

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการฉีด

อะลูมิเนียมซิลิกอนอัลลอยด์ เป็นอัลลอยด์ที่ใช้มากที่สุดในงานฉีดอะลูมิเนียมโดแคสติง เนื่องจากมีคุณสมบัติ ในการหล่อดีเยี่ยมใกล้เคียงกับความสามารถที่ต้องการในการหล่อแบบฉีดมากที่สุดดังนี้ (โฆเซิต,2541: 7)

1. มีการไหล (fluidity) ที่ดี
2. มีการหดตัว (shrinkage) น้อย
3. การแตกขณะร้อน (hot shortness) น้อย
4. ไม่ติดกับผิวของแม่พิมพ์ง่าย

ในงานฉีดขึ้นส่วนเกี่ยวกับยานยนต์จะนิยมใช้อะลูมิเนียมอัลลอยด์ต่างๆ ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ เฟสไดอะแกรมของ Al-Si แสดงดังรูป 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (ASTM: B85, 26)

ANSI	ASTM	ส่วนผสม								
		Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Ni	Zn	Sn	Al
360	SG100B	9.0-10.0	2.0	0.6	0.4-0.6	0.35	0.50	0.50	0.15	Remainder
380	SC84B	7.5-9.5	2.0	3.0-4.0	0.10	0.50	0.50	3.0	0.35	Remainder
383	SC102A	9.5-11.5	1.3	2.0-3.0	0.10	0.50	0.30	3.0	0.15	Remainder
413	S12B	11.0-13.0	2.0	1.0	0.10	0.35	0.50	0.50	0.15	Remainder

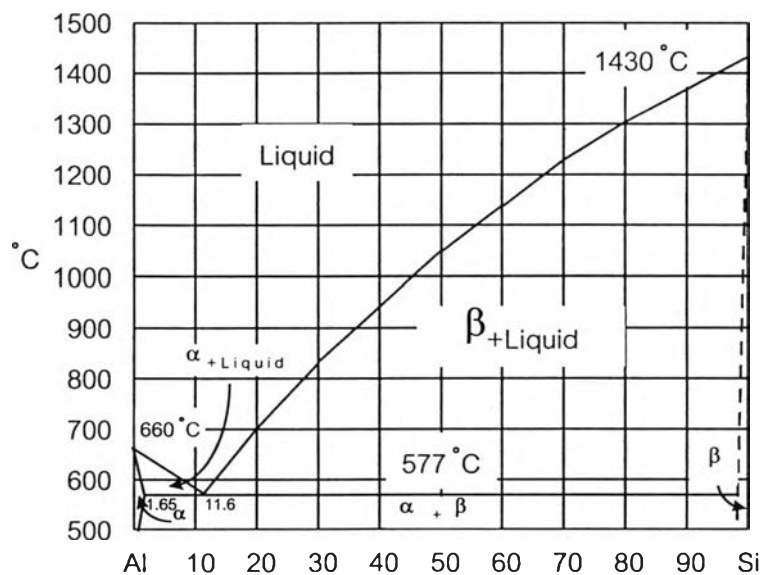
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนและกายภาพของอะลูมิเนียมอัลลอยด์

(Khin Maung Myint, 1994: 9)

คุณสมบัติทางความร้อนและกายภาพ	360	380	383	413
อุณหภูมิที่เป็นของเหลวสมบูรณ์ (Liquidus Temp.) (°C)	596	593	582.2	-
อุณหภูมิที่เป็นของแข็งสมบูรณ์ (Solidus Temp.) (°C)	557	538	515.5	-
อัตราเทียบความร้อน (Specific heat) (cal/g-°C)	0.23	0.23	-	-
สัมประสิทธิ์ของการแผ่ความร้อน ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	22	-	-	-
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (cal/cm ² /cm ² /C/sec)	0.35	0.23	-	-
Latent heat of fusion (cal/g)	93	93	-	-
ความหนาแน่น (g/cm ³)	2.64	2.71	-	-

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (ASTM: B85, 30)

คุณสมบัติทางกล	360	380	383	413
Tensile Strength, ksi (MPa)	44(300)	46(320)	45(310)	43(300)
Yield Strength (0.2% Offset), ksi (MPa)	25(170)	23(160)	22(150)	21(140)
Elongation in 2 in. or 50 mm, %	2.5	2.5	3.5	2.5
Shear Strength, ksi (MPa)	28(190)	28(190)	-	25(170)
Fatigue Strength (R. R. Moore Specimen), 500×10 ⁶ cycles, ksi (MPa)	20(140)	20(140)	-	19(130)



รูปที่ 2.1 รูปแสดงเฟสไดอะแกรมของ Al-Si (H.H. Doehler, 1951: 298)

2.2 คุณสมบัติของเครื่องฉีด

2.2.1 ลักษณะของเครื่องทั่วไป (สุชาติ,2540: 18)

เครื่องฉีดโดแคสติงที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 4 แบบดังนี้

2.2.1.1 เครื่องฉีดแนวนอนแบบวางเย็น (The horizontal cold chamber system)

2.2.1.2 เครื่องฉีดแนวนอนแบบวางเย็นสำหรับงานฉีดแบบศูนย์กลาง

(The horizontal cold chamber for center gating)

2.2.1.3 เครื่องฉีดแนวตั้งแบบวางเย็น (The vertical cold chamber system)

2.2.1.4 เครื่องฉีดแบบวางร้อน (The hot chamber system)

เครื่องฉีดสำหรับงานอะลูมิเนียมโดแคสติงจะเป็นแบบเครื่องฉีดแนวนอนแบบวางเย็น เพราะโลหะที่ใช้เมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอกไม่ก่อให้เกิดอันตราย

เครื่องฉีดแนวนอนแบบวางเย็นจะประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆคือ

- 1) ส่วนของหน้าเครื่องที่ใช้ประกอบแม่พิมพ์
- 2) ส่วนของการส่งกำลังเพื่อการอัดน้ำอะลูมิเนียมเข้าสู่แม่พิมพ์
- 3) ส่วนของการอัดหน้าเพื่อให้มีกำลังต้านแรงดันในแม่พิมพ์
- 4) ส่วนของรางเลื่อนในการเคลื่อนที่ของหน้าเครื่อง
- 5) ส่วนของตู้ควบคุมการฉีด
- 6) ส่วนของการกระทุ้งชิ้นงานให้ออกจากแม่พิมพ์

ขนาดของเครื่องฉีดจะถูกกำหนดด้วยแรงดันปิดหน้าเครื่องมีหน่วยเป็นตัน เครื่องที่มีแรงดันปิดหน้าเครื่องสูงๆ จะมีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่ ดังนั้นจึงสามารถใช้ผลิตงานที่มีขนาดใหญ่ และต้องการนำไปใช้งานรับแรงดันสูง

2.2.2 ความดัน (การอัดน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์) (สุชาติ,2540: 29-32)

ระบบการอัดน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์มี 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- 1) ขั้นตอนการอัดแบบเคลื่อนที่ช้า

ลูกสูบจะเคลื่อนที่โดยปราศจากการกระชาก โดยความเร็วจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงทางเข้าของแม่พิมพ์ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะพยายามไม่ให้เกิดการไหลวน (turbulence) ในกระบอก (sleeve) เพื่อไม่ให้มีฟองอากาศสะสมอยู่ในน้ำโลหะ ช่วงนี้จะสิ้นสุดเมื่อน้ำโลหะเต็มกระบอกก่อนที่จะเข้าสู่แม่พิมพ์ เวลาที่ใช้ประมาณ 1-3 วินาที

- 2) ขั้นตอนการอัดน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์จนเต็มแบบด้วยความเร็วสูง

เป็นช่วงการฉีดน้ำโลหะเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ ซึ่งสภาพการฉีดที่จะต้องคำนึงถึงในช่วงนี้คือ ความเร็วที่ปากทางเข้า และเวลาในการฉีดเต็มแบบ เวลาที่ใช้ประมาณ 0.01-0.2 วินาที

3) ขั้นตอนการอัดความดันในระหว่างแข็งตัว

ขั้นตอนนี้เป็นารชดเชยส่วนที่เกิดการหดตัวของชิ้นงานในขณะที่เปลี่ยนจากน้ำโลหะเหลวมาเป็นโลหะซึ่งแข็งตัว ซึ่งจะใช้ความดันประมาณ 400-1000 บาร์ ในช่วงเวลา 0.01-0.2 วินาที

2.3 สภาวะการฉีด (สุชาติ,2540: 33-36)

ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมเครื่องฉีดมีหลายปัจจัยด้วยกัน การที่ต้องการจะทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพที่ดีนั้นจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยทุกปัจจัย แต่ต้องขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพที่ลูกค้ายอมรับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยที่มีผลเด่นชัดต่องานฉีด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

2.3.1 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบ

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบจะแบ่งเป็น 2 จังหวะ จังหวะแรกคือความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบในช่วงการอัดแบบเคลื่อนที่ช้า โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบพาราซ็อต (parashot) จังหวะที่สองคือความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบในช่วงการอัดแบบเคลื่อนที่เร็ว

2.3.2 เวลาที่ใช้ในการฉีด

เวลาที่ใช้ในการฉีดแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำโลหะเต็มแบบในจังหวะการอัดแบบเคลื่อนที่เร็ว ซึ่งค่าของเวลาในการเต็มแบบจะขึ้นอยู่กับความหนาของผนังชิ้นงานเฉลี่ย และจะสัมพันธ์กับค่าอื่นๆ ซึ่งใช้ในการคำนวณขนาดของทางเข้าน้ำโลหะในแม่พิมพ์ด้วย และ เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ ค่าของเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาบางของชิ้นงาน ถ้าเวลาน้อยอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยวในขณะถอดพิมพ์ ถ้าเวลามากการถอดงานออกจากพิมพ์จะยากและยังเสียเวลาในการผลิตอีกด้วย

2.3.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในที่นี่มี 2 ลักษณะ คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ และ อุณหภูมิในการฉีดน้ำอะลูมิเนียมเหลว

2.4 หน้าที่และองค์ประกอบของแม่พิมพ์ (Designing Die Casting Die, 1992: 1-2)

2.4.1 หน้าที่ของแม่พิมพ์

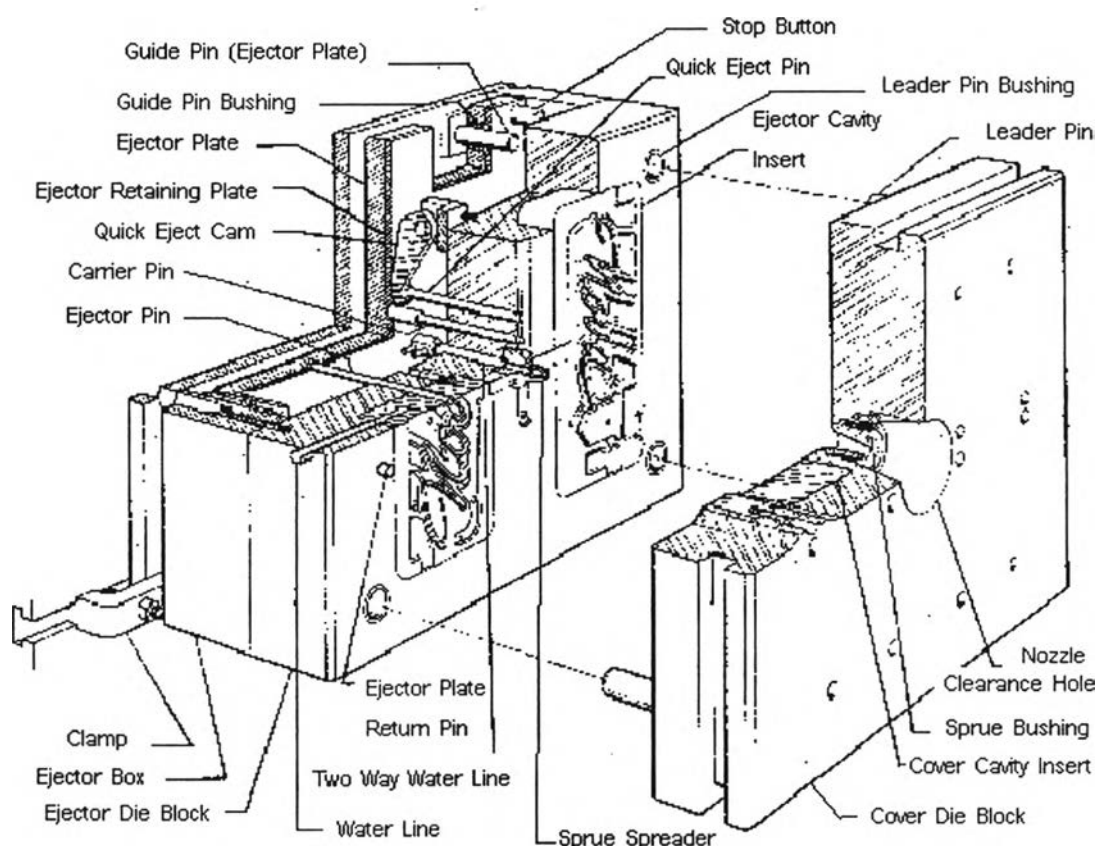
มี 4 หน้าที่สำคัญคือ

- 1) อุ่นน้ำโลหะเหลวให้อยู่ในรูปที่ต้องการ
- 2) ทำให้น้ำโลหะเข้าสู่ในโพรงซึ่งมีรูปร่างที่ต้องการ

- 3) นำความร้อนออกจากน้ำโลหะเหลวเพื่อทำให้น้ำโลหะแข็งตัว
- 4) ทำให้ชิ้นงานที่แข็งตัวแล้วหลุดออกจากแบบ

2.4.2 องค์ประกอบของแม่พิมพ์

แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของแม่พิมพ์ (Designing Die Casting Die, 1992: 2)

2.5 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการผลิตแม่พิมพ์

2.5.1 เส้นแนวแบ่งแยก (Parting Line)

คือส่วนที่จะต้องทำการพิจารณาเป็นอันดับแรกว่าจะทำการผ่าแบบตรงไหน จึงจะทำให้สามารถถอดชิ้นงานออกจากแบบได้สะดวกที่สุด หลังจากทำการกำหนดได้แล้วจะทำให้แม่พิมพ์ถูกแบ่งเป็นเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เคลื่อนที่ (movable die) และ ส่วนที่อยู่กับที่ (fixed die)

2.5.2 มิติความเผื่อ (dimension tolerance) (Khin Maung Myint, 1994: 17)

การกำหนดค่ามิติความเผื่อของแม่พิมพ์นั้น จะต้องพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- 1) ค่าเผื่อที่โพรงแบบและได้แบบเพื่อสำหรับการทำผิวสำเร็จของชิ้นงาน

- 2) การขยายตัวทางความร้อนของแม่พิมพ์ขณะทำการปฏิบัติงาน
- 3) อุณหภูมิในการฉีดและการหดตัวของชิ้นงาน
- 4) ค่าการเสื่อมและสึกหรอตามปกติของโพรงแบบและไส้แบบ
- 5) ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ ที่สัมพันธ์กับส่วนอื่นๆ
- 6) ความเรียบผิวสำเร็จของแม่พิมพ์ (R_a) โดยทั่วไปมีค่า 1.27-3.17 ไมโครเมตร

2.5.3 ค่าลาดเอียง (draft)

เมื่อเปิดแม่พิมพ์ออกชิ้นงานจะถูกกระชากออกมา เพื่อที่จะได้กระชากออกได้ดีต้องทำมุมเอียงให้เหมาะสม มุมเอียงนี้จะแตกต่างกันไปตามรูปร่างลักษณะของชิ้นงานและความหนาของผนัง อย่างไรก็ตามหากมุมเอียงยิ่งกว้างยิ่งดีเพราะทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากแม่พิมพ์ง่ายไม่เสียรูป

2.5.4 อินเสิร์ต (insert; cavity block)

คือ ก้อนเหล็กทรงสี่เหลี่ยมที่ภายในถูกกัดเป็นโพรงที่เป็นรูปร่างของชิ้นงานและระบบทางเข้า การใช้อินเสิร์ตทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์นานขึ้นสามารถผลิตชิ้นงานได้เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาความแตกต่างของอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ เนื่องจากบริเวณนี้จะเป็นที่ในการวางท่อระบายน้ำ (waterlines) แต่วัสดุที่ใช้ในการทำอินเสิร์ตส่วนใหญ่เป็นเหล็กเกรดดีกว่าเหล็กที่ทำโฮลด์เดอร์บล็อก (holder block) เช่นเหล็ก H-13 หรือ P-20 หรือ H-21 ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าแม่พิมพ์ปกติที่ไม่ใช้อินเสิร์ต

2.5.5 อันเดอร์คัท (undercut) (Khin Maung Myint, 1994: 17)

คือ ส่วนที่อยู่ภายใต้พื้นผิวแบ่งแยก เมื่อเกิดอันเดอร์คัทขึ้นจะทำให้ไม่สามารถปลดชิ้นงานออกได้ ดังนั้นในการออกแบบควรหลีกเลี่ยงส่วนที่ทำให้เกิดอันเดอร์คัทขึ้น โดยการเลือกกำหนดแนวแบ่งแยก (parting line) ให้เหมาะสม ในส่วนที่เกิดอันเดอร์คัทสามารถแก้ไขได้โดยใช้ไส้แบบ (cores) ซึ่งจะต้องมีกลไกเฉพาะในการนำไส้แบบเข้าสู่แม่พิมพ์และนำออกเมื่อแม่พิมพ์ทำการเปิด ส่งผลให้อัตราการผลิตลดลง แต่ถึงอย่างไรก็ตามก็สามารถช่วยลดวัสดุและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการด้วยเครื่องจักรลงได้

2.5.6 ขนาดเผื่อการหดตัว (shrinkage)

เมื่อทำโพรงให้มีขนาดเท่ากับผลิตภัณฑ์ ในขณะที่หล่อ ขนาดของโพรงจะขยายตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นเทียบกับขนาดเดิม อัตราส่วนนี้เรียกว่า ขนาดเผื่อการหดตัว (shrinkage tolerance) ขนาดเผื่อการหดตัวที่นิยมใช้กันในกรณีของอะลูมิเนียมอัลลอยด์ 380 คือ 0.6% (Tracy Stadelman, 1983: 182)

2.6 การออกแบบแม่พิมพ์

2.6.1 วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

ส่วนของแม่พิมพ์ที่สัมผัสกับน้ำอะลูมิเนียมเหลว วัสดุที่ใช้ทำจะเป็นจำพวกเหล็กกล้างานร้อน (hot work tool steel) จำพวกเหล็ก H-13 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีตามตารางที่ 2.4 ส่วนลักษณะการนำไปใช้งานของเหล็กที่กล่าวมานั้นจะแสดงในตารางที่ 2.5 และคุณสมบัติทางความร้อนของเหล็ก H-13 จะแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์ในส่วนที่สัมผัสกับน้ำอะลูมิเนียมเหลว (เอกสารของบริษัท จุฬารรรณ จำกัด)

JIS	AISI	ส่วนผสมทางเคมี								ความแข็ง	
		C	Cr	Mo	W	V	Ni	Mn	Si	ก่อนชุบ (HB)	หลังชุบ (HRC)
SKD61	H-13	0.38	5.2	1.4	-	1.0	-	0.5	0.90	220	53
	H-13	Micro Fine SKD61								220	52

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงลักษณะการใช้งาน (เอกสารของบริษัท จุฬารรรณ จำกัด)

JIS	AISI	ลักษณะการใช้งาน
SKD61	H-13	เหล็กทำแม่พิมพ์ฉีดอะลูมิเนียม ทองเหลือง ดีขึ้นรูปงานร้อน
	H-13(Micro Fine SKD61)	แม่พิมพ์ไดแคสติง พิมพ์ฉีดอะลูมิเนียม มีความแข็ง เหนียว ที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนของเหล็ก H-13 (Jonathan Papai and Carroll Molbley, 1991: 380)

คุณสมบัติทางความร้อน	H-13
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{cal/cm}^2/\text{cm}^{\circ}\text{C}/\text{sec}$)	$k = 0.0587 + 8.6 \times 10^{-6}T$
ความหนาแน่น (g/cm^3)	$\rho = 7.8 + 2.5 \times 10^{-4}T$
อัตราเทียบความร้อน (specific heat) ($\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$)	$c = 0.110 - 1.12 \times 10^{-4}T + 7.5 \times 10^{-4}T^2$

2.6.2 ระบบทางเข้า

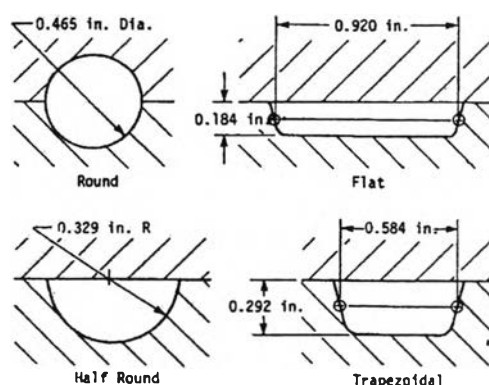
ระบบทางเข้าจะประกอบไปด้วยช่อง (channels) และ โฟรงแบบ (cavity) ที่แบ่งแยกแม่พิมพ์ออก โดยช่องต่างๆนี้จะนำน้ำโลหะเหลวไหลเข้าสู่โฟรงแบบ ซึ่งการไหลของน้ำโลหะจะเริ่มจากไหลผ่านบิสกิต ผ่านทางวิ่ง (runners) ผ่านทางวิ่งเข้า (gate runners) และทางเข้า (gates) ไปชนผนังฝั่งตรงข้ามของโฟรงแบบ โดยที่รูปร่างของลำน้ำโลหะเหลวจะเหมือนกับพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าและสุดท้ายจะไหลเข้าสู่รูล้น (overflows) ดังนั้นองค์ประกอบของระบบทางเข้ามีดังนี้

2.6.2.1 บิสกิต (biscuit)

เป็นช่องว่างที่มีลักษณะเป็นวงกลมอยู่ในฝั่งของแม่พิมพ์ส่วนที่อยู่กับที่ และอยู่ส่วนปลายของกระบอกลอด (shot sleeve) ขนาดของบิสกิตจะมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของกระบอกลอด หน้าที่ของบิสกิต คือ ทำให้อุณหภูมิของน้ำอะลูมิเนียมมีความสม่ำเสมอเนื่องจากน้ำอะลูมิเนียมถูกอัดผ่านกระบอกลอดมาปะทะกับบิสกิตก่อนที่จะเข้าสู่ทางวิ่ง (runner) ทำให้ส่วนนี้มีอุณหภูมิสูงมากและน้ำอะลูมิเนียมเกิดการปั่นป่วน จึงต้องมีการหล่อเย็นที่บริเวณนี้เพื่อทำให้อุณหภูมิของอะลูมิเนียมเท่าเทียมกัน (isolate) ซึ่งทำให้อุณหภูมิของน้ำอะลูมิเนียมที่ไหลออกจากบิสกิตมีอุณหภูมิเท่ากันโดยตลอดทั้งหน้าตัด (ความแตกต่างของอุณหภูมิของแต่ละชั้น (layer) มีน้อยลง)

2.6.2.2 ทางวิ่ง (runner)

ทางวิ่งคือช่องทางที่นำน้ำโลหะเหลวจากบิสกิตไปสู่ทางวิ่งเข้า (gate runner) รูปร่างของทางวิ่งสามารถสเก็ตช์ (sketch) ลงบนแบบของชิ้นงานเพื่อสำหรับการออกแบบ ทางวิ่งควรมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรต่ำสุดเพื่อลดการสูญเสียความร้อนของน้ำโลหะเหลวที่จะวิ่งไหลผ่าน ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดโค้งมน (วงกลม) จึงเป็นรูปร่างที่เหมาะสม พื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งโดยทั่วไปที่นิยมใช้ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3

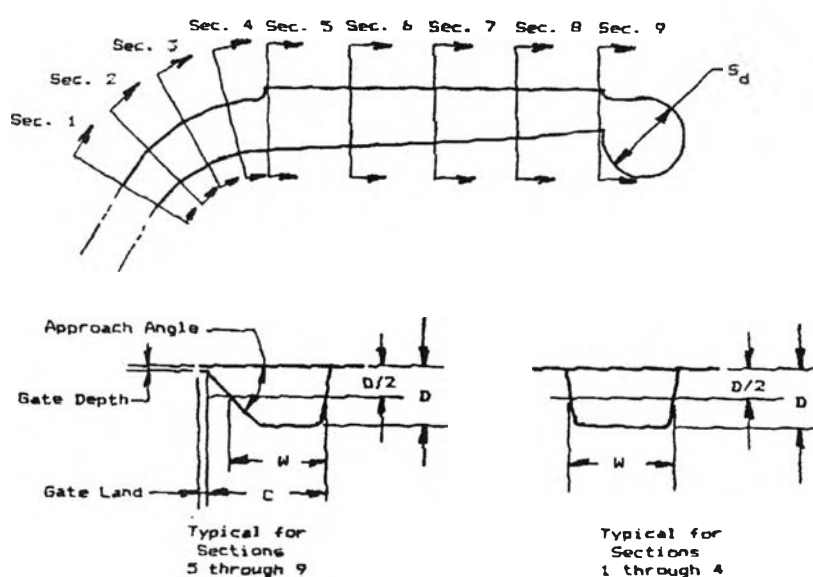


รูปที่ 2.3 รูปแสดงพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งที่นิยมใช้ (Designing Die Casting Die, 1992: 20)

2.6.2.3 ทางวิ่งเข้า (gate runners)

เป็นทางเชื่อมต่อระหว่างทางวิ่งหลักเพื่อนำน้ำโลหะไหลเข้าสู่ทางเข้า และสามารถแบ่งลักษณะของทางวิ่งเข้าออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ

1) ทางวิ่งเข้าแบบสัมผัส (tangential gate runners) จะมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อยๆ ตามความยาวของทางเข้า โดยลักษณะจะถูกกำหนดด้วยหน้าตัดทั้งหมด 9 หน้าตัด ซึ่งรูปร่างและองค์ประกอบของทางวิ่งเข้าแบบสัมผัสนั้นจะแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแสดงลักษณะและองค์ประกอบของทางวิ่งเข้าแบบสัมผัส

(Gating Die Casting Dies, 1996:56)

โดยที่

D คือ ความสูงของพื้นที่หน้าตัด

W คือ ค่าความกว้างของพื้นที่หน้าตัดที่วัดจากกึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัด
(D/2)

C คือ ค่าความกว้างของพื้นที่หน้าตัดที่วัดจากกึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัด
(D/2)จนถึงเกตแลนด์ (gate land)

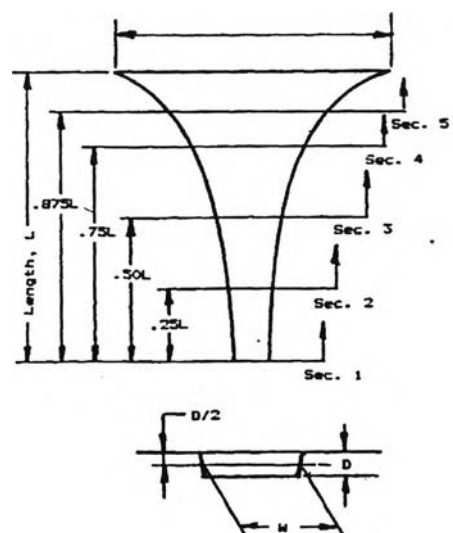
เกตแลนด์ (Gate Land) เป็น ทางเชื่อมต่อระหว่างทางเข้ากับชิ้นงานโดย
มากมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5–1.5 มม.

มุมลาดเอียง (approach angle) เป็นลักษณะเฉพาะของทางวิ่งเข้าแบบ สัมผัสซึ่งมีลักษณะลาดเอียงไปสู่ทางเข้า มุมลาดเอียงที่เลือกไว้จะ ต้องอยู่ในตำแหน่งที่มวลของทางวิ่งเข้าห่างเพียงพอจากชิ้นงาน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความร้อนเข้มข้น (concentrate heat) บริเวณของชิ้นงานที่ติดกับทางเข้านั้น ส่งผลให้ชิ้นงานบริเวณดังกล่าวเกิดรูพุนขึ้น ค่าที่เหมาะสมของมุมลาดเอียงขึ้นอยู่กับรูปร่าง ของชิ้นงานบริเวณนั้น แต่ค่านิยมจะอยู่ที่ 30-45 องศา

ตัวลดแรงกระแทก (shock absorber; S_d) จะอยู่ส่วนท้ายของแต่ละทาง วิ่งเข้าแบบสัมผัส ทำหน้าที่ในการลดแรงกระแทกของน้ำโลหะ เหลวที่บริเวณปลายของทางวิ่งเข้าแบบสัมผัส ซึ่งปรากฏการณ์ที่ น้ำโลหะพุ่งชนบริเวณปลายของทางวิ่งเข้าแบบสัมผัสโดยไม่มีตัว ลดแรงกระแทกจะส่งผลให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สั้นลง ใน ส่วนของความหนาของตัวลดแรงกระแทกจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 2.5 มม.

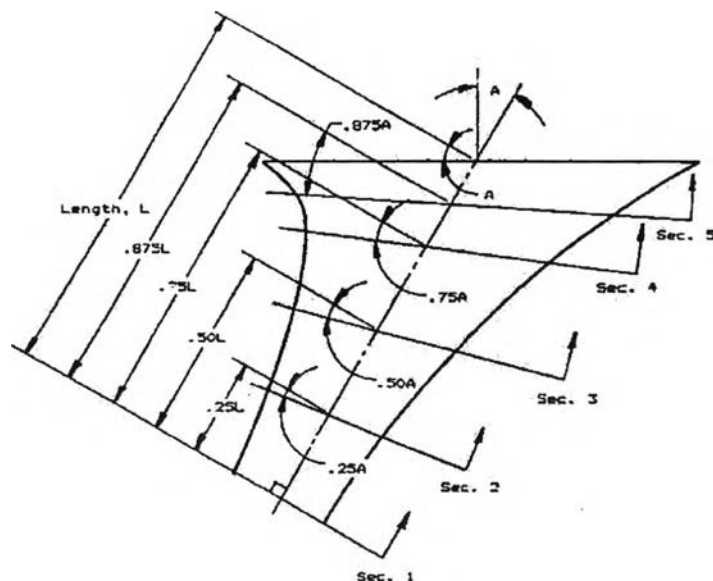
การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่งเข้าแบบสัมผัสและองค์ประกอบต่างๆจะ แสดงรายละเอียดพร้อมตัวอย่างประกอบในบทที่ 4

2) ทางวิ่งเข้ารูปพัด (fan gate runners) ลักษณะโดยทั่วไปจะแสดงดังรูปที่ 2.5 ก และ 2.5 ข



รูปที่ 2.5ก รูปแสดงลักษณะของทางวิ่งเข้ารูปพัดที่มีเส้นกึ่งกลางตั้งฉากกับชิ้นงาน

(Gating Die Casting Dies, 1996: 61)



รูปที่ 2.5 ข รูปแสดงลักษณะของทางวิ่งเข้ารูปพืดที่มีเส้นกึ่งกลางทำมุมเอียงกับชิ้นงาน

(Gating Die Casting Dies, 1996: 62)

ลักษณะของทางวิ่งเข้ารูปพืดจะถูกกำหนดด้วยหน้าตัดทั้งหมด 6 หน้าตัด ซึ่งแต่ละหน้าตัดจะมีความลึก (D) และความกว้าง (W) การคำนวณในแต่ละหน้าตัดจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 4

2.6.2.4 ทางเข้า (gates)

หมายถึง รูเล็กๆ ที่เชื่อมต่อบหว่างทางวิ่งกับชิ้นงาน เพื่อให้หน้าอะลูมิเนียมเหลวไหลเข้าไปในโพรงแบบ (cavity) ของแม่พิมพ์ขณะทำการฉีด หน้าอะลูมิเนียมเหลวจะถูกฉีดออกจากหัวของเครื่องฉีดผ่านมายังบิสกิต ทางวิ่ง ทางวิ่งเข้า และ ทางเข้า ดังนั้นทางเข้าจึงมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อชิ้นงาน ขนาดของทางเข้าจะมีพื้นที่หน้าตัดเล็กๆ อาจเป็นแบบกลมหรือสี่เหลี่ยมขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงาน ซึ่งขนาดพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าเล็กการเคาะให้ชิ้นงานหักออกจะง่าย และเกิดรอยตำหนิที่เล็กบนผิวชิ้นงาน แต่ถ้าเล็กเกินไปจะทำให้หน้าอะลูมิเนียมฉีดเข้าไปไม่เต็มแบบ ดังนั้นการกำหนดขนาดของทางเข้าให้เหมาะสมจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยทั่วไป ในทางปฏิบัติจะพิจารณาจาก ความหนาของชิ้นงาน อุณหภูมิของอะลูมิเนียมที่หลอม อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ปริมาณการไหลและคุณสมบัติในการไหลของอะลูมิเนียม

การกำหนดตำแหน่งของทางเข้าเป็นจุดที่สำคัญจุดหนึ่งในการที่จะทำให้หน้าอะลูมิเนียมเหลวไหลเข้าไปในโพรงอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ การกระจายการไหลของหน้าอะลูมิเนียมเข้าไปในส่วนต่างๆ ของโพรงในเวลาใกล้เคียงกัน โดยระยะทางการไหล และ ทิศทางการไหลก็ควร

จะเป็นทิศทางเดียวกัน ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงาน ซึ่งบางชิ้นงานที่มีลักษณะยาวต้อง ใช้ทางเข้า 2 ทาง หรือ กรณีที่โพรงมีสิ่งกีดขวางเช่น เข็มแทง ต้องสร้างทางเข้า 2 ทางเพื่อทำการ หลบ มิเช่นนั้นแม่พิมพ์จะมีอายุการใช้งานต่ำ

ผลกระทบของทางเข้าที่มีต่อชิ้นงานฉีด คือ คุณภาพ และ อัตราการผลิต (productivity)

2.6.2.5 รูล้น (overflows)

หน้าที่ที่สำคัญอย่างหนึ่งของรูล้นก็คือเป็นที่กักเก็บอากาศที่เกิดจากช่องว่างของตัว โพรงแบบ(รวมปริมาตรของชิ้นงาน ระบบทางเข้า และรูล้นด้วย) กับช่องว่างของกระบอกฉีด เนื่องจากแม่พิมพ์ในงานฉีดอะลูมิเนียมได้แคสติงนั้นทำจากเหล็กซึ่งไม่มีช่องว่างในการให้อากาศไหลออก สู่อากาศ

การวางตำแหน่งของรูล้นดูที่เส้นทางการไหลของน้ำโลหะเหลวว่ามีการเปลี่ยนแปลงกระทันหันหรือการไหลวนบริเวณไหน ตรงนั้นก็จะทำการกำหนดรูล้น และ บริเวณที่น้ำโลหะ ไหลไปชนกับผนังแม่พิมพ์ ซึ่งรูล้น ณ ตำแหน่งนี้จะมีทางหนีของอากาศ (air vent) ซึ่งมีลักษณะเป็น ครีบบางๆต่อออกไปจากรูล้น เพื่อไล่อากาศออกจากชิ้นงาน ส่วนขนาดของรูล้นตามตารางที่ 2.7 นั้น เป็นค่าที่แนะนำ โดยให้มีความสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานและเวลาในการเติมเต็ม ซึ่งสามารถ ดูได้ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.7 ตารางแสดงขนาดของรูล้นที่สัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานและเวลาเติมเต็ม

(Designing Die Casting Die, 1992: 18)

ความหนาของโพรง แบบในแต่ละส่วน (มม.)	เวลาในการเติมเต็ม (วินาที)	ขนาดของรูล้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับปริมาตร ของส่วนแบ่งโพรงแบบ	
		คุณภาพผิวสำเร็จดี (%)	ยอมให้มีโคลด์ชัทบ้าง (%)
0.90	0.012-0.017	150	75
1.30	0.017-0.025	100	50
1.80	0.026-0.038	50	25
2.50	0.035-0.050	25	25
3.20	0.042-0.060	-	-

หมายเหตุ ค่าที่แสดงสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม

ขั้นตอนในการออกแบบระบบทางเข้าตามหลักการของ NADCA (North American Die Casting Association) มี 7 ขั้นตอนดังนี้ (Gating Die Casting Dies, 1996)

1. กำหนดเส้นทางการไหลของน้ำโลหะผ่านโพรงแม่พิมพ์(cavity)
2. คำนวณเวลาในการเติม(filling time)
3. กำหนดความเร็วของทางเข้า
4. กำหนดและกำหนดค่าความลึกของทางเข้า (gate depth) ต่ำสุดและค่าสูงสุด
5. พิจารณารูปร่างของทางเข้าและขนาดของเข็มแทง (plunger) ที่สอดคล้องกับความต้องการกำลังของระบบทางเข้าและกำลังของเครื่องจักรที่ทำการฉีด
6. กำหนดขนาดและความเร็วของเข็มแทง
7. คำนวณหามิติของทางเข้าและทางวิ่ง

รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะถูกอธิบายในบทที่ 4 พร้อมตัวอย่างประกอบซึ่งในที่นี้ก็คือชิ้นงานตัวอย่าง (เครื่องสูบน้ำมันรถยนต์)

2.6.3 ระบบการหล่อเย็น

โดยทั่วไป ผู้ออกแบบแม่พิมพ์ไม่ค่อยให้ความสำคัญกับระบบการหล่อเย็นมาก และจัดวางระบบหล่อเย็นหลังจากออกแบบระบบอื่นเรียบร้อยแล้ว ซึ่งเป็นความคิดที่ไม่ถูกต้อง การจัดวางระบบการหล่อเย็นควรทำไปพร้อมๆ กับการออกแบบระบบอื่น เพื่อไม่ให้เกิดการจัดวางระบบหล่อเย็นติดเงื่อนไขด้านอื่น การออกแบบระบบการหล่อเย็นที่ไม่เหมาะสมทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ เช่น ถ้าออกแบบระบบการหล่อเย็นที่ใหญ่เกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียด บิดงอ หรืออาจทำให้ชิ้นงานแตกร้าวได้ หรือถ้าออกแบบระบบการหล่อเย็นที่เล็กเกินไป จะทำให้รอบเวลาในการฉีดมากขึ้น สิ่งสำคัญที่จำเป็นจะต้องจัดวางให้เหมาะสม เพื่อการหล่อเย็นจะได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหล่อเย็น ระยะห่างจากผิวของโพรงแบบ และปริมาณน้ำในการพ่นแม่พิมพ์เพื่อลดอุณหภูมิ

นอกจากนี้ผู้ออกแบบแม่พิมพ์จะต้องทำการวิเคราะห์รูปร่างของชิ้นงาน ทางวิ่ง และ รู ล้น สำหรับความจุความร้อน (heat content) และทำการระบุในแต่ละส่วนว่าส่วนไหนจะก่อให้เกิดอัตราการกระจายความร้อนแบบจำกัด (restricted heat flow) ซึ่งสภาพเช่นนี้ถูกเรียกว่าพื้นที่ของเส้นทางระบายความร้อนแบบเบนเข้าหา (converging heat flow paths) โดยทำนองเดียวกันกับพื้นที่ของเส้นทางระบายความร้อนลู่ออก (diverging heat flow paths) เช่นมุมด้านนอกของชิ้นงาน และครีป ก็จะต้องทำการระบุลงไปด้วย ผู้ออกแบบแม่พิมพ์จะต้องออกแบบลักษณะเฉพาะของแม่พิมพ์เพื่อให้เกิดความสมดุลแก่อิทธิพลของค่าความร้อนต่างๆที่เข้าไปและอัตราการกระจายความร้อนแบบจำกัด

รูปร่างของผิวแบ่งแยกแม่พิมพ์ (parting surface) รูปร่างของไส้แบบที่เคลื่อนที่ (Moving Cores) เส้นตะเข็บระหว่างชิ้นอินเสิร์ต วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ทางหนีอากาศ และ ท่อน้ำ (Water Lines) ล้วนมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะของการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์

ขั้นตอนในการออกแบบเชิงวิเคราะห์ของระบบหล่อเย็นตามหลักการของ SDCE มี 7 ขั้นตอนดังนี้ (Designing Die Casting Die, 1992: 27-37)

1. แบ่งชิ้นงาน(รวมระบบทางเข้า) เป็นส่วนๆซึ่งเรียกว่า ชิ้นส่วนความร้อน (thermal section)
2. พิจารณาพื้นฐานด้านความจุความร้อน (basic heat content)
3. คำนวณหาค่าการได้รับและสูญเสียความร้อน (heat gain and heat loss) ของแต่ละชิ้นส่วนระหว่างการไหลผ่าน
4. พิจารณาค่าความร้อนสุดท้ายในแต่ละชิ้นส่วนความร้อน ที่อยู่ในตำแหน่งขององค์ประกอบของแม่พิมพ์
5. พิจารณาการดูดซับความร้อนจากการพ่นน้ำ (water spray) บนผิวแม่พิมพ์
6. อัตราค่าความร้อนสุดท้ายที่จะถูกนำออกจากลักษณะภายในของแม่พิมพ์
7. พิจารณาตำแหน่งและขนาดของท่อน้ำ (waterlines)

รายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะถูกอธิบายในบทที่ 4 พร้อมด้วยตัวอย่างประกอบซึ่งในที่นี้ก็คือชิ้นงานตัวอย่าง (เครื่องสูบน้ำมันรถยนต์)

2.6.4 ระบบนำปลดชิ้นงาน

การออกแบบระบบนำปลดชิ้นงานเป็นสิ่งที่สำคัญ ถ้าระบบนำปลดชิ้นงานไม่เหมาะสม จะทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพลดลง เช่น เกิดการบิดงอ การแตก และรอยร้าวขึ้น ดังนั้นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบระบบนำปลดชิ้นงาน คือการกำหนดตำแหน่ง และ จำนวนหมุดแทง (ejector pins) อย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความดุล (balances) ในการนำปลดชิ้นงานและส่วนประกอบออกจากแม่พิมพ์ในส่วนที่เคลื่อนที่ ในการวางตำแหน่งของหมุดแทงควรวางหมุดแทงนอกตัวชิ้นงานให้มากที่สุด เช่น วางบนส่วนของรูสัน ทางวิ่ง และ บิสกิต ในกรณีที่ว่าบนตัวของชิ้นงานจะต้องวางในส่วนที่หนาของชิ้นงาน

นอกจากจะพิจารณาถึงตำแหน่งและจำนวนของหมุดแทงแล้วจะต้องคำนึงถึงแรงของเครื่องจักรที่จะมากกระทำกับหมุดแทงเพื่อดันให้ชิ้นงานที่แข็งตัวออกจากแม่พิมพ์ โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของชิ้นงานที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานกับแม่พิมพ์ และความดันตกค้าง (residual pressure) ภายในโพรงแบบ

2.7 การวิเคราะห์แม่พิมพ์

2.7.1 ข้อบกพร่องของชิ้นงานอะลูมิเนียมไดแคสติง (โฆเซิต, 2541: 22)

การแข็งตัวอย่างรวดเร็วของน้ำโลหะในกระบวนการฉีดด้วยความดันนี้ทำให้ชิ้นงาน มีโครงสร้างที่ละเอียด มีความแข็งแรงสูง ซึ่งก็เป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดความเค้นที่แตกต่างกันมาก ระหว่างผิวและเนื้อภายในชิ้นงานมีผลทำให้เกิดการแตกจากการหดตัว (shrinkage crack) และข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในงานฉีดด้วยความดันมีดังนี้

1) รูที่เกิดจากหดตัว (shrink hole) เกิดจากการเติมน้ำโลหะเข้าไปไม่พอ เมื่อเกิดการเย็นตัว โลหะจะหดตัวทำให้เนื้อโลหะส่วนที่แข็งตัวที่หลังหายไป สังเกตได้ว่า รูนี้จะขรุขระและไม่มีรูปร่างที่แน่นอน

2) รูที่เกิดจากก๊าซ (gas hole) เกิดจากการที่ก๊าซไม่สามารถหนีออกได้ทันก่อนที่น้ำโลหะแข็งตัว สังเกตได้ รูนี้จะมีลักษณะมน กลม และเรียบ

3) รอยแตกจากการหดตัว (shrink crack) เกิดจากความเค้นภายในระหว่าง การแข็งตัวมีค่าสูงกว่าความเหนียวและความแข็งแรงของน้ำโลหะที่แข็งตัวจากสถานะของเหลว

4) เนื้อโลหะไม่ประสานกันขนาดใหญ่ (cold shut) มีขนาด 1-2 มิลลิเมตร เกิดจากน้ำโลหะที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์แยกตัวออกจากกันเมื่อมารวมกันไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวเนื่องจากสูญเสียความร้อน และผิวเกิดเป็นออกไซด์ ทำให้น้ำโลหะไม่ประสานกัน

5) เนื้อโลหะไม่ประสานกันขนาดเล็ก (flow line) มีขนาด 10-100 ไมโครเมตร มองเห็นเป็นเส้น มีสาเหตุเดียวกับโคลด์ชัต แต่มีขนาดเล็กกว่า เกิดที่ผิวเนื่องจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์น้อยเกินไป

2.7.2 วิเคราะห์การไหล

2.7.2.1 แนวคิดการไหลของน้ำอะลูมิเนียมในแม่พิมพ์

1) ทฤษฎีของ Frommer (H.H. Doehler, 1951:126-129)

Frommer ได้ทำการศึกษาสภาวะการฉีดในงานฉีดสังกะสี โดยทำแม่พิมพ์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้พบสิ่งที่เกิดขึ้นดังนี้

น้ำโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์โดยผ่านทางเข้า (gate) พุ่งเข้าไปโดยมีรูปร่างสัมพันธ์กับภาคตัดขวางของทางเข้า แล้วเข้าไปชนด้านตรงข้ามของแม่พิมพ์ เกิดการหมุนวนในตำแหน่งนั้น แล้วค่อยไหลล้นไปตามผิวแม่พิมพ์แล้วเติมแม่พิมพ์ในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยตรงกลางแม่พิมพ์จะเป็นจุดที่แข็งตัวเป็นอันดับสุดท้าย ซึ่งการพุ่งเข้าแม่พิมพ์จะขึ้นกับพลังงานการไหลหรือแรงดันที่ให้กับน้ำโลหะ และแรงเสียดทานที่ผิวแม่พิมพ์กับอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะนั่นเอง น้ำโลหะที่ไหลวนที่ผิวของแม่พิมพ์ก่อนที่จะไหลลงมาเรียกว่า โฟร์รันเนอร์ส (forerunners) ซึ่งพฤติกรรมนี้ขึ้น

กับความหนาของชั้นงาน แรงเสียดทานและอัตราการเย็นตัวที่ผิวแม่พิมพ์ ซึ่งถ้ายังมีขนาดเล็กก็จะมีผลอย่างมากต่อแรงเสียดทานและการเย็นตัว ความเร็วของไฟร์รันเนอร์จะลดลงตามระยะทางที่ห่างจากจุดที่น้ำโลหะพุ่งปะทะ (pool) ค่าความดันและค่าความเร็วในการฉีดสัมพันธ์กันดังสมการ

$$V = \sqrt{\frac{2gP}{D}} \quad (2.1)$$

โดยที่

V = ความเร็วในการฉีด

g = ความเร่งโน้มถ่วง

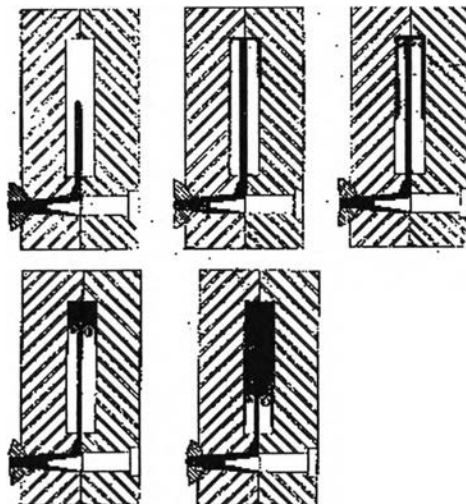
P = ความดันในการฉีด

D = ค่าความถ่วงจำเพาะของอัลลอยด์

$V = \sqrt{P} * 0.87$ สำหรับอะลูมิเนียม

จากผลการทดลองของ Frommer สรุปได้ว่า ทางเข้าที่มีขนาดใหญ่ดีกว่าทางเข้าที่มีขนาดเล็กดังนี้

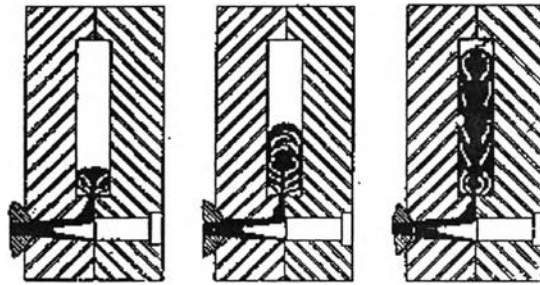
1. มีอันตรายในการฉีดน้อยกว่า
2. มีการหมุนวนของน้ำโลหะขณะฉีดน้อยกว่า
3. การปั่นป่วนที่จุดเข้าปะทะ (pool) น้อยกว่า
4. การรวมตัวกับอากาศน้อยกว่า
5. น้ำโลหะที่ไหลที่ผิวแม่พิมพ์สามารถร้อนอยู่ได้นานกว่า



รูปที่ 2.6 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Frommer (H.H. Doehler, 1951:127)

2) ทฤษฎีของ Brandt (H.H. Doehler, 1951:131)

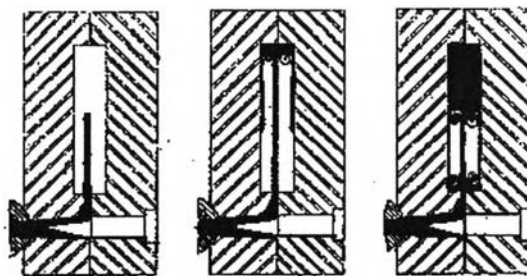
Brandt ได้ทำการศึกษาบนแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเหมือนกับของ Frommer แต่ลักษณะการเข้าไปของน้ำโลหะจะไม่พุ่งไปด้านตรงข้ามแต่จะเข้าไปเต็มช่องว่างก่อนแล้วเพิ่มขึ้นเพื่อเติมช่องว่างให้เต็ม ซึ่งตรงข้ามกับทฤษฎีของ Frommer ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Brandt (H.H. Doehler, 1951:131)

3) ทฤษฎีของ Koester และ Goehring (H.H. Doehler, 1951:132)

ทฤษฎีนี้ได้สนับสนุนทฤษฎีของ Frommer ซึ่ง Koester และ Goehring แห่งสถาบันวิจัยโลหะ เมืองสตูดการ์ท เยอรมัน ได้ทำการทดลองโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นแก้วทนความร้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ในโครงโลหะ ทำให้สามารถเห็นการไหลที่เกิดขึ้นภายในได้ โลหะที่ใช้คือ Wood's metal แล้วทำการทดลองเหมือนกับที่ Frommer ทดลองทั้งรูปร่างและการวางตำแหน่งของทางเข้า ซึ่งผลการทดลองที่ได้สนับสนุนทฤษฎีของ Frommer และสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน พร้อมทั้งสิ่งที่ได้พบเพิ่มเติมคือ เมื่อน้ำโลหะเต็มจนมีปริมาณมากพอทำให้แรงดันที่ผิวไม่ทันก็จะไหลตามผิวแม่พิมพ์ลงมาที่ด้านล่างของช่องว่าง อย่างไรก็ตามแรงเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของแก้วกับโลหะไม่เท่ากัน ทำให้พฤติกรรมที่เห็นอาจไม่ถูกต้องนัก และโลหะที่ใช้คือ Wood's metal ซึ่งมีจุดหลอมละลายต่ำกว่าอัลลอยด์ที่ใช้ในการฉีดจริงมาก โดยมีรูปแบบการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.8



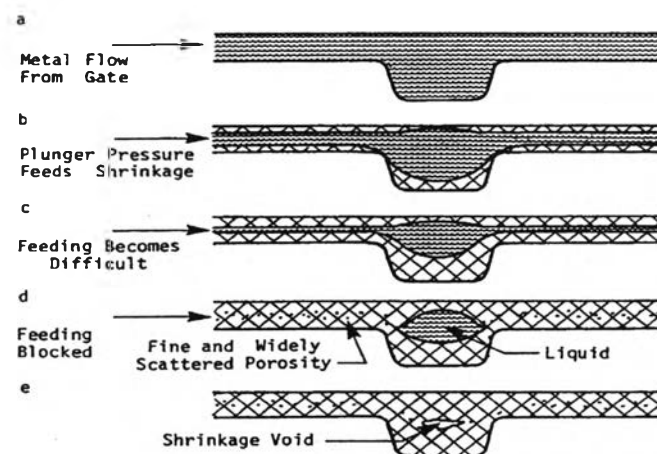
รูปที่ 2.8 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Koester และ Goehring (H.H. Doehler, 1951:132)

2.7.3 วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

2.7.3.1 แนวคิดการแข็งตัวของน้ำอะลูมิเนียมในแม่พิมพ์ (Designing Die Casting Die, 1992: 25-27)

ชิ้นงานจะก่อตัวขึ้นภายในโพรงแบบโดยการดึงความร้อนจากน้ำโลหะเหลวออกสู่อแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการแข็งตัว ถ้าอัตราการกระจายความร้อน (heat transfer) รวดเร็วจะทำให้เกิด ชิลด์มาร์ค (chill mark) หรือ โคลด์ชัท ชิ้นที่ขึ้นงาน ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราการกระจายความร้อนเป็นไปอย่างช้าๆ เวลาที่ใช้ในรอบการทำงานจะนานซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิต ปัญหาด้านการปลดชิ้นงาน และ เกิดการแตกร้อน (hot cracking) บนชิ้นงาน แต่ถ้าการกระจายความร้อนช้าโดยรอบเวลาสั้น ชิ้นงานจะแตกขณะถูกปลดออก โดยหมุดแทง (ejector pin) จะแทงทะลุชิ้นงาน บิสกิต และทางวิ่ง และอาจจะส่งผลให้การฉีดชิ้นงานไม่ต่อเนื่อง

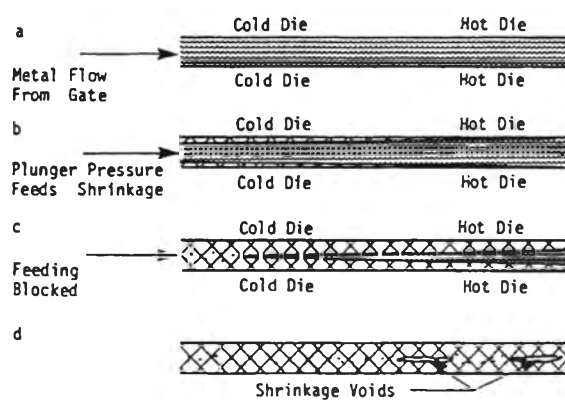
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับบริเวณข้างเคียงเป็นสิ่งสำคัญ โดยน้ำโลหะที่ทำการหล่อจะเกิดการหดตัวเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง จุดที่ร้อนกว่าจะเป็นของเหลวนานกว่าส่วนที่เย็นของโพรงแบบ น้ำโลหะเหลวในบริเวณที่ร้อนเมื่อแข็งตัวทีหลังจะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในส่วนที่ร้อน (shrinkage void) ดังนั้นจะทำการอัดน้ำโลหะเหลวจากบิสกิตเพื่อทดแทนส่วนที่หดตัว แต่บางครั้งส่วนที่แข็งตัวก่อนหน้านี้อาจจะไปสกัดกั้นความดันที่จะอัดเข้าไปนี้ได้ ตัวอย่างทั่วไปของผลที่เกิดจากการแข็งตัวของแบบไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนไม่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 2.9 ถึง 2.11 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.9 รูปแสดงลำดับการแข็งตัวของชิ้นงานที่มีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ

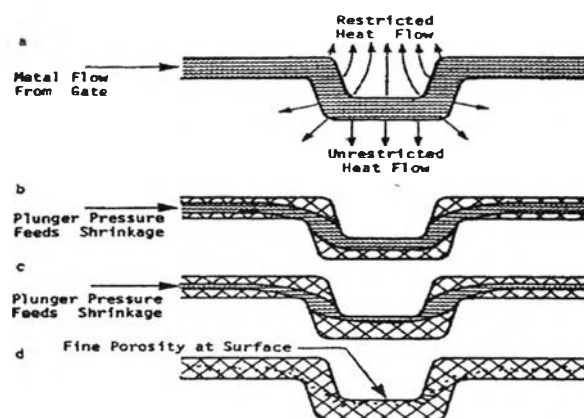
(Designing Die Casting Die, 1992: 25)

ในรูปที่ 2.9 แสดงภาคตัดที่ไม่สม่ำเสมอ และบรรจุน้ำโลหะเหลวภายใน โดยภาคตัดที่มีความหนากว่าจะมีปริมาณความร้อนมากกว่าส่วนที่บางกว่า ปริมาณที่มากกว่านี้จะต้องใช้เวลาในการถ่ายเทความร้อนที่นานกว่าจึงจะแข็งตัว ทำให้ส่วนที่บางกว่าซึ่งแข็งตัวก่อนหน้าไป สกัดกั้นน้ำโลหะเหลวที่จะดันเข้าไปภายหลังเพื่อทดแทนส่วนที่หดตัว ในส่วนที่หนากว่านี้ทำหน้าที่ เหมือนกับเป็นรูล้นที่คอยป้อนน้ำโลหะเข้าไปทดแทนส่วนที่หดตัวในบริเวณที่ใกล้เคียง ในสถานการณ์ดังกล่าวนี้แม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบไว้จะต้องนำความร้อนออกจากส่วนที่หนากว่าด้วยอัตราที่เร็วกว่าส่วนที่บาง ผลที่เกิดกับรูปที่ 2.9 จะมีความคล้ายกับผลที่เกิดเนื่องจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 2.10 กล่าวคือชิ้นงานที่มีหน้าตัดเท่ากันแต่มีลำดับการแข็งตัวไม่สม่ำเสมอเนื่องจากมีส่วนหนึ่งของแม่พิมพ์ที่เย็นกว่าอีกส่วนหนึ่ง จึงทำชิ้นงานที่อยู่ในส่วนที่เย็นกว่าของแม่พิมพ์แข็งตัวก่อน และจะไปสกัดกั้นน้ำโลหะเหลวที่จะถูกป้อนเข้าไปในภายหลัง



รูปที่ 2.10 รูปแสดงลำดับการแข็งตัวของชิ้นงานที่มีหน้าตัดเท่ากันแต่อยู่บนแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน (Designing Die Casting Die, 1992: 25)

บางครั้งการกระจายของรูพรุน (porosity) เล็กๆ จะเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานแทนที่จะเป็นบริเวณตรงกลางซึ่งบางครั้งรูปร่างของชิ้นงานก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรูพรุนบนผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงถึงสถานะของรูปร่างชิ้นงานที่มีส่วนยื่นออกมา ทำให้สามารถแบ่งพื้นที่ได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเกิดขีดจำกัดของการกระจายความร้อน (restricted heat flow) ส่วนด้านตรงข้ามจะมีอิสระในการกระจายความร้อนทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างต่อเนื่อง น้ำโลหะเหลวจะเริ่มแข็งตัวจากด้านนี้ก่อนแล้วไล่ขึ้นไปหาด้านที่มีขีดจำกัดของการกระจายความร้อนซึ่งจะแข็งตัวช้าที่สุดจึงก่อให้เกิดรูพรุนกระจายอยู่ตามผิวของด้านที่มีขีดจำกัดของการกระจายความร้อน โดยผลของรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ชิ้นงานรับแรงได้น้อยลงกว่าปกติ



รูปที่ 2.11 รูปแสดงลำดับการแข็งตัวของรูปร่างชิ้นงานที่เกิดขีดจำกัดของการกระจายความร้อน ทำให้เกิดรูพรุนที่ผิวหน้า (Designing Die Casting Die, 1992: 26)

ดังนั้นรูปแบบการแข็งตัวในอุดมคติที่เกิดบนแม่พิมพ์ควรจะต้องมีทิศทาง โดยเริ่มจาก รูล้น ก่อน หลังจากนั้นจึงเริ่มแข็งเข้าไปในชิ้นงาน แล้วจึงเข้าไปในทางวิ่ง ซึ่งจะส่งผลทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่นที่สูง แต่วิธีการนี้ก็เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่มีผนังหนา

2.7.4 สมการเชิงอนุพันธ์ (ปราโมทย์, 2537: 321-325)

ก่อนที่จะกล่าวถึงสมการเชิงอนุพันธ์ของการไหลจะต้องทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมทางกายภาพของน้ำโลหะที่ไหลสู่แม่พิมพ์ว่ามีลักษณะอย่างไร

การไหลในขบวนการหล่อมีลักษณะการไหลแบบหนืดแต่ไม่อัดตัวหรือการไหลแบบสโตรกส์ (Stokes flow) ซึ่งแรงของความเฉื่อย (initial force) นั้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงของความหนืด (viscous force) นั่นคือค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งแสดงอัตราส่วนระหว่างแรงสองชนิดนี้นั้นมีค่าต่ำ ส่วนการไหลแบบหนืดจะเป็นแบบนิวโทเนียน (Newtonian) ได้นั้นก็ต่อเมื่อกฎเกณฑ์การเสียดทานของสโตกส์ (Stokes's law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดในของเหลวนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้

การวิเคราะห์การไหลและการถ่ายเทความร้อนจะใช้ระเบียบวิธีการทางการคำนวณ (computational) ซึ่งจำเป็นที่จะต้องหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับการไหลและการเทพลังงานความร้อนของอลูมิเนียมเหลวในแม่พิมพ์ ในการคำนวณหาลักษณะของการไหลและการถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยทั่วไปจำเป็นต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับ

- 1) การอนุรักษ์มวล (conservation of mass)
- 2) การอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum)
- 3) การอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy)

ซึ่งประกอบด้วยสมการทั้งหมด 5 สมการ ในปัญหาโดยทั่วไปแบบสามมิติ เพื่อให้
ง่ายแก่การทำความเข้าใจและสามารถเขียนสมการต่างๆเหล่านี้ให้สั้นลง แต่ในขณะเดียวกันก็จะไม่ทำ
ให้ความใจนั้นลดลงจึงศึกษาสมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้ในสองมิติ

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

โดย ρ แทนความหนาแน่นมวล (mass density) t แทนเวลา u และ v แทนความเร็วของของเหลวใน
แกน x และ y ตามลำดับ

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho B_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (2.3ก)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho B_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \quad (2.3ข)$$

โดย B_x และ B_y แทนแรงเนื่องจากน้ำหนักของของเหลวต่อมวลหนึ่งหน่วยในทิศแกน x และ y ตาม
ลำดับ P แทนความดัน (pressure) ส่วนค่าความเค้นต่างๆที่ปรากฏในสมการ สามารถเขียนให้อยู่ใน
รูปของค่าความหนืดและความเร็วตามกฎการเสียดทานของสโตรกส์ได้ดังนี้

$$\sigma_x = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (2.4ก)$$

$$\sigma_y = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (2.4ข)$$

$$\tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.4ค)$$

โดยที่

$$\mathbf{v} = u \hat{i} + v \hat{j} \quad (2.5)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} \quad (2.6)$$

และ μ แทนค่าความหนืด (viscosity)

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์พลังงาน

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} \right) + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathcal{E} - Q = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \Phi \quad (2.7)$$

โดย e แทนพลังงานภายในต่อมวลหนึ่งหน่วย k แทนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน T แทนอุณหภูมิ และ Φ แทนฟังก์ชันการกระจายความหนืด (viscosity dissipation function) ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปแบบความเร็วดังนี้

$$\Phi = 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (2.8)$$

สำหรับการไหลในสองมิติ สมการเชิงอนุพันธ์ทั้งหมดนั้นประกอบด้วย 4 สมการดังแสดงในสมการ (2.2) (2.3ก-ข) และ (2.7) แต่มีตัวไม่รู้ค่าถึง 7 ตัว ซึ่งก็คือ ρ , u , v , P , T , e และ μ ดังนั้นจึงต้องการอีก 3 สมการที่สามารถเขียนในรูปแบบต่างๆ ไปได้คือ

$$\text{สมการของสถานะ} \quad \rho = \rho(P, T) \quad (2.9)$$

$$\text{สมการของพลังงานภายใน} \quad e = e(P, T) \quad (2.10)$$

$$\text{สมการของความหนืด} \quad \mu = \mu(P, T) \quad (2.11)$$

ซึ่งในปัญหาทั่วไป ทั้งสามสมการหลังนี้จะทราบลักษณะความสัมพันธ์ต่างๆ ดังนั้นจะมีสมการที่จำเป็นต้องแก้ทั้งหมด 4 สมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาตัวไม่รู้ค่าซึ่งก็คือความเร็ว u และ v ในทิศแกน x และ y , ความดัน P , และอุณหภูมิ T สำหรับการไหลของของเหลวในสองมิติ

สำหรับการทำการคำนวณที่ปรกติกระทำกันในปัจจุบัน สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงานสำหรับการไหลแบบสองมิติทั้ง 4 สมการนี้มักเขียนให้อยู่ในรูปแบบอนุรักษ์ (conservation form) ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \{U\} + \frac{\partial}{\partial x} \{E_x - E_v\} + \frac{\partial}{\partial y} \{F_x - F_v\} = 0 \quad (2.12)$$

โดย $\{U\}$ เป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวแปรอนุรักษ์ (conservation variables) ที่ไม่รู้ค่าดังนี้

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho \varepsilon \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

$\{E_x\}$ และ $\{F_x\}$ เป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยปริมาณฟลักซ์แบบไม่หนืด (inviscid flux) ในทิศแกน x และ y ตามลำดับ

$$\{E_x\} = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho uv \\ \rho u \varepsilon + Pu \end{Bmatrix} \quad \{F_x\} = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + P \\ \rho v \varepsilon + Pv \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

$\{E_v\}$ และ $\{F_v\}$ เป็นปริมาณฟลักซ์แบบหนืด (viscous flux) ในทิศแกน x และ y ตามลำดับ

$$\{E_v\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ u\sigma_x + v\tau_{xy} - q_x \end{Bmatrix} \quad \{F_v\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \\ u\tau_{xy} + v\sigma_y - q_y \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

โดย ε แทนพลังงานรวม (total energy) ซึ่งก็คือ

$$\varepsilon = e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \quad (2.16)$$

และสำหรับแก๊สสมบูรณ์แบบ (perfect gas) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ρ และความดัน P คือ

$$P = (\gamma - 1)\rho\left(\varepsilon - \frac{1}{2}(u^2 + v^2)\right) \quad (2.17)$$

โดย γ แทนอัตราส่วนความร้อนจำเพาะ และในสมการ (2.15) ปริมาณความร้อนในทิศแกน x และ y สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของอุณหภูมิโดยใช้กฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) กล่าวคือ

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{และ} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.18)$$

สำหรับปัญหาการจำลองการฉีดแบบโดแคสติงได้มีการวิจัยกันก่อนหน้านี้ในรูปแบบของสองมิติและรูปร่างของชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดูได้จากหนังสืออ้างอิง (J. Hu, E. A. Eckert, and R. j. Goldstein, 1992: 68)

2.7.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method)

เนื่องจากทั้งการวิเคราะห์การไหลและอุณหภูมิ จำเป็นที่จะต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ยุ่งยากซับซ้อน การที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับปัญหาในลักษณะเช่นนี้ไม่สามารถที่จะหาได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งมีพื้นฐานที่สำคัญดังนี้

2.7.5.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คืออะไร (ปราโมทย์, 2537: 4-5)

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของปัญหาดังกล่าวจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรต่างๆกันตามตำแหน่งต่างๆบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่

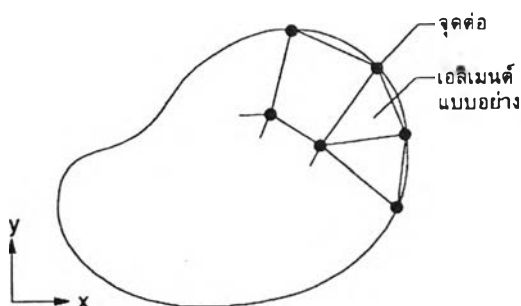
จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆจำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติ จะทำไม่ได้ หลักการคือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (elements)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น มาได้ ประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในระบบสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการแก้สมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

2.7.5.2 ขั้นตอนทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ปราโมทย์,2537: 17-20)

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการที่จะหาผลลัพธ์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ (ปราโมทย์,2537: 18)

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation function) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.13 เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ โดยที่จุดต่อนั้นเป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้

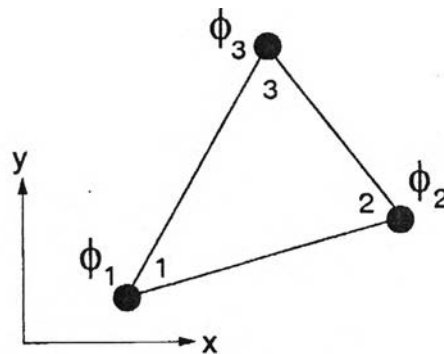
$$\phi(x,y) = N_1(x,y) \phi_1 + N_2(x,y) \phi_2 + N_3(x,y) \phi_3 \quad (2.12)$$

โดย $N_i(x,y)$, $i = 1, 2, 3$ คือฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์

สมการ (2.12) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi(x,y) &= \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} N \\ (1 \times 3) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \\ (3 \times 1) \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

โดย $[N]$ คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น



รูปที่ 2.13 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วยสามจุดต่อ โดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ(ปราโมทย์,2537: 18)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equations) ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.13)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.14)$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (2.13) สามารถทำได้โดย

- ก. วิธีโดยตรง (direct approach)
- ข. วิธีการแปรผัน (variational approach)
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกัน (system of simultaneous equations) ในรูปแบบดังนี้

$$\Sigma(\text{Element Equations}) \implies [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.15)$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ลงในสมการ (2.15) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (nodal unknowns)

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้