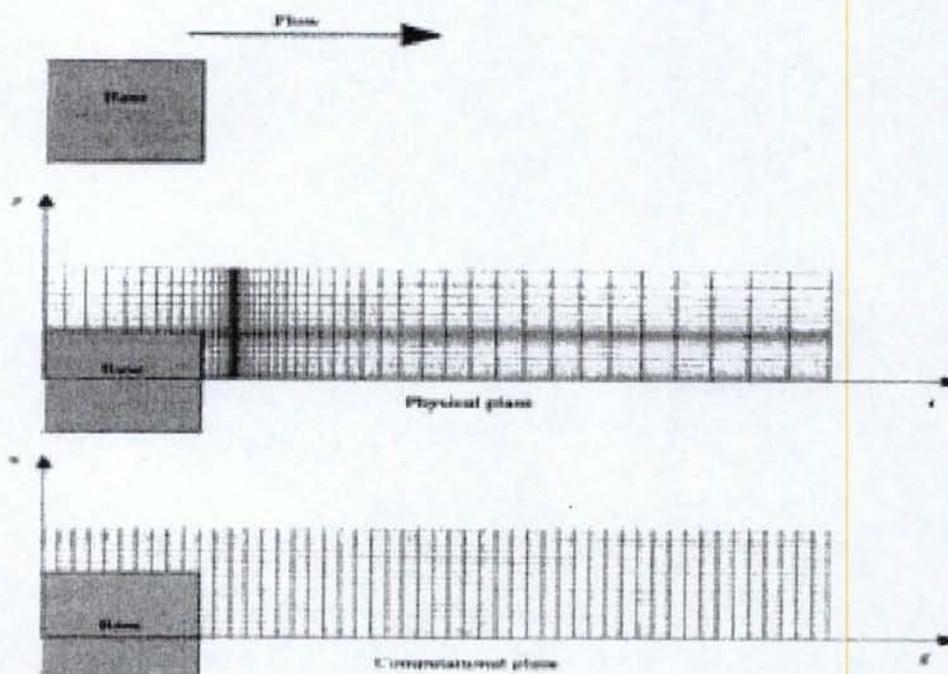
รูปที่ 2.9 การใช้พิกัดอ้างอิงที่เป็นเส้นโค้งตัดกันไปมาเป็นรูปสี่เหลี่ยม

การเลือกใช้พิกัดอ้างอิงขึ้นอยู่กับ ลักษณะการไหลซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นท่อทรงกระบอกจึงเลือกใช้พิกัดอ้างอิงทรงกระบอก (cylindrical coordinate) นอกเหนือจากพิกัดอ้างอิงแล้วสิ่งที่จำเป็นในการคำนวณคือ การแบ่งช่วงของการคำนวณดังนี้

### 2.8.3 กริดเชิงตัวเลข (Numerical Grid)

การใช้กริดจะมีการแบ่งโดเมนการคำนวณออกเป็นส่วนๆ มีการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลในตำแหน่งต่างๆ เหล่านี้ชนิดของกริด สามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

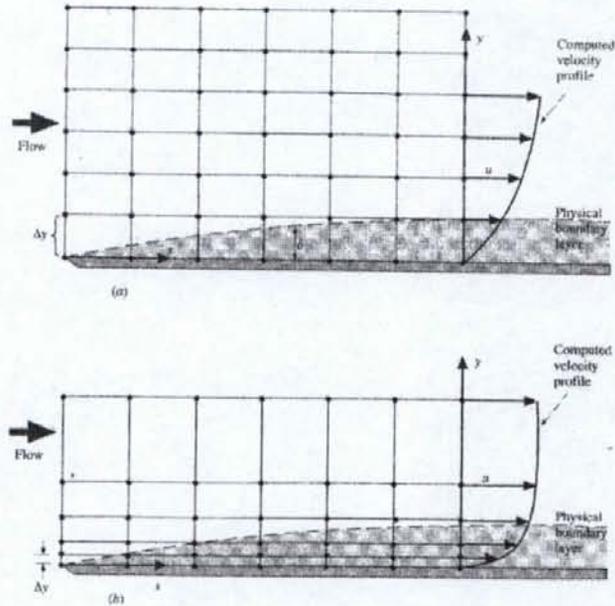
- Structured grid หรือกริดแบบโครงสร้าง ประกอบด้วยกลุ่มของกริด (แนวตั้งและแนวนอน) ที่สมาชิกภายในกลุ่มไม่ตัดกันเอง แต่จะตัดกับสมาชิกแต่ละตัวของกลุ่มอื่นเพียงหนึ่งครั้ง ดังแสดงในรูป 2.10 กริดแบบนี้จะมีข้อดีโดยส่วนมากจะเทียบได้กับ กริด คาร์ทีเซียน ซึ่งแต่ละจุดจะมีจุดข้างเคียง 4 จุด สำหรับสองมิติ และ 6 จุดสำหรับสามมิติ เป็นกริดที่ง่ายที่สุดสะดวกในการเขียนโปรแกรม และ เมตริกของระบบสมการพีชคณิต (algebraic equation) เป็น โครงสร้างที่มีแบบแผนมีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพอยู่มากใช้ได้กับรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน แต่ก็มีข้อเสียคือควบคุมการกระจายตัวของกริดได้ยาก และหากทำการกระจายตัวกริดไม่เหมาะสมจะทำให้การหาคำตอบมีความคลาดเคลื่อนหรือ ทำให้การแก้ปัญหาไม่ลู่เข้า (diverge)



รูปที่ 2.10 การใช้ Structured Grid

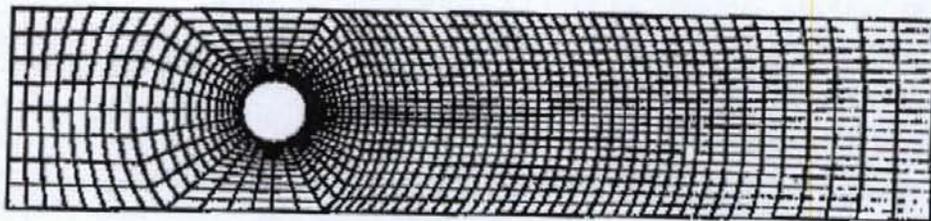
กริดแบบโครงสร้างนี้ยังมีการแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

H-grid เป็นกริดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมที่มีด้านแยกชัดเจนดังแสดงในรูป 2.11



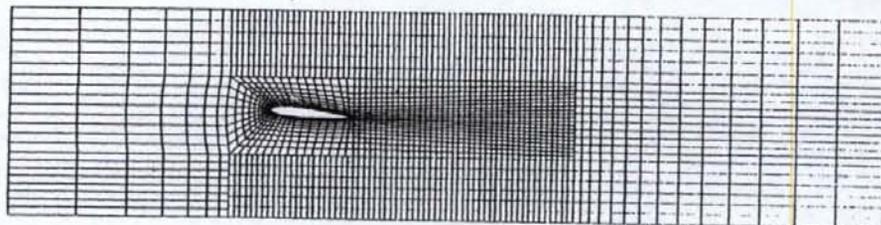
รูปที่ 2.11 การใช้ Structured Grid แบบ H-Grid

O-grid เป็นกริดที่นิยมใช้ในลักษณะเป็นวงกลมที่ไม่จำเป็นต้องสนใจจุดปลายของกริดดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 การใช้ Structured Grid แบบ O-Grid

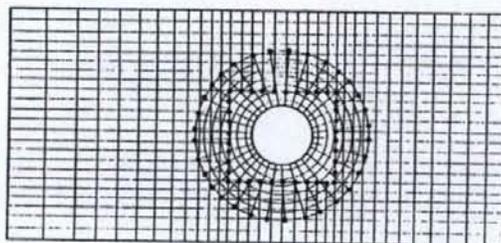
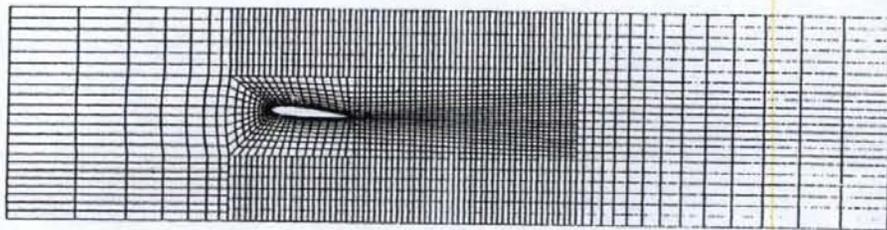
C-grid เป็นกริดที่มักใช้กับวัตถุที่มีขอบแหลมซึ่งมีกริดอยู่หนึ่งเส้นที่มีจุดซ้อนกันดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 การใช้ Structured Grid แบบ C-Grid

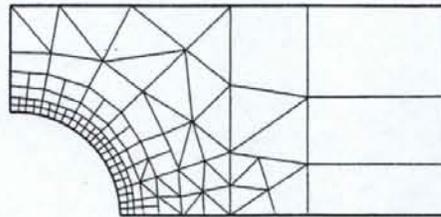
นอกเหนือจากกริดที่เป็นแบบโครงสร้างแล้วยังมี

- Block-structured grid เป็นกริดที่จัดเป็นกลุ่มซ้อนกันภายในโดเมน ส่วนที่มีการเหลื่อมกันมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า composite grids หรือ chimera grids ดังรูป 2.14 ซึ่งกริดประเภทนี้มีข้อดีคือมีโดเมนย่อยมากกว่าสองโดเมนภายในโดเมนของการคำนวณและแต่ละโดเมนย่อยไม่จำเป็นต้องมีความละเอียดเท่ากัน ต้องมีการคำนวณเพิ่มเติม ณ บริเวณรอยต่อของแต่ละโดเมน มีความยืดหยุ่นมากกว่ากริดแบบ โครงสร้างและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับ รูปร่างที่ซับซ้อนหรือวัตถุที่เคลื่อนที่ได้แต่ยังมีข้อเสียคือเขียนโปรแกรมยาก และยากในการนำมาใช้กับกฎการอนุรักษ์จึงไม่เป็นที่นิยม



รูป 2.14 การใช้ Block - Structured Grid

- Unstructured grid หรือกริดที่ไม่เป็นโครงสร้างเป็นกริดที่ใช้กับการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นรูปแบบกับโครงสร้างที่ซับซ้อนดังแสดงในรูป 2.15 กริดแบบนี้มีข้อดีคือใช้กับรูปร่างซับซ้อนได้ดี และสามารถใช้กับ discretization แบบไหนก็ได้ แต่นิยมกับวิธี FVM และ FEM ซึ่งใช้กับปริมาตรหรือชิ้นส่วนที่มีรูปร่างแบบไหนก็ได้ และไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของจำนวนจุดข้างเคียง โดยทั่วไปจะเป็นกริดแบบ สามเหลี่ยมหรือ สี่เหลี่ยมในงานสองมิติ และห้าหรือหกเหลี่ยม ในงานสามมิติมี algorithm ที่สามารถใช้สร้างกริดโดยอัตโนมัติสามารถปรับความละเอียดของกริดในเฉพาะที่ได้ง่ายมีระบบสมการพีชคณิตที่ใช้ในการคำนวณไม่เป็นแบบแผน มีข้อเสียคือต้องมีการเก็บตำแหน่งของแต่ละจุด และตำแหน่งข้างเคียงแตกต่างกันหาก ทำให้การสร้างกริด และขบวนการ pre-processing มีความยุ่งยากการคำนวณหาค่าตอบช้า



รูป 2.15 การใช้ Unstructured Grid

#### 2.8.4 การทำดิสครีไทเซชัน (Discretization Method)

การทำ discretization จะต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมกับรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีวิธีที่นิยมใช้ดังนี้

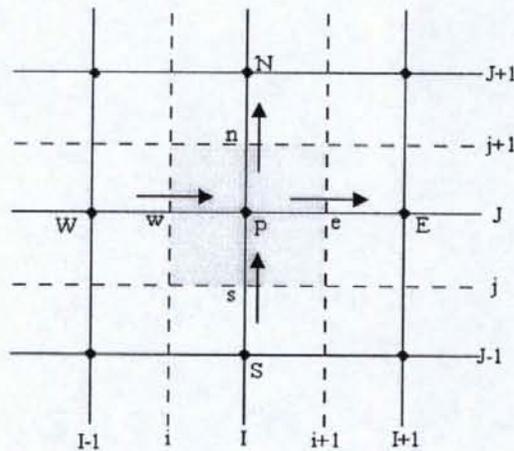
- วิธีทางด้านไฟไนต์ ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference Method ; FDM) ใช้สำหรับการไหลเฉพาะอย่างที่อาศัยความแตกต่างของจุดอ้างอิงที่ต่อเนื่อง (spectral method) ในการคำนวณ (computational domain) จะถูกแบ่งออกเป็นพื้นที่กริด คำตอบของสมการควบคุมในรูปของระบบสมการอนุพันธ์จะถูกประมาณจากค่าของจุดที่ต้องการคำตอบและจุดใกล้เคียง มีข้อดีคือง่ายในการนำไปใช้งานและนิยมใช้กับกริดแบบโครงสร้าง ข้อเสียคือไม่สามารถใช้กับงานที่รูปร่างซับซ้อนได้
- วิธีทางด้านไฟไนต์ วอลุ่ม (Finite Volume Method; FVM) ใช้พิจารณากับการไหลตลอดทั้งปริมาตรโดยพิจารณาทางด้านของขอบเขตเป็นหลัก (boundary element method) คำตอบที่ได้จะมาจากสมการควบคุมที่อยู่ในรูปอินทิเกรต (control volume approach) และเป็นคำตอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางของปริมาตรควบคุม ข้อดีคือใช้กับรูปร่างที่ซับซ้อนได้และรูปร่างของกริดไม่ขึ้นกับพิกัดอ้างอิง แต่มีข้อเสียคือยากในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงาน 3 มิติได้และยังยากในการพัฒนาความแม่นยำ
- วิธีทางด้านไฟไนต์ อิลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) ใช้พิจารณากับการไหลโดยแบ่งส่วนพิจารณาออกเป็นชิ้นย่อยๆ (Cellular Automata) คล้ายกับ FV โดยที่แบ่งพื้นที่เป็น Volume คำตอบจะถูกคำนวณโดยอาศัย รูปร่างซึ่งส่วนมากใช้กับ กริดที่ไม่เป็น โครงสร้างใช้ได้กับงานที่มีรูปร่างซับซ้อนแต่ยากในการหาวิธีคำนวณผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ

ถ้ากริดมีความละเอียดมากๆ การทำ Discretization แต่ละวิธีจะให้คำตอบเหมือนกัน สำหรับปัญหาการไหลแบบเดียวกัน จากการเลือกใช้พิกัดอ้างอิง กริดและวิธีดิสครีไทเซชันดังกล่าวข้างต้นแล้ว การหาผลเฉลยเชิงตัวเลขสามารถทำได้โดยขบวนการเชิงตัวเลขดังจะกล่าวต่อไป

2.8.5 การทำซิมเพิลิก (SIMPLEC Method  $\equiv$  Semi-Implicit Method for Pressure-Link

Quations – Consistent ;Van Doormal and Raithby (1984))

เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตอบ ของแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยการเดาค่าเริ่มต้นและคำนวณหาค่าเพื่อให้ได้คำตอบที่แท้จริง ใช้หลักการของกริดเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การแทนค่าเริ่มต้นด้วยค่าของความดัน หาค่าความเร็ว ตามแนวแกน  $u$  และความเร็วตามแนวรัศมี  $v$  นำค่าคำตอบของความดันที่ได้ช้อนแทนค่าจนได้คำตอบที่แท้จริงของความดันและความเร็วตามแนวแกนและแนวรัศมี ในส่วนของสมการโมเมนตัม ที่ไม่คิดแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง และกำหนดตำแหน่งต่างๆดังแสดงในรูป 2.16 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของการดิสครีไท (Discretized form) ได้ดังนี้



รูป 2.16 การกำหนดตำแหน่งของการดิสครีไท

$$a_{i,j}u_{i,j} = \sum a_{nb}u_{nb} + (p_{I-1,J} - p_{I,J})A_{i,j} \tag{2.16}$$

$$a_{I,j}v_{I,j} = \sum a_{nb}v_{nb} + (p_{I,J-1} - p_{I,J})A_{I,j} \tag{2.17}$$

- ก. กำหนดค่า  $p^*$  เริ่มต้น
- ข. หาค่า จากสมการ  $u^*$  และ  $v^*$  จากสมการข้างล่าง

$$a_{i,j}u_{i,j}^* = \sum a_{nb}u_{nb}^* + (p_{I-1,J}^* - p_{I,J}^*)A_{i,j} + b_{i,j} \tag{2.18}$$



สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ

$$a_{I,j}v_{I,j}^* = \sum a_{nb}v_{nb}^* + (p_{I,J-1}^* - p_{I,J}^*)A_{I,j} \quad (2.19)$$

แทนค่า (2.18) และ (2.19) ใน (2.16) และ (2.17) จะได้

$$a_{i,j}(u_{i,j} - u_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(u_{nb} - u_{nb}^*) + [(p_{I-1,J} - p_{I-1,J}^*) - (p_{I,J} - p_{I,J}^*)]A_{i,j} \quad (2.20)$$

$$a_{i,j}(v_{i,j} - v_{i,j}^*) = \sum a_{nb}(v_{nb} - v_{nb}^*) + [(p_{I,J-1} - p_{I,J-1}^*) - (p_{I,J} - p_{I,J}^*)]A_{i,j} \quad (2.21)$$

ก. ใช้ค่าความดัน  $p'$  แก้ไข ค่าความดันเริ่มต้น  $p^*$  เริ่มต้น

$$p = p^* + p' \quad (2.22)$$

ง. ใช้ค่าความเร็วแก้ไขเพื่อให้ได้ความเร็วที่แท้จริง  $u', v'$

$$\begin{aligned} u &= u^* + u' \\ v &= v^* + v' \end{aligned} \quad (2.23)$$

จ. ใช้ค่าแก้ไขของความดันย้อนแทนค่าในสมการความเร็ว

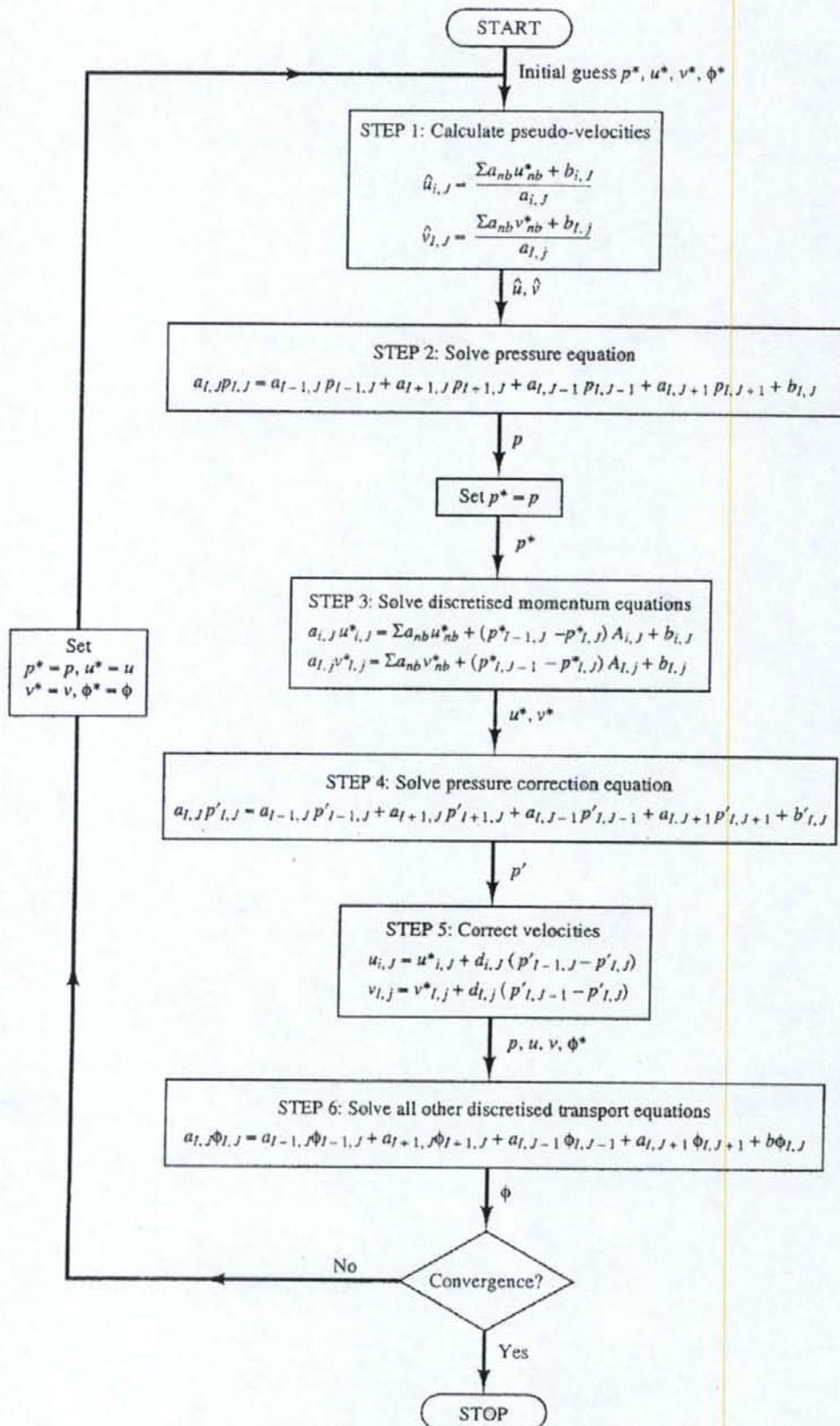
$$a_{i,j}u'_{i,j} = \sum a_{nb}u'_{nb} + (p'_{I-1,J} - p'_{I,J})A_{i,j} \quad (2.24)$$

$$a_{i,j}v'_{i,j} = \sum a_{nb}v'_{nb} + (p'_{I,J-1} - p'_{I,J})A_{i,j} \quad (2.25)$$

ทำให้  $\sum a_{nb}u'_{nb}$  และ  $\sum a_{nb}v'_{nb}$  หดไป จะทำให้สมการการปรับค่าของความเร็วเหลือ

$$u'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{I-1,J} - p'_{I,J}) \quad (2.26)$$

$$v'_{i,j} = d_{i,j}(p'_{I,J-1} - p'_{I,J}) \quad (2.27)$$



รูป 2.17 แผนภูมิการคำนวณด้วยวิธีซิมเพล็กซ์

เมื่อ

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j} - \sum a_{nb}} \quad (2.28)$$

$$d_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{a_{i,j} - \sum a_{nb}} \quad (2.29)$$

โดยการใช้ตัวแก้ค่าของความเร็วจะได้ค่าของความเร็วที่แท้จริงดังสมการ

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i-1,j} - p'_{i,j}) \quad (2.30)$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j} (p'_{i,j-1} - p'_{i,j}) \quad (2.31)$$

การคำนวณโดยรวมด้วยวิธีการทำซิมเพิลิก สามารถเขียนเป็นลักษณะแผนภาพดังรูป 2.17 การแก้ปัญหาคาร์ไหลภายในท่อที่ขี้ดหยุ่นได้จะเป็นการแก้ปัญหาระหว่าง การไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างพร้อมๆ กันซึ่งจะต้องใช้ในการวิจัยนี้ จะมีความดันที่เป็นตัวแปรสำคัญในการแก้ปัญหาร่วมกันระหว่างการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของท่อ

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมามีการประยุกต์ ในการสร้างแบบจำลองทางความร้อนในรอยเชื่อม อลูมิเนียมผสมและผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เกิดจริงในแนวเชื่อม Song and Kovacevic [3] ทำการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน 3 มิติสำหรับ FSW และรายงานการลด ปัญหาการวัดอุณหภูมิของแนวเชื่อมที่เกิดบริเวณใกล้เคียงผิวของเครื่องมือเชื่อมขณะเกิดการเคลื่อนที่ และทำให้หาค่าความร้อนที่เกิดระหว่างเครื่องมือเชื่อมและแนวเชื่อมได้ง่ายขึ้น ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริง นอกจากนั้น Song and Kovacevic [4] ยังได้นำเสนอแบบจำลอง 3 มิติ เพื่ออธิบายกระบวนการกลความร้อน (Thermo-mechanical Process) ของโลหะเชื่อมในรอยต่อ อลูมิเนียม 6061-T6 ผลการพยากรณ์และการวัดพบว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้น ที่บริเวณใกล้เคียงปากของเครื่องมือเชื่อม และแสดงค่าความเค้นตกค้างมีค่าลดลงเมื่อตำแหน่งของการวัดห่างจากผิวหน้าแนวเชื่อม Soundararajan *et al.* [5] สร้างแบบจำลองกลความร้อนเพื่อทำการ พยากรณ์ค่าอุณหภูมิและความเค้นที่รอยต่อของชิ้นงานและแผ่นรองด้านหลังของแนวเชื่อม ค่า ความเค้นและความร้อนที่เกิดขึ้นในการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองที่มีการพิจารณาค่าการนำสัมผัส

(Contact Conductance) มีค่าที่เที่ยงตรงกว่าการสร้างแบบจำลองแบบอื่นๆ และค่าความร้อนสูงสุดเกิดที่ป่าของเครื่องมือเชื่อม มีค่าต่ำกว่าเส้นการแข็งตัว (Solidus Line) ของอลูมิเนียมผสมเพียงเล็กน้อย Zhu and Chao [6] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเค้นตกค้างในการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดย FEM-WELDSIM เพื่อหาค่าความร้อนและความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ผลการพยากรณ์ค่าความเค้นที่เกิดมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงจากการวัด Heurtier *et al.* [7] ประยุกต์ FEM ในการคำนวณหาอุณหภูมิและความเค้นภายในแนวเชื่อมของอลูมิเนียม AA2024-T351 โดยใช้การวิเคราะห์กัลความร้อน 3 มิติและรายงานรูปแบบการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเค้นภายในแนวเชื่อมที่มีค่าในระดับเดียวกันกับค่าที่ได้จากการทดลอง