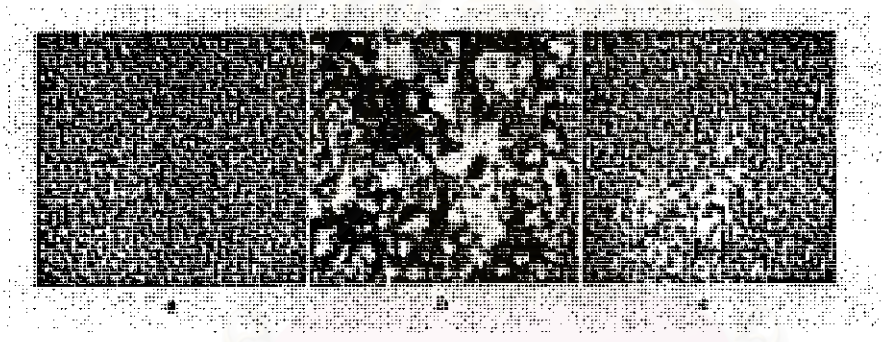
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานและแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและความสำคัญของกระบวนการฉีดอะลูมิเนียมแบบไดแคสติง

ในกระบวนการฉีดอะลูมิเนียมแบบไดแคสติงนั้น เป็นการผลิตที่ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงเนื่องจากผลที่ได้จากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้ขนาดเกรนมีขนาดเล็ก โดยเฉลี่ยขนาดของเกรนที่ได้จากการฉีดอะลูมิเนียมแบบไดแคสติงนั้นจะอยู่ประมาณ 0.01 มิลลิเมตร เล็กกว่าแบบหล่อถาวร (ประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร) และหล่อแบบทราย (ประมาณ 1.0 มิลลิเมตรขึ้นไป) ดังแสดงในรูปที่2.1 ดังนั้นการฉีดอะลูมิเนียมแบบไดแคสติงนั้นจะให้ความแข็งแรงมากกว่า และยังไม่ต้องการการปรุงเพื่อลดขนาดเกรน (grain refining) ซึ่งต้องใช้ในการหล่อแบบอื่นๆ (Alan Kaye และ Arther Street, 1983: 10)



รูปที่2.1 รูปแสดงขนาดเกรนของอะลูมิเนียมที่ผ่านกรรมวิธีการหล่อต่างๆ a.ไดแคสติง b.แบบหล่อทราย c.แบบหล่อถาวร โดยใช้อะลูมิเนียมเกรดเดียวกัน (H.H.Dochler,1951:217)

เมื่อเปรียบเทียบกับการหล่อแบบอื่นๆกระบวนการฉีดอะลูมิเนียมแบบไดแคสติงมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบดังนี้ (American Foundrymen's Society [AFS], 1993:147)

ข้อได้เปรียบของกระบวนการฉีดอะลูมิเนียมแบบไดแคสติง

1. ขนาดและมิติมีความแม่นยำมากโดยเฉพาะรูหรือโพรง
2. ผิวชิ้นงานมีคุณภาพดีมาก
3. หล่อชิ้นงานบางๆได้(ประมาณ 0.635 มิลลิเมตร) ซึ่งการหล่อโดยทั่วไปทำได้ต่ำที่สุดประมาณ 1.27 มิลลิเมตร
4. การสูญเสียอะลูมิเนียมมีน้อยมาก เพราะทางเข้า ทางวิ่งและเศษต่างๆ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยมีความสูญเสียน้อยมาก

5. คุณสมบัติทางกลต่างๆมีสูง โดยเฉพาะความต้านทานการล้ามากกว่าการหล่อแบบอื่นมากจึงเหมาะกับงานโครงสร้างต่างๆ

6. สามารถหล่อรูปร่างซับซ้อนทั้งภายนอกและภายในได้ดี แม้ภายในจะจำกัด

ข้อเสียเปรียบของกระบวนการฉีดอะลูมิเนียมแบบไดแคสติง

1. อากาศและก๊าซมักจะหนีออกไม่ทันทำให้มีรูพรุนอยู่ภายในชิ้นงาน (สามารถใช้ทางหนีอากาศ (vent) ช่วยแก้ไขได้)

2. เครื่องมือเครื่องใช้ราคาแพง

3. แกนต้องใช้แกนตรงเนื่องจากต้องดึงเข้าดึงออก

4. เวลาปรับตั้งครั้งแรกใช้เวลานาน

2.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย

อะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย เป็นอัลลอยที่ใช้มากที่สุดในงานฉีดอะลูมิเนียมเนื่องจากมีคุณสมบัติ ในการหล่อดีเยี่ยมใกล้เคียงกับ ความสามารถที่ต้องการในการหล่อแบบฉีดมากที่สุดดังนี้

1. มีการไหล(Fluidity) ที่ดี

2. มีการหดตัว(Shrinkage) น้อย

3. การแตกขณะร้อน(Hot Shortness) น้อย

4. ไม่ติดกับผิวของแม่พิมพ์ง่าย

อัลลอยที่นิยมแสดงดังตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงอัลลอยที่นิยมใช้ในงานฉีดอะลูมิเนียมและส่วนผสม

อัลลอย	ส่วนผสม					
	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	อื่นๆ
380	8.50	3.50	<0.10	<1.30	<3.00	
383	10.00	2.50	0.10	1.30	3.00	0.15 Sn
384	11.00	2.00	<0.30	<1.30	<3.00	0.35 Sn
390	17.00	4.50	0.55	<1.30	<0.100	<0.10 Mg
413	12.00	<0.10	<0.10	<0.20	-	

ซึ่งอัลลอยที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับที่กล่าวมาแล้วได้แก่ อัลลอย 380 ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งเทียบได้กับมาตรฐานอื่นๆดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงอัลลอย 380 และส่วนผสมเทียบกับมาตรฐานอื่นๆ(Alan Kaye และ Arther Street,1983:29)

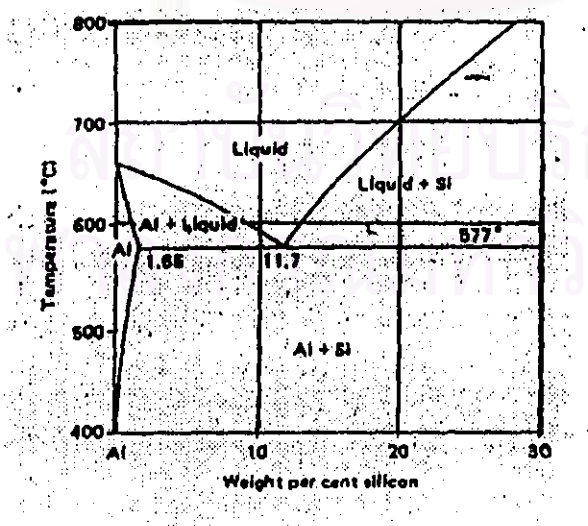
ประเทศ	มาตรฐาน	ชื่อ	Cu	Si	Fe	Zn	Mn
International	ISO DIS 3522	AlSi8Cu3Fe	2.5-4.0	7.5-9.5	1.3	1.2	0.6
Belgium	NBN436	DG AlSi8Cu3Fe	2.5-4.5	7.0-9.5	1.3	1.0	0.6
Canada	HA3	SC 84N	3.0-4.0	7.5-9.5	0.6	0.1	0.1
		SC 84R	3.0-4.0	7.5-9.5	1.2	1.2	0.5
Denmark	DS3002	4254	2.0-4.0	7.5-10.0	1.1	3.0	0.5
Finland	SFS568	G-AlSi9Cu3Fe	2.0-4.0	7.5-10.0	1.25	1.2	0.5
France	NF A57-703	A-S9U3A-Y4	2.5-4.0	7.5-10.0	1.3	1.2	0.5
W.Germany	DIN1725/2	G-AlSi8Cu3(226)	2.0-3.5	7.5-9.5	0.8	1.2	0.5
		GD-AlSi8.5Cu3(226D)	2.0-3.5	7.5-9.5	1.3	1.2	0.5
Italy	UNI3601	G-AlSi8.5Cu	3.0-4.0	7.5-7.9	0.8	0.05	0.5
	UNI5075	GDAlSi8.5Cu3.5Fe	3.0-4.0	8.0-9.5	1.1	1.0	0.5
Japan	JIS H5302	ADC10	2.0-4.0	7.5-9.5	1.3	1.0	0.5
		ADC12	1.5-3.5	10.5-12.0	1.3	1.0	0.5
Natherlands	NEN6022	AlSi8Cu3	2.5-4.5	7.0-9.5	0.7	1.0	0.6
Norway	NS17530	AlSi9Cu3	2.0-4.0	7.5-10.0	1.0	1.3	0.5

ตารางที่ 2.2(ต่อ)

ประเทศ	มาตรฐาน	ชื่อ	Cu	Si	Fe	Zn	Mn
Spain	UNE38-203-76	L2630	2.5-4.0	7.5-10.0	1.0	3.0	0.5
Sweden	SIS144252	4252	2.0-4.0	7.5-10.0	1.1	1.2	0.5
Switzerland	VSM10895	G-AlSi8Cu3	2.0-3.5	7.5-9.5	1.3	1.2	0.5
UK	BS1490	LM24	3.0-4.0	7.5-9.5	1.3	3.0	0.5
USA	ASTM B179-80	A380	3.0-4.0	7.5-9.5	2.0	3.0	0.5

ซึ่งอัลลอย ADC12 นี้มีปริมาณการใช้ในประเทศญี่ปุ่นสำหรับงานฉีดอะลูมิเนียมมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณซิลิกอนอยู่ที่ยูเทคติค (ประมาณ12%) ทำให้มีความสามารถในการเย็นตัวได้อย่างทันทีทันใดและมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ประมาณ 100 องศาเซลเซียส ทำให้อายุของแม่พิมพ์นานขึ้น มีคุณสมบัติความสามารถในการไหลที่ดี ช่วงการแข็งตัวแคบทำให้เกิดการฉีกขาดเมื่อร้อน(Hot Tear) ได้ยาก และการเกิดรูพรุนขึ้นภายในจะมีโอกาสเกิดได้น้อยกว่าอัลลอยที่มีช่วงการแข็งตัวกว้าง

จากแผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยดังรูปที่2.2แสดงให้เห็นว่าที่จุดยูเทคติกซิลิกอนสามารถละลายได้ 11.7% แต่สามารถเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 11.7-12.7% ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว ในการใช้อะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยโดยใช้ส่วนผสมซิลิกอนที่ยูเทคติกนั้น อัตราการเย็นตัวมีผลต่อความแข็งแรงมาก ถ้าอัตราการเย็นตัวช้าจะทำให้ซิลิกอนแยกตัวออกมาอยู่ในรูปเกล็ดหยาบ (Coarse flake) ขึ้นในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม โดยเกิดขึ้นขณะฉีดน้ำอะลูมิเนียมเข้าแม่พิมพ์ จะทำให้อัลลอยนั้นมีความแข็งแรงและความเหนียวต่ำ ถ้าซิลิกอนที่แยกออกมานี้มีขนาดใหญ่จะให้การกลึงบริเวณนั้นยากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.2 รูปแสดงแผนภาพสมดุลของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน อัลลอย

(Alan Kayeและ Arther Street,1983:24)

2.3 ลักษณะโครงสร้างของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย

ในสภาพการเย็นตัวตามปกติในแบบหล่อทราย โดยไม่ได้ทำการปรุง (Modification) แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ลักษณะคือ

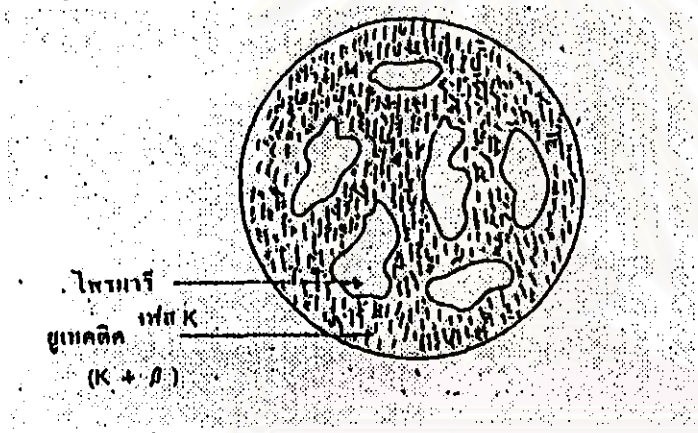
ก. โลหะผสมประเภทไฮโปยูเทคติก (ซิลิกอนต่ำกว่า 11.6%) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ

ก.1 โลหะผสมที่มีซิลิกอนต่ำกว่า 1.65% โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K หรือ α เพียงเฟสเดียว เป็นลักษณะของโลหะผสมที่อยู่ในกลุ่มขึ้นรูปเย็น (Wrought)

ก.2โลหะผสมที่มีซิลิกอนสูงกว่า 1.65% แต่ไม่เกิน 11.6% โครงสร้างจะประกอบด้วยเฟส K โดยมีโครงสร้างยูเทคติก (K+β) อยู่รอบบริเวณขอบเกรน

ข. โลหะผสมยูเทคติก (11.6%ซิลิกอน)

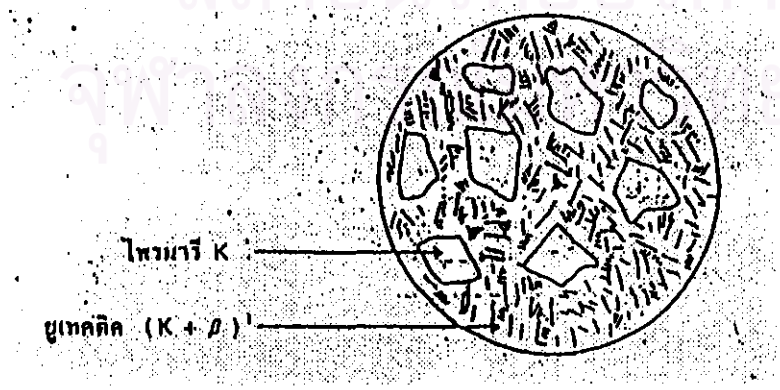
โครงสร้างประกอบด้วย ผลึกขนาดเล็กของเฟส K กับเฟส β ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปแท่งหรือรูปเข็ม แทรกสลับกันอยู่ในเฟส K ดังรูปที่2.3



รูปที่ 2.3 รูปแสดงโครงสร้างยูเทคติก

ค. โลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (มากกว่า 11.6%ซิลิกอน)

โครงสร้างประกอบด้วยเฟส βเป็นลักษณะรูปหลายเหลี่ยม กระจัดกระจายโดยมีโครงสร้างยูเทคติก(K+β) ล้อมรอบดังรูปที่ 2.4

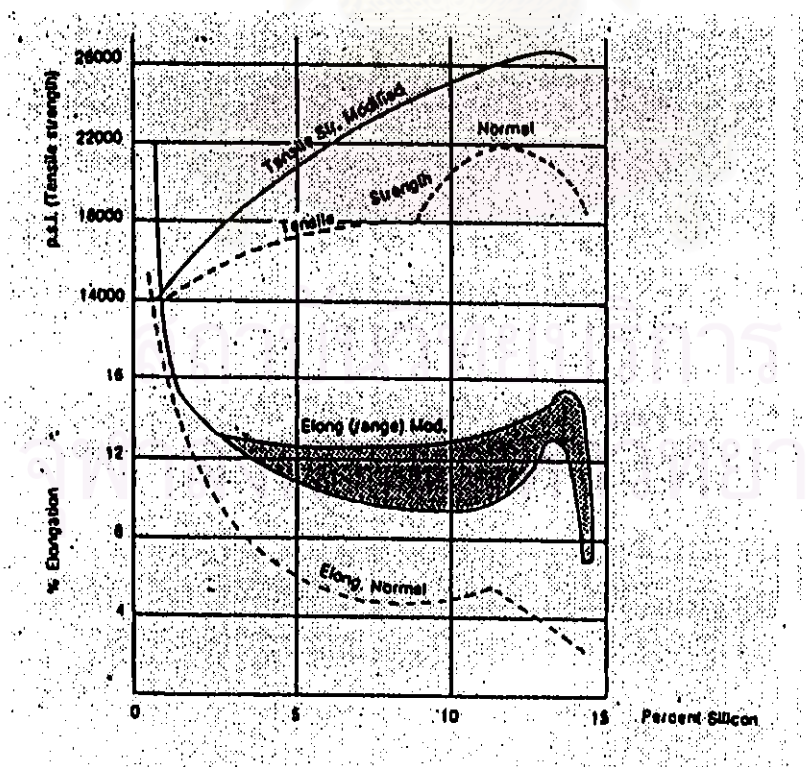


รูปที่2.4 รูปแสดงโครงสร้างของไฮเปอร์ยูเทคติก

โครงสร้างภายหลังการทำการปรุง(Modification) จะปรากฏจุดยูเทคติกต่ำลง และเคลื่อนไปอยู่ที่ 14%ซิลิกอน โครงสร้างของโลหะผสมประเภทไฮโปยูเทคติก ไม่ค่อยจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เพียงแต่ลักษณะของเกรนจะเล็กละเอียดเพราะเกิดปฏิกิริยายูเทคติก ที่ให้เฟส K และ β พร้อมกันเกิดที่อุณหภูมิต่ำลง (564 °c) และมีเฟส K ชนิดไพรมารี่มีปริมาณน้อยลง

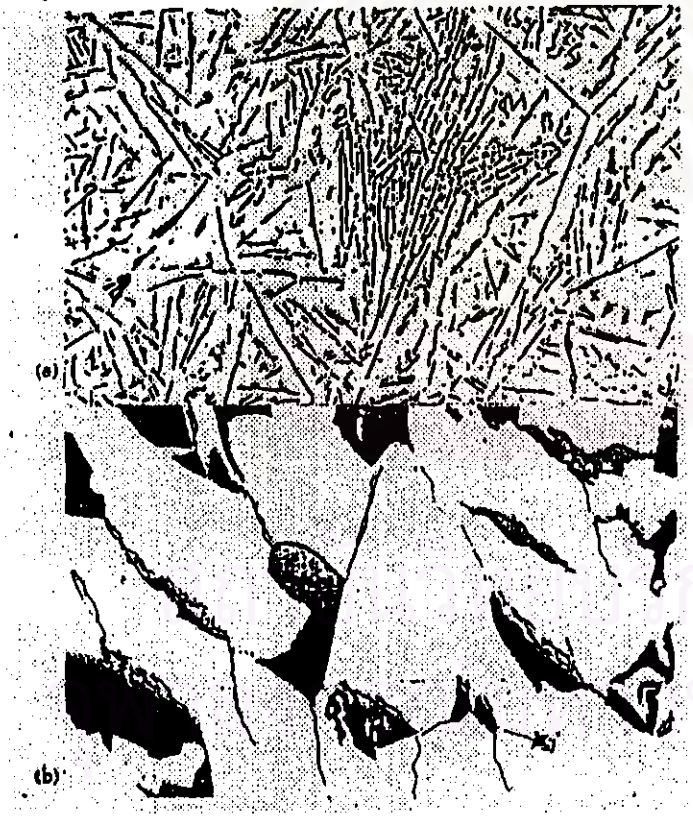
โครงสร้างของโลหะผสมยูเทคติก (11.6%ซิลิกอน) เมื่อจุดยูเทคติกเปลี่ยนไปอยู่ที่ 14%ซิลิกอน ภายหลังการทำการปรุง จึงให้โครงสร้างใหม่มีลักษณะเป็นโลหะผสมไฮโปยูเทคติกคือ มีเฟส K ขนาดเล็กเกิดขึ้น และมีโครงสร้างยูเทคติกที่ประกอบด้วยเฟส K และเฟส β ขนาดเล็กเกิดขึ้นล้อมรอบเฟส K ที่เป็นไพรมารี่ มีผลทำให้โลหะผสมภายหลังการทำการปรุงมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น

โครงสร้างของโลหะผสมไฮเปอร์ยูเทคติก (มากกว่า 11.6%ซิลิกอน) ในที่นี้ถ้าพิจารณาโลหะผสมที่14%ซิลิกอน ภายหลังเมื่อทำการปรุงจะทำให้โลหะผสมนี้กลายเป็นโลหะผสมยูเทคติก ซึ่งจะได้โครงสร้างภายหลังเย็นตัวเป็นลักษณะโครงสร้างยูเทคติก (K+β) ที่มีขนาดเล็กละเอียดเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมที่ให้ผลสูงมาก ทั้งความแข็งแรงและความเหนียวดังรูปที่ 2.5 แสดงผลเปรียบเทียบระหว่างความแข็งแรงทางดึง (tensile strength) กับ เปอร์เซนต์การยืดตัว (%elongation) ของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยที่เปอร์เซนต์ของซิลิกอนต่างๆกัน ระหว่างการเย็นตัวปกติในแบบทรายกับสภาพการเย็นตัวโดยผ่านการปรุงด้วยโลหะโซเดียม



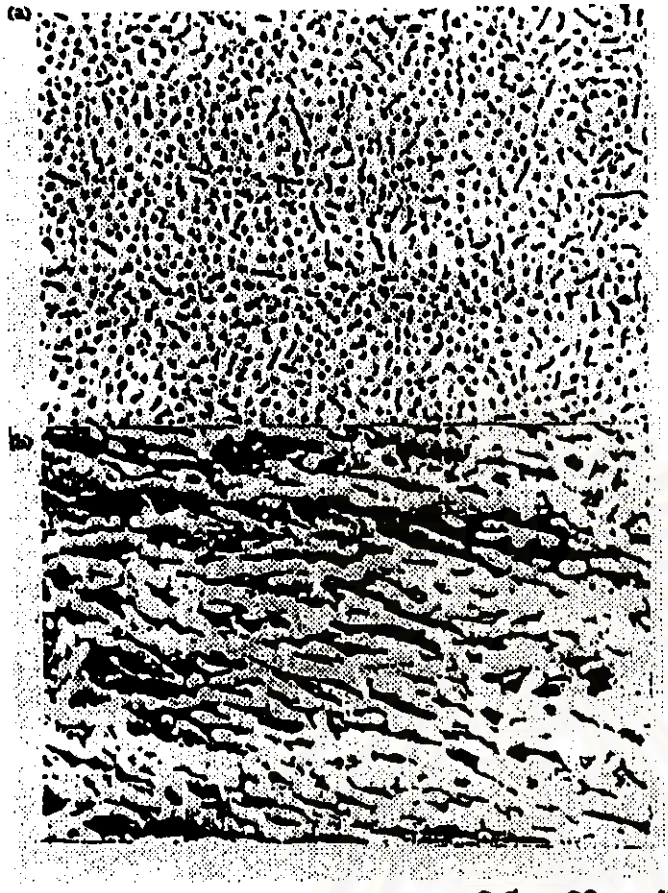
รูปที่2.5 รูปแสดงคุณสมบัติต่างๆของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างแบบไม่ปรุงและแบบที่ปรุงด้วยโลหะโซเดียม

ในการแบบหล่อถาวรและการหล่อแบบทราย การปรุงอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย นั้นต้องการส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้เกรนมีขนาดเล็กลงและเปลี่ยนซิลิกอนที่เป็นเกล็ดหยาบ (Coarse flake) ให้อยู่ในรูปเส้น(Fibrous)หรือรูปแท่ง(Rod) ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยใช้โซเดียมประมาณ 0.05% จากการศึกษาและรวบรวมโดย C.B. Kim และ R.W. Heine(1963:367) จากมหาวิทยาลัยวิสคอนซิน พบว่า อัตราการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย จะมีผลใกล้เคียงกับการเติมโซเดียม โดยซิลิกอนนั้นจะก่อตัวอยู่ในรูปแท่ง อีกทั้งM.G. Day และ A. Hellawell (1967:377) ได้ศึกษา ระดับจุลภาคและการเกิดผลึกของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน อัลลอย ที่ยูเทคติกในเรื่อง ส่วนผสม ระยะการแข็งตัวและอุณหภูมิ ทำการเปรียบเทียบการเย็นตัวอย่างช้าๆและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะทำให้ซิลิกอนก่อตัวและเติบโตขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง ทำให้เกิดอยู่ในรูปแท่ง (Rod form) ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่ารูปเกล็ดหยาบ และเป็นการยืนยันว่า การเย็นตัวอย่างรวดเร็วให้ผลเหมือนกับการปรุงด้วยโซเดียมในการหล่อแบบทราย ดังรูปที่ 2.6a, 2.6b แสดงถึงอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยที่ยังไม่ได้ปรุงเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยที่ปรุงแล้วในรูปที่ 2.7a, 2.7b



รูป 2.6a รูปแสดงระดับจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยยังไม่ได้ปรุงที่ซิลิกอน 12.7%โดยเย็นตัวอย่างช้าๆ(x120) รูปที่2.6b รูปแสดงเกล็ดซิลิกอนในอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย (ชิ้นงานผ่านการกัดกรดลึกและถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอน(x1000))

(Alan Kaye และ Arther Street,1983:25)



รูป 2.7a รูปแสดงระดับจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอยปรุงแล้วที่ซิลิกอน 12.7%(x120)รูปที่2.7b รูปแสดงซิลิกอนรูปแท่งในอะลูมิเนียม-ซิลิกอนอัลลอย (ชิ้นงานผ่านการกัดกรดลึกและถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอน(x500)) (Alan Kaye และ Arther Street,1983:26)

ในส่วนผสมของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน อัลลอยกลุ่ม ADC12 ยังมีส่วนผสมของเหล็กอยู่ประมาณ 1.3% ด้วย จากการศึกษาของ B.A. Gillett และ K.G. Latimer (1970:955) พบว่า ถ้ามีเหล็กผสมอยู่ประมาณ 1.3% จะช่วยให้การหลอมติดของน้ำอะลูมิเนียมกับหน้าแม่พิมพ์น้อยลง ถึงแม้จะมีการพ่นน้ำหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์อยู่แล้วก็ไม่เพียงพอ เนื่องจากบริเวณตรงข้ามทางเข้าจะได้รับผลกระทบจากการหมุนวนของน้ำอะลูมิเนียมทำให้บริเวณนี้มีความร้อนสูงเกิดการหลอมติดได้ง่าย ถ้าในน้ำอะลูมิเนียมมีเหล็กผสมอยู่ 1.3% จะช่วยลดการหลอมติดจากสาเหตุนี้ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ควรมีเหล็กผสมอยู่มากกว่านี้ เพราะจะเกิด α-AlFeSi ขึ้นทำให้เกิดเป็นจุดแข็ง (hard spot) และมีความแข็งแรงทางดึงลดลงด้วย อีกทั้งจากการรายงานของ C.A. Queener และ W.L. Mitchell(1965:70) ได้ทำการทดลองกลึง เจาะ อัลลอยด์380 ตามมาตรฐานอเมริกัน โดยใช้ชิ้นงาน 1 1/2 กิโลกรัม จำนวน 105 ชิ้น ในการทำงาน 38 วินาที พบว่า ถ้าลดปริมาณเหล็กในส่วนผสมลงจาก 1.4% เป็น 0.7% จะช่วยให้อายุของเครื่องมือตัดยาวนานขึ้น

2.4 ทฤษฎีการไล่ก๊าซไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมเหลว

ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดรูพรุนในอะลูมิเนียมหล่อเป็นข้อบกพร่องที่สำคัญที่ทำให้คุณภาพของงานลดลง ในงานสำคัญๆที่ต้องการความแข็งแรงสูงหรือต้องไม่มีการรั่วซึม คุณภาพของงานหล่อจะต้องมีคุณสมบัติสม่ำเสมอ ดังนั้นเทคนิคการไล่ก๊าซไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก

2.4.1 การเกิดก๊าซไฮโดรเจน

ในการหลอมอะลูมิเนียมนั้น ก๊าซไฮโดรเจนจะเข้าไปละลายในอะลูมิเนียมเหลวและยากที่จะป้องกันเนื่องจากไฮโดรเจนมีที่มาได้หลายทาง

1. ความชื้นในบรรยากาศ
2. ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ของก๊าซหรือเชื้อเพลิงขณะทำการหลอม
3. วัสดุบรรจุเตา (Charge Material) ที่เปียกชื้น
4. ออกไซด์ที่ผิวของอะลูมิเนียม และผลเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น จากการผุกร่อนอันเนื่องจากน้ำ (Hydrated Corrosion Product)

$$Al(OH)_3 + Al \longrightarrow Al_2O_3 + 3H$$

5. ความชื้นจากอิฐทนไฟภายในเตา ความสกปรกของเครื่องมือหล่อ
6. ความชื้นจากฟลักซ์
7. น้ำและน้ำมันที่เปื้อนอุปกรณ์และวัสดุบรรจุเตา

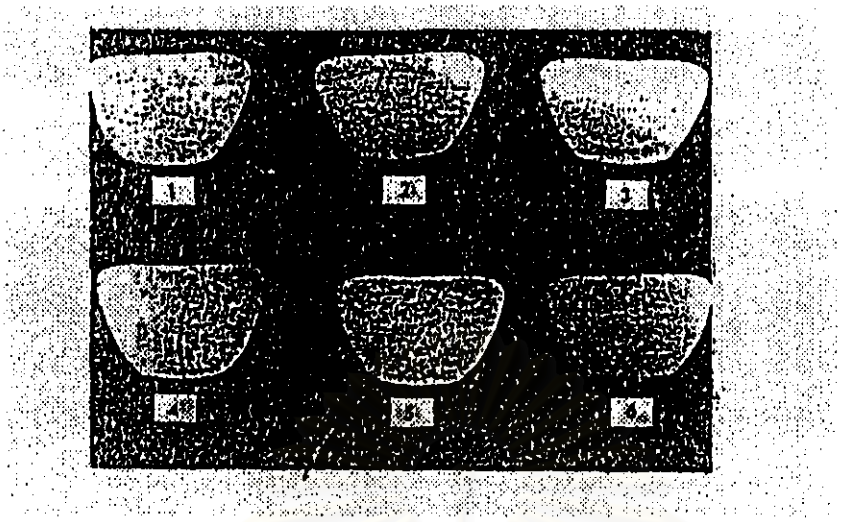
ซึ่งไฮโดรเจนเกิดขึ้นได้ดังสมการ

$$3H_2O + 2Al \longrightarrow 6H + Al_2O_3$$

เห็นได้ว่าก๊าซไฮโดรเจนในสมการนั้นอยู่ในสภาพของอะตอมไม่ใช่โมเลกุล ซึ่งการไล่ก๊าซไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมเหลวจะใช้หลักการนี้ต่อไป

2.4.2 ผลของก๊าซไฮโดรเจน

ก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในอะลูมิเนียมเหลว แต่ไม่สามารถออกทันก่อนที่อะลูมิเนียมจะแข็งตัว จะเป็นตัวการทำให้เกิดรูพรุนในเนื้ออะลูมิเนียม ซึ่งรูพรุนนี้มีขนาดเล็กมากและกระจายอยู่ทั่วในอะลูมิเนียม หรือบริเวณที่แข็งตัวหลังสุด รูพรุนที่มีขนาดเล็กมากๆจะไม่เป็นอันตราย แต่รูพรุนที่มีขนาดใหญ่อาจเห็นเป็นรูหรือรอยร้าวจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางกลลดลง ดังรูปที่ 2.8



Sample No.	Hydrogen concentration by telegas (ml/100 gm Al)	Density (gm/cm^3)
1	0.23	2.486
2	0.16	2.550
3	0.13	2.584
4	0.10	2.609
5	0.09	2.619
6	0.07	2.636

รูปที่ 2.8 รูปแสดงภาคตัดแสดงการแข็งตัวของอะลูมิเนียมที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ (M.H.Mulazimogiv, N.Handiak และ J.E. Gruzleski,1989:228)

2.4.3 <u>การละลายของก๊าซไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมเหลว</u>

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไวต่อการละลายของก๊าซมากและก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซเพียงชนิดเดียวที่มีความสามารถละลายได้ในอะลูมิเนียมเหลวได้ดีที่สุด เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมระหว่างอะลูมิเนียมกับก๊าซไฮโดรเจนมีค่ามากกว่าอะลูมิเนียมกับก๊าซออกซิเจนและก๊าซออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์

การละลายของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมเหลวสามารถละลายได้ในอุณหภูมิต่างๆดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงความสามารถในการละลายของไฮโดรเจน

(John E. Gruzleski และ Bernard M. Closset,1990:146)

อัลลอยด์	ความสามารถในการละลายของก๊าซไฮโดรเจน
Al-2%Cu	$\log_{10}S = -2950/T + 2.90$
Al-4%Cu	$\log_{10}S = -3050/T + 2.94$
Al-8%Cu	$\log_{10}S = -3150/T + 2.94$
Al-16%Cu	$\log_{10}S = -3150/T + 2.83$
Al-32%Cu	$\log_{10}S = -2950/T + 2.57$
Al-2%Si	$\log_{10}S = -2800/T + 2.79$
Al-4%Si	$\log_{10}S = -2950/T + 2.91$
Al-8%Si	$\log_{10}S = -3050/T + 2.95$
Al-16%Si	$\log_{10}S = -3150/T + 3.00$

โดย S คือ ค่าความสามารถในการละลายของไฮโดรเจน (Hydrogen Solubility)

หน่วยเป็น มิลลิลิตรต่อ 100 กรัมอะลูมิเนียม

T คือ อุณหภูมิ หน่วยเป็นองศาเคลวิน

ค่าความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนคือ ปริมาณไฮโดรเจนส่วนที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ต่อ 100 กรัมอะลูมิเนียม

2.4.4 <u>การป้องกันและลดก๊าซไฮโดรเจน</u>

2.4.4.1 <u>การป้องกันก๊าซไฮโดรเจน</u>

2.4.4.1.1 <u>การป้องกันก๊าซไฮโดรเจนจากวัสดุบรรจุเตาและเครื่องมือ</u>

นำพวกอะลูมิเนียมที่จะทำการหลอม เช่น แท่งอะลูมิเนียม รูถ้น รูเท ทำการเผา (Preheat) ก่อนเข้าเตา เพื่อให้น้ำและน้ำมันออกไป และทำการเผาเตาและเผาเครื่องมือทุกอย่างก่อนใช้

2.4.4.1.2 <u>การป้องกันก๊าซไฮโดรเจนจากบรรยากาศ</u>

เมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวแล้ว ใช้ฟลักซ์คลุมผิวหน้าอะลูมิเนียมเหลวไว้ไม่ให้เกิดการละลายของก๊าซไฮโดรเจน ฟลักซ์จำพวกนี้ได้แก่ เกลืออัลคาไลน์ (NaCl, KCl)ที่แห้งสนิท

2.4.4.2 <u>การลดก๊าซแบบธรรมชาติ</u>

ระดับของก๊าซจะลดลงหากการหลอมนั้นเป็นการหลอมแบบอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturate) การลดก๊าซแบบธรรมชาตินี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆโดยปกติจะใช้เวลา 2-3 ชั่วโมงในการลดก๊าซด้วยวิธีนี้ ซึ่งช้ามากในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงไม่มีใครใช้ การลดก๊าซแบบธรรมชาติจะไม่สามารถเกิดได้ทุกกรณี สภาพที่เกิดการหลอมแบบอิ่มตัวยิ่งยวดนั้นจะเกิดในกรณีพิเศษเท่านั้น คือ ถ้าอุณหภูมิในการหลอมถูกทำให้ต่ำลงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการอิ่มตัวอย่างยิ่งยวด หรือก๊าซไฮโดรเจนถูกเพิ่มเข้าไปในปริมาณมาก เช่น การใช้ฟลักซ์เปียก การลดก๊าซแบบธรรมชาติจะทำได้ดีในอุณหภูมิต่ำ มีบรรยากาศที่แห้งในการหลอมและใช้เวลาหลายๆชั่วโมง

2.4.4.3 <u>การลดก๊าซไฮโดรเจนโดยอาศัยก๊าซเฉื่อยพาออกมา</u>

หลักการดึงเอาก๊าซไฮโดรเจนออกมา คือสภาวะการละลายของไฮโดรเจนในอะลูมิเนียมจะเป็นอะตอมไม่ใช่โมเลกุล G.K. Sigworth(1987:73) ได้ศึกษาไว้ว่าก๊าซไฮโดรเจนจะถูกลดเป็นลำดับขั้นดังนี้

-ก๊าซไฮโดรเจนที่อยู่ในอะลูมิเนียมเหลวในสภาพของอะตอมจะรวมตัวกับฟองของก๊าซเฉื่อยโดยการพา (Convection) และการแพร่ (Diffusion)

- ก๊าซไฮโดรเจนที่แพร่เข้าไปนั้นจะประกอบเป็นชั้นบางๆเรียกว่าBoundary Layer อยู่รอบฟองก๊าซเฉื่อย (Bubble)

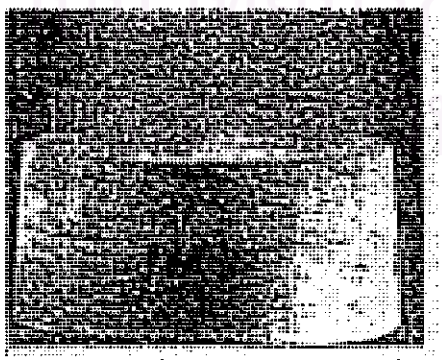
- ก๊าซไฮโดรเจนจะแพร่เข้าไปภายในฟองของก๊าซเฉื่อย

- เมื่อรวมกันแล้วก็จะลอยตัวออกจากผิวอะลูมิเนียมเหลว หรือตามรูของผนังเตา

การนำเอาก๊าซเฉื่อยเป็นตัวพาก๊าซไฮโดรเจนออกจากอะลูมิเนียมเหลวนั้นมี 2 วิธีคือ

ก. การปล่อยก๊าซเฉื่อยผ่านแท่งเซรามิกที่มีรูพรุน (Porous Plug)

ซึ่งรูพรุนเหล่านี้จะช่วยให้ก๊าซเฉื่อยแตกออกเป็นฟองเล็กๆแต่ฟองที่เกิดขึ้นจะมีแนวโน้มที่จะลอยสู่ผิวของอะลูมิเนียมเหลวมากกว่าที่จะกระจายทั่วเตา ดังรูปที่2.9 จึงเกิดการปรับปรุงพัฒนาขึ้นอีกวิธีหนึ่ง



รูปที่ 2.9 รูปแสดงการปล่อยก๊าซเฉื่อยผ่านแท่งเซรามิกที่มีรูพรุน (Porous Plug)

(D.A. Granger,1986:471)

ข. การใช้เครื่องไล่ก๊าซไฮโดรเจนแบบใบพัดหมุนโดยใช้ก๊าซเฉื่อย

(Rotary Impeller Degassing Unit)

วิธีนี้จะใช้ใบพัดกราไฟต์ หมุนสับก๊าซทำให้ได้ก๊าซเฉื่อยที่มีขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลาง 3-6 มิลลิเมตร) โดยผ่านก๊าซเฉื่อยมาตามท่อแกนกลางของแท่งกราไฟต์ ซึ่งที่ปลายของแท่งกราไฟต์จะติดใบพัดกราไฟต์ ก๊าซเฉื่อยจะถูกใบพัดหมุนเฉือนเป็นฟองขนาดเล็กแล้วถูกส่งออกไปตามแรงเหวี่ยงของการหมุน และแรงหมุนของใบพัดยังช่วยให้ฟองก๊าซเฉื่อยเข้าไปทั่วถึงอะลูมิเนียมเหลวด้วย เป็นผลให้ก๊าซไฮโดรเจนมีโอกาสสัมผัสกับก๊าซเฉื่อยได้มากขึ้น ดูรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 รูปแสดงการกระจายของฟองก๊าซที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเฉื่อยผ่านใบพัดหมุน

(โฆษิต สุขก้องวารี, ตะวันฉาย โพธิ์หอมและทรงพล ลิมปิชัชวาลย์,2537:79)

2.4.4.4 การใช้ก้อนฟลักซ์ (Tablet Flux)

ก้อนฟลักซ์เป็นพวกเฮกซะคลอโรอีเธน (Hexachlorocthane , C_2Cl_6) ฟลักซ์เหล่านี้เป็นสารที่ชื้นได้ง่ายดังนั้นต้องเก็บไว้ในที่แห้ง ก้อนฟลักซ์นี้จะทำให้เกิดก๊าซคลอรีนซึ่งจะเป็นตัวพาเอาก๊าซไฮโดรเจนออกไป แต่ก๊าซคลอรีนเป็นก๊าซที่มีพิษ จึงเหมาะสำหรับการหล่อปริมาณไม่มากนัก

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการฉีดอะลูมิเนียมด้วยความดันในแม่พิมพ์โลหะ

องค์ประกอบที่สำคัญ 3 อันดับแรกในงานฉีดประกอบด้วย (H.H. Doehler,1951:3)

1. เครื่องจักร กลไก ที่ใช้ในการฉีด
2. การออกแบบชิ้นงานและการออกแบบแม่พิมพ์
3. อัลลอยที่เหมาะสม

ซึ่งต้องเป็นมาตรฐานเพื่อให้การทำงานถูกต้องหรือใกล้เคียงกันทุกครั้งเมื่อได้องค์ประกอบทั้ง 3 ข้อแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาต่อไปคือ สภาวะการฉีดนั่นเอง เนื่องจากเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของงานฉีดสูงทั้งควบคุมได้ยาก และไม่สามารถกำหนดได้แน่นอน

ในการปฏิบัติงานฉีดจริง ปัจจัยต่างๆที่ต้องควบคุมของเครื่องจักรจะถูกตั้งไว้แน่นอนแล้ว พร้อมทั้งปัจจัยที่สามารถเกิดได้จากแม่พิมพ์ก็ถูกควบคุมจากแม่พิมพ์ ที่ได้ออกแบบมาแล้ว ซึ่งทำให้ปัจจัยต่างๆอยู่ในช่วงแคบ หรือน่าจะทราบค่าที่แน่นอน แต่ในการปฏิบัติงานจริงๆ สภาวะการฉีดต่างๆแปรค่าไปได้จนกระทั่งเข้าจุดที่สมดุลที่สุด ที่การฉีดขณะนั้น

2.5.1 ทฤษฎีที่ใช้เพื่อพิจารณาการไหลของอะลูมิเนียมในแม่พิมพ์ฉีดมีดังนี้

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

Frommer ได้ทำการศึกษาสภาวะการฉีดในงานฉีดสังกะสี โดยทำแม่พิมพ์เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้พบสิ่งที่เกิดขึ้นดังนี้

น้ำโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์โดยผ่านทางเข้า (Gate) พุ่งเข้าไปโดยมีรูปร่างสัมพันธ์กับภาคตัดขวางของทางเข้า แล้วเข้าไปชนด้านตรงข้ามของแม่พิมพ์ เกิดการหมุนวนในตำแหน่งนั้นแล้วค่อยไหลถ้นไปตามผิวแม่พิมพ์แล้วเต็มแม่พิมพ์ในที่สุด โดยตรงกลางแม่พิมพ์จะเป็นจุดที่แข็งตัวเป็นอันดับสุดท้าย ซึ่งการพุ่งเข้าแม่พิมพ์จะขึ้นกับพลังงานการไหลหรือแรงดันที่ให้กับน้ำโลหะ และแรงเสียดทานที่ผิวแม่พิมพ์กับอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะนั่นเอง น้ำโลหะที่ไหลวนที่ผิวของแม่พิมพ์ก่อนที่จะไหลลงมาเรียกว่า "Forerunners" ซึ่งพฤติกรรมนี้ขึ้นกับความหนาของชิ้นงาน แรงเสียดทานและอัตราการเย็นตัวที่ผิวแม่พิมพ์ ซึ่งถ้ายิ่งมีขนาดเล็กก็จะมีผลอย่างมากต่อแรงเสียดทาน

และการเย็นตัว ความเร็วของ forerunners จะลดลงตามระยะทางที่ห่างจากจุดที่น้ำโลหะพุ่งปะทะ (Pool) ค่าความดันและค่าความเร็วในการฉีดสัมพันธ์กันดังสมการ

$V = \sqrt{2gP / D}$

V ความเร็วในการฉีด

g ความเร่งโน้มถ่วง

P ความดันในการฉีด

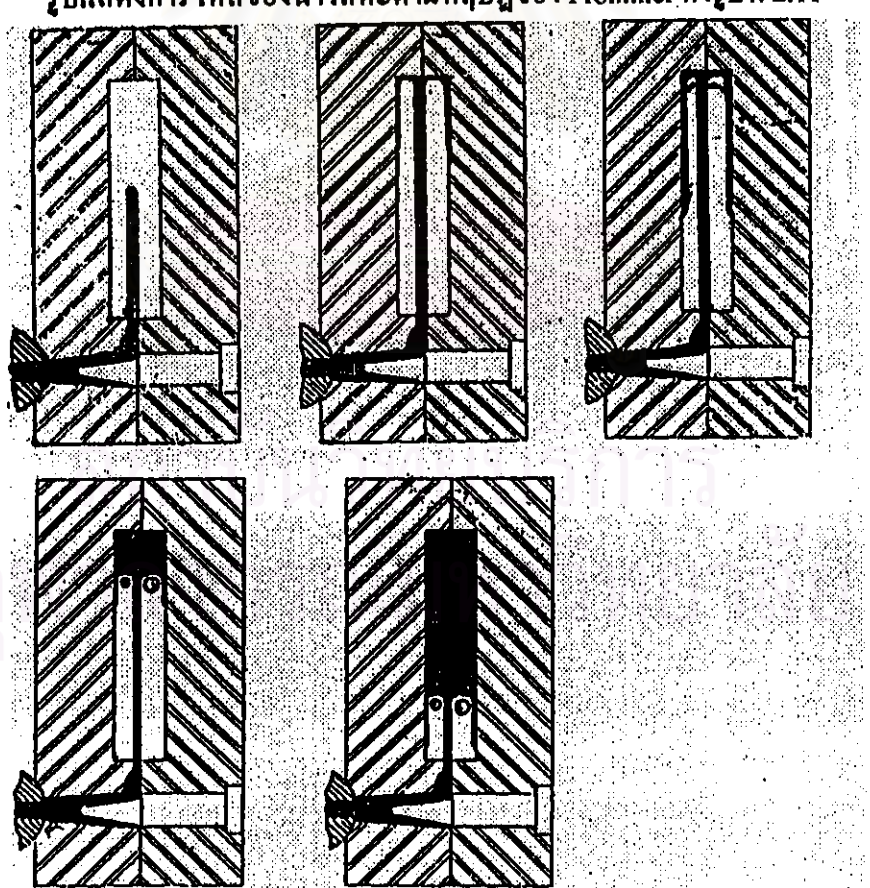
D ค่าความถ่วงจำเพาะของอัลลอย

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

จากผลการทดลองของ Frommer สรุปได้ว่า ทางเข้าที่มีขนาดใหญ่ดีกว่าทางเข้าที่มีขนาดเล็กดังนี้

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

รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Frommer ดังรูปที่ 2.11



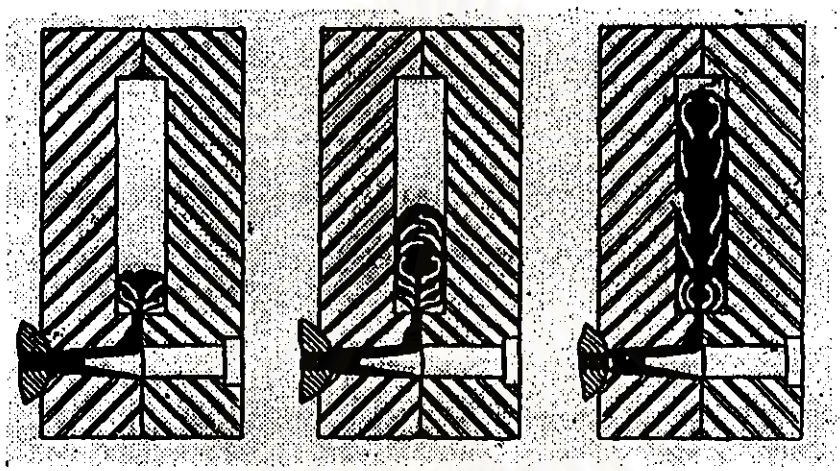
รูปที่ 2.11 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Frommer (H.H. Doehler,1951:127)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.1.2 <u>ทฤษฎีของ Brandt</u> (H.H. Doehler,1951:131)

Brandt ได้ทำการศึกษาบนแม่พิมพ์ที่มีลักษณะเหมือนกับของ Frommer แต่ลักษณะการเข้าไปของน้ำโลหะจะไม่พุ่งไปด้านตรงข้ามแต่จะเข้าไปเติมช่องว่างก่อนแล้วเพิ่มขึ้นเพื่อเติมช่องว่างให้เต็ม ซึ่งตรงข้ามกับทฤษฎีของ Frommer

รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Brandt แสดงในรูปที่ 2.12

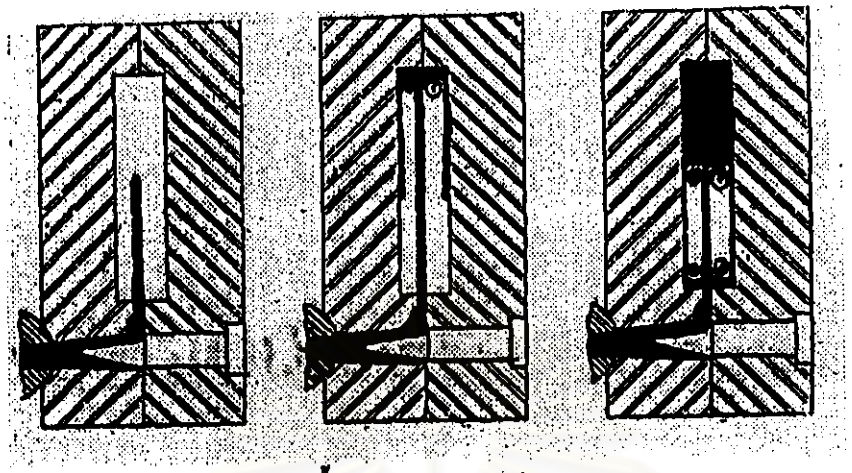


รูปที่ 2.12 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Brandt (H.H. Doehler,1951:131)

2.5.1.3 <u>ทฤษฎีของ Koester และ Goehring</u> (H.H. Doehler,1951:132)

ทฤษฎีนี้ได้สนับสนุนทฤษฎีของ Frommer ซึ่ง Koester และ Goehring แห่งสถาบันวิจัยโลหะ เมืองสตุดการ์ท ประเทศเยอรมัน ได้ทำการทดลองโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นแก้วทนความร้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าอยู่ในโครงโลหะ ทำให้สามารถเห็นการไหลที่เกิดขึ้นภายในได้ โลหะที่ใช้คือ Wood's metal แล้วทำการทดลองเหมือนกับที่ Frommer ทดลองทั้งรูปร่างและการวางตำแหน่งของทางเข้า ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นสนับสนุนทฤษฎีของ Frommer และสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน พร้อมทั้งสิ่งที่ได้พบเพิ่มเติมคือ เมื่อน้ำโลหะเติมจนมีปริมาณมากพอทำให้แข็งตัวที่ผิวไม่ทันก็จะไหลตามผิวแม่พิมพ์ลงมาที่ด้านล่างของช่องว่าง อย่างไรก็ตามแรงเสียดทานและการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของแก้วกับโลหะไม่เท่ากัน ทำให้พฤติกรรมที่เห็นอาจไม่ถูกต้องนัก และโลหะที่ใช้คือ Wood's metal ซึ่งมีจุดหลอมละลายต่ำกว่าอัลลอยที่ใช้ในการผิดจริงมาก

รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Koester และ Goehring แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแสดงการไหลของน้ำโลหะตามทฤษฎีของ Koester และ Goehring (H.H. Doehler,1951:132)

2.5.2 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานฉีดอะลูมิเนียมด้วยความดันในแม่พิมพ์โลหะ

การแข็งตัวอย่างรวดเร็วของน้ำโลหะในการกระบวนการฉีดด้วยความดันนี้ทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างที่ละเอียด มีความแข็งแรงสูง ซึ่งก็เป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดความเค้นที่แตกต่างกันมากระหว่างผิวและเนื้อกายในชิ้นงานมีผลทำให้เกิดการแตกจากการหดตัว (Shrinkage Crack) และข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในงานฉีดด้วยความดันมีดังนี้ (H.H. Doehler,1951:134-140)

1. รูที่เกิดจากหดตัว (Shrink Hole) เกิดจากการเติมน้ำโลหะเข้าไปไม่พอ เมื่อเกิดการเย็นตัวโลหะจะหดตัวทำให้เนื้อโลหะส่วนที่แข็งตัวที่หลังหายไป สังเกตได้ว่า รูนี้จะขรุขระและไม่มีรูปร่างที่แน่นอน

2. รูที่เกิดจากก๊าซ (Gas Hole) เกิดจากการที่ก๊าซไม่สามารถหนีออกได้ทันก่อนที่น้ำโลหะแข็งตัว สังเกตได้ รูนี้จะมีลักษณะมน กลม และเรียบ

3. อัตราส่วนผสมไม่เท่ากันทำให้เนื้อไม่เข้ากัน (Segregation) เกิดจากส่วนผสมที่ไม่เท่ากันในแต่ละชั้นทำให้ส่วนที่มีอัลลอยมากแข็งตัวช้า ส่วนที่มีอัลลอยน้อยแข็งตัวเร็วกว่า ทำให้ชิ้นงานที่ได้เหมือนมี 2 ผิว จะเกิดมากถ้าอุณหภูมิและอัตราการฉีดน้ำโลหะต่ำมาก

4. รอยแตกจากการหดตัว (Shrink Crack) เกิดจากความเค้นกายในระหว่างการแข็งตัวมีค่าสูงกว่าความเหนียวและความแข็งแรงของน้ำโลหะที่แข็งตัวจากสถานะของเหลว

5. รูพรุน (Porosity) โครงสร้างที่เป็นรูพรุนมักเกิดจากน้ำโลหะสกปรกมีออกไซด์เข้าไปในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีความทนต่อแรงกระแทกและความล้าลดลง

6. โคลด์ชัต (Cold Shut) เนื้อโลหะไม่ประสานกันขนาดใหญ่ มีขนาด 1-2 มิลลิเมตร เกิดจากน้ำโลหะที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์แยกตัวออกจากกันเมื่อมารวมกันไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียว

เนื่องจากสูญเสียความร้อน ความดันและความเร็วลดน้อยลงทำให้เกิดเป็นออกไซด์ฟิล์มขึ้น ทำให้เนื้อไม่ประสานกัน

7. โฟลว์ไลน์ (Flow Line) เนื้อโลหะไม่ประสานกันขนาดเล็ก มีขนาด 10-100 ไมโครเมตร มองเห็นเป็นเส้น มีสาเหตุเดียวกับโคลด์ชัตแต่มีขนาดเล็กกว่า เกิดที่ผิวเนื่องจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์น้อยเกินไป

8. จุดแข็ง (Hard Spot) เกิดจากส่วนผสมที่เป็นอัลลอยไม่ผสมกับอะลูมิเนียมเหลว ทำให้เกิดเป็นจุดแข็งขึ้น ซึ่งนำไปกลึงได้ยาก

2.5.3 ปัจจัยของการฉีดที่ต้องพิจารณา(H.H. Doehler,1951:140-144)

1. อัตราการแพร่ความร้อนและความร้อนจำเพาะของอัลลอย

พิจารณาเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการกำหนดอัตราการฉีด และรอบเวลาการทำงานเช่น อะลูมิเนียมมีอัตราการแพร่ความร้อน 16.9 Btu/cu in ส่วนสังกะสี 10.6 Btu/cu in ทำให้สามารถฉีดสังกะสีได้เร็วกว่าอะลูมิเนียม 1.6 เท่า

2. การนำความร้อนของอัลลอย

โดยพิจารณาที่ค่าปัจจัยการนำความร้อน(Conductivity Factor) เช่น อัลลอย A9 มีค่าปัจจัยการนำความร้อน 0.37 ส่วนอัลลอย XXIII มี 0.27 นั่นคือ A9 สามารถฉีดได้เร็วกว่า XXIII 1.37 เท่า

3. อุณหภูมิการแข็งตัวของอัลลอย

เพื่อนำไปกำหนดอุณหภูมิการฉีดและรอบเวลาการทำงานเพื่อไม่ให้น้ำโลหะแข็งตัวก่อนและไม่ให้ต้องเสียเวลาคอยการแข็งตัวนานเกินไป

4. อุณหภูมิแม่พิมพ์

ในอะลูมิเนียมอัลลอย อุณหภูมิแม่พิมพ์ควรอยู่ในช่วง 218-315 องศาเซลเซียส ซึ่งคุณสมบัติทางกลต่างๆเช่น ความแข็งแรงทางดึง โครงสร้างจุลภาค ล้วนได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิแม่พิมพ์ทั้งสิ้น ซึ่งอุณหภูมิของแม่พิมพ์ควรรักษาให้มีค่าที่คงที่จะดีที่สุด

5. การนำความร้อนของแม่พิมพ์

การนำความร้อนของแม่พิมพ์นั้นขึ้นกับขนาดของชิ้นงานและการออกแบบแม่พิมพ์ทั้ง 2ส่วน ในสภาวะการทำงาน สิ่งที่มีผลคือ การหล่อลื่นที่ผิวหน้าแม่พิมพ์ ซึ่งจะสร้างเป็นชั้นบางๆอยู่บนผิวแม่พิมพ์

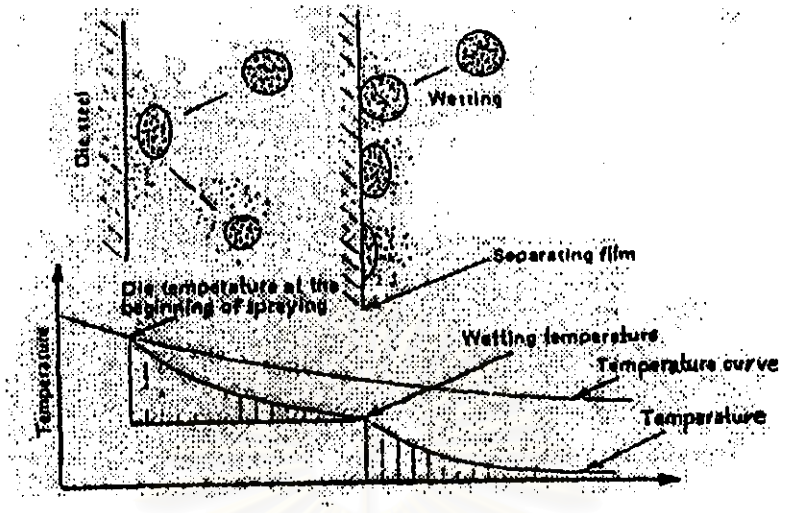
6. การออกแบบชิ้นงาน

การออกแบบชิ้นงานมีส่วนอย่างมากที่จะมีผลให้การฉีดทำได้ง่ายหรือยาก เช่น การให้ความต่อเนื่องในส่วนที่มีความหนามากกับความหนาน้อย การใช้โครงกระดูก (Bone หรือ Rib) เป็นตัวช่วยในการไหลของน้ำโลหะ

ในข้อที่4 นั้น Harod J. Smith และ ASM Committe (1972:305) ได้กล่าวไว้ว่า อุณหภูมิในแต่ละส่วนความหนาต้องมีความสมดุลย์กัน ซึ่งกระบวนการฉีดนั้นเป็นกระบวนการต่อเนื่อง อุณหภูมิแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิน้ำอะลูมิเนียม น้ำหนักของน้ำอะลูมิเนียมในการฉีดแต่ละครั้ง ความเร็วรอบ พื้นที่ผิว รูปร่างของชิ้นงาน และการหล่อเย็นของแม่พิมพ์ อุณหภูมิที่เหมาะสมนั้น เมื่อทำการฉีดจนได้แล้ว ให้พยายามรักษาไว้ให้อยู่ภายในช่วง±10 °F(±6 °C) ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป งานที่ได้จะไม่เต็มแบบ หรือเกิดข้อบกพร่องขึ้นเช่น รูพรุน โฟลว์ไลน์ หรือ โคลด์ชัต เนื่องจากในโอเวอร์โฟลว์(Over flow)นั้นน้ำอะลูมิเนียมไหลเข้าไม่ถึง ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป จะมีความร้อนสะสมทำให้อายุของแม่พิมพ์ต่ำลง และจะมีอะลูมิเนียมเข้าไปหลอมติดกับแม่พิมพ์ ทำให้เกิดรอยครูดที่ชิ้นงานขณะดันชิ้นงานออก

ในข้อที่5 นั้นการหล่อลื่นที่ผิวหน้าแม่พิมพ์มีความสำคัญมาก A.B. Schmidt (1981:622-632) ได้รายงานว่า น้ำหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์เมื่อปกคลุมที่ผิวหน้าแม่พิมพ์จะทำหน้าที่ช่วยการไหลของน้ำโลหะและช่วยทำให้น้ำโลหะไม่หลอมติดกับแม่พิมพ์ ทำให้แกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่ (moving die) เช่น สไลด์(silde) แกน(core) และเข็มกระทุ้ง(ejector pin) ต้องหล่อลื่นเพื่อป้องกันการติดของน้ำโลหะและการเสียดสี เมื่อพ่นน้ำหล่อลื่นไปยังหน้าแม่พิมพ์ที่ร้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพและเคมี ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบในน้ำหล่อลื่น ซึ่งความดันไอจะเปลี่ยนเมื่อน้ำหล่อลื่นกลายเป็นไอ น้ำหล่อลื่นประกอบด้วยสารละลายที่จะระเหยด้วยความดันไอที่สูง เพื่อที่จะกลายเป็นไอได้ทันทีเมื่ออยู่บนผิวของแม่พิมพ์ที่ร้อน ระดับของการเย็นของแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของของเหลวตัวกลางซึ่งคุณสมบัตินี้เอง น้ำมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นน้ำหล่อลื่นจะใช้แบบที่มีน้ำเป็นส่วนผสมหลักจะดีที่สุด ในรูปที่2.14 แสดงเส้นของอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในการฉีดน้ำหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์ โดยน้ำหล่อลื่นเป็นแบบที่มีน้ำเป็นส่วนผสมหลัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 รูปแสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในการฉีดน้ำหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์ โดยน้ำหล่อลื่นเป็นแบบที่มีน้ำเป็นส่วนผสมหลัก (Alan Kaye และ Auther Street (1983:221))

2.5.4 <u>การหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์</u> (Alan Kaye และ Athur Street,1983:163)

2.5.4.1 <u>กฎของการหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์</u>

การหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์มีหลักในการทำงานดังนี้

1. ปริมาณที่ใช้ต้องพอเหมาะ ถ้าใช้มากเกินไปจะเป็นการเพิ่มข้อบกพร่องให้แก่ชิ้นงาน เช่น โฟลว์ไลน์ โคลด์ชัต ที่ผิวชิ้นงาน หรือ รูพรุนภายในชิ้นงานเนื่องจากน้ำหรือน้ำมันที่เป็นส่วนประกอบของน้ำหล่อลื่น เมื่อสัมผัสกับน้ำอะลูมิเนียมจะระเหยกลายเป็นก๊าซทำให้คงค้างอยู่ในชิ้นงาน หากเหนือออกไม่ทันจะเกิดเป็นรูพรุนขึ้น ทำให้ชิ้นงานขาดความแข็งแรง

2. อย่าใช้น้ำมัน ตัวทำละลาย หรือของเหลว ที่มีจุดวาบไฟต่ำ

3. ห้ามใช้ตัวทำละลาย เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆที่สามารถระเหยเป็นพิษได้

4. ห้ามใช้น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์

5. ห้ามใช้สารละลายเกลืออิออน เช่น เกลือโบรไมด์ และคลอไรด์ เพราะจะทำลายผิวหน้าแม่พิมพ์ ทำให้แม่พิมพ์ผุกร่อนเร็ว

6. ก่อนใช้สารหล่อลื่นใดๆควรตรวจสอบก่อนว่า ทำลายโลหะ(แม่พิมพ์ เป็นพิษ และเป็นอันตรายหรือไม่

2.5.4.2คุณสมบัติของน้ำหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์ที่ควรจะเป็น

น้ำหล่อลื่นหน้าแม่พิมพ์ ควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ใช้ได้ทั้งกับวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ และส่วนประกอบอื่นๆ โดยไม่ก่อความเสียหาย เช่น การผุกร่อน หรือสึกหรอ

2. สร้างฟิล์มบางๆบนผิวของแม่พิมพ์ที่ติดแน่น เพื่อป้องกันการหลอมติดของน้ำอะลูมิเนียม

3. กระจายตัวได้กว้างและสม่ำเสมอบนผิวแม่พิมพ์

4. ไม่ทำให้คุณภาพผิวชิ้นงานด้อยลง เช่น เกิดโฟลว์ไลน์ เป็นรอยด่างดำ เป็นต้น

5. ไม่ทำลายผิวหน้าแม่พิมพ์ ในน้ำหล่อลื่นบางชนิดที่เป็นน้ำมันจะประกอบด้วยกรดไขมัน เมื่ออุณหภูมิสูงมากๆกรดไขมันเหล่านี้จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปกรดฟอร์มิกหรือ กรดอะซิติก ซึ่งทำลายผิวหน้าแม่พิมพ์ได้

6. ไม่ระเหยง่ายและไม่เกิดเป็นก๊าซพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน

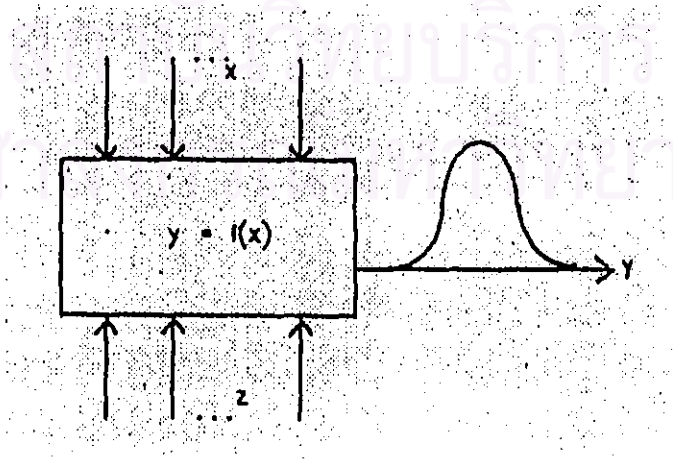
7. ไม่ข้นแข็ง หรือจับตัวที่มุม หรือผิวหน้าแม่พิมพ์

8. ราคาต้องสมเหตุสมผล เพราะราคาจะเป็นตัวพิจารณาที่สำคัญในการประกอบธุรกิจ

2.6 การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง

2.6.1 การออกแบบการทดลอง (Experiment Design)

การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อการศึกษาปัจจัยที่มีอยู่ในกระบวนการผลิตว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อสิ่งที่เราสนใจหรือให้ความสำคัญ ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้นจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่ง x หมายถึงปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และ z หมายถึงปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้



รูปที่ 2.15 แสดงปัจจัย และพารามิเตอร์ของกระบวนการ

ปัจจัย (Factor) ที่เกิดในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1) ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (controllable factor)

2) ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (uncontrollable factor)

2.6.2 วัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง

2.6.2.1 เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อสิ่งที่เราสนใจ

2.6.2.2เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้สิ่งที่เราสนใจ ใกล้เคียงค่าที่ต้องการมากที่สุด

2.6.2.3 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ความแตกต่างของสิ่งที่เราสนใจเล็กที่สุด

2.6.2.4 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีค่าน้อยที่สุด

2.6.3 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

2.6.3.1 การตั้งปัญหา การกำหนดปัญหาว่าจะศึกษาอะไรในกระบวนการทดลอง ซึ่งการกำหนดนี้จะขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.6.3.2 เลือกตัวแปรตาม (Response Variable) จะต้องเลือกตัวแปรตามที่แน่ใจว่าจะให้ข่าวสารข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา

2.6.3.3 การเลือกปัจจัยที่มีผล และระดับของปัจจัยซึ่งระดับของปัจจัยที่ใช้แบ่งได้เป็น

1) แบบกำหนด (fixed levels) หมายถึงระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้หรือกำหนดค่าได้แน่นอน

2) แบบสุ่ม (random levels) หมายถึงระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

3) แบบผสม (mixed levels) หมายถึง การผสมระหว่างปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดค่าได้และกำหนดไม่ได้

2.6.3.4 การเลือกแบบการทดลอง ต้องเลือกแบบการทดลองที่ให้ข้อมูลที่ถูกต้อง

2.6.3.5 ทำการทดลอง โดยทำตามที่กำหนดไว้

2.6.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล จะให้ความรู้ทางด้านสถิติมาวิเคราะห์และสรุปผล

2.6.3.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ซึ่งอาจแสดงในรูปกราฟ, ตารางหรือแผนภูมิ

2.6.4 หลักในการเก็บข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือกระบวนการจะมีค่าไม่คงที่ซึ่งมีผลมาจาก กระบวนการผลิต การวัด การสุ่มตัวอย่าง ดังนั้นจึงต้องมีการเฉลี่ย ซึ่งการเฉลี่ยในที่นี้หมายถึง การเฉลี่ยออกผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เพราะข้อมูลที่ออกมาควรจะอยู่ ในรูปของค่าที่ถูกต้องซึ่งข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์จะต้องไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้นหรือน้อยที่สุด และการที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่ถูกต้องนั้นจะต้องทำ 3 อย่างคือ

1. จะต้องเก็บข้อมูลอย่างสุ่ม (randomization)
2. มีการทำซ้ำ (replication) เป็นการทำเพื่อกำจัดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออก
3. การทำ blocking เป็นการทำเพื่อลดการกระจายของข้อมูลแต่ไม่จำเป็นต้องทำเสมอไป

2.6.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

เป็นการวิเคราะห์ว่าออกแบบการทดลองมีความเหมาะสมเพียงไรนั่นคือในการทดลองจะเกิด e_{ij} ทุกครั้ง การทดลองที่ดีจึงต้องมี e_{ij} น้อยที่สุด

วิธีการตรวจสอบว่าการทดลองมีความเหมาะสมเพียงไรคือ

2.6.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบจะตรวจสอบว่า e_{ij} มีการกระจายแบบปกติหรือไม่โดยมีวิธีการตรวจสอบดังนี้

1. การตรวจสอบว่า e_{ij} มีการกระจายแบบปกติหรือไม่โดยใช้

1.1 NOPP (normal paper)

1.2 Kolgomorov - Smirnov test

1.3 χ^2 - goodness of fit test

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย

3. การตรวจสอบความสม่ำเสมอของการแปรปรวน (variance stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายซึ่งถ้ารูปไม่เป็น megaphone ถือว่าข้อมูลถูกต้อง

2.6.5.2 R^2 TEST

$$R^2 = [\text{explained variation}/ \text{total variation}] * 100 \quad ....(2.1)$$

ซึ่งถ้าค่า R^2 ออกมาต่ำสามารถแก้ไขได้โดย

1. เพิ่มจำนวนทำซ้ำในการทดลอง
2. ตรวจสอบว่ามีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องหรือไม่แล้วออกแบบการทดลองใหม่
3. ถ้าเพิ่มจำนวนทำซ้ำแล้ว ค่า R^2 ยังต่ำอยู่ ควรจะทำการ blocking เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.6.6 การตั้งสมมุติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing)

ในการทดลองจะต้องมีการตั้งสมมุติฐานและตรวจสอบสมมุติฐานว่าปัจจัยที่เราศึกษามีผลต่อกระบวนการจริงหรือไม่ซึ่งรูปแบบการตั้งสมมุติฐานมีดังนี้

1. กรณี Fixed Model

H_0 : factor ไม่มีผลต่อกระบวนการผลิต

H_1 : factor มีผลต่อกระบวนการผลิต

หรือเขียนในรูปสัญลักษณ์ เมื่อ τ คือ ค่าเฉลี่ยของทรีตเมนต์

$H_1 : \tau_1 = \tau_2 = \ldots = \tau_a = 0$

$H_0 : \tau \neq 0$

2. กรณี RANDOM MODEL จะเป็นการตรวจสอบว่าความแปรปรวนมีค่าเท่ากับศูนย์หรือไม่

$H_0 : \sigma^2 = 0$

$H_1 : \sigma^2 \neq 0$

ทั้งในการตั้งสมมุติฐานจะอยู่ภายใต้ความเสี่ยง 2 ตัว คือ α และ β โดย

α หมายถึง ความเสี่ยงในการไม่ยอมรับสมมุติฐาน ทั้งที่สมมุติฐานเป็นจริง

β หมายถึง ความเสี่ยงในการยอมรับสมมุติฐาน ทั้งที่สมมุติฐานไม่เป็นจริง

ซึ่งค่าความเสี่ยง 2 ตัวนี้ทำให้ต้องมีการทำซ้ำ เพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องมากขึ้นภายใต้ความเสี่ยงที่เรากำหนด

2.6.7 การหาจำนวนซ้ำในการทดลอง (Choice Of Sample Size)

คือ จำนวนตัวอย่างที่จะทำการทดลองเพื่อทำซ้ำ ซึ่งสามารถหาได้โดยเปิดจากเส้นโค้งโอซี (Operating Characteristic Curve) ซึ่งจะแบ่งตามรูปแบบการทดลอง กล่าวคือ

1. Fixed Effect Model ซึ่งในกรณีนี้พารามิเตอร์ที่เราสนใจคือ ϕ ซึ่ง

$$\phi^2 = n \sum_{i=1}^{a} \tau_i^2 \quad \text{สำหรับ Single Factor} \quad \ldots.(2.2)$$

$$\phi^2_A = b\,n \sum_{i=1}^{a} \tau_i^2 \quad \text{สำหรับ Double Factor} \quad \ldots.(2.3)$$

$$\phi^2_{AB} = bc\ldots n \sum_{i=1}^{a} \tau_i^2 \,/\, a\,\sigma^2 \quad \text{สำหรับ Multiple Factor} \quad \ldots.(2.4)$$

$$\phi^2_{AB} = \frac{n\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}(\tau\beta)_{ij}^2}{\sigma^2[(a-1)(b-1)-1]}$$ สำหรับ Interaction ....(2.5)

2. Random Effect Model ซึ่งพารามิเตอร์ที่สนใจ คือ λ โดย

$$\lambda = \sqrt{1+\frac{n\sigma_\tau^2}{\sigma^2}}$$ สำหรับ Single Factor ....(2.6)

$$\lambda_A = \sqrt{1+\frac{bn\sigma_\tau^2}{\sigma^2+n\sigma_{\tau\beta}^2}}$$ สำหรับ Double Factor ....(2.7)

$$\lambda_{AB} = \sqrt{1+\frac{n\sigma_{\tau\beta}^2}{\sigma^2}}$$ สำหรับ Interaction ....(2.8)

3. Mixed Model

ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดดูจาก Montgomery (1991) หัวข้อ 7.3.5 และ 7.4.3

2.6.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis OF Valiance) หรือ ANOVA

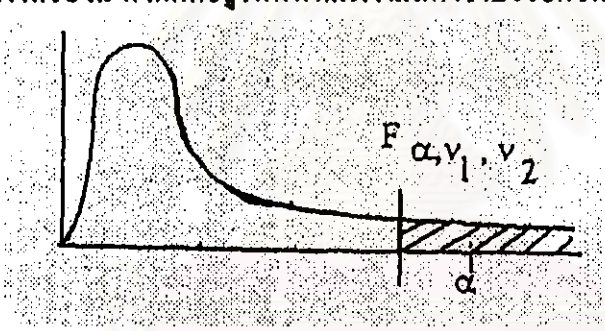
หลักการทำ ANOVA เป็นการใช้ความแปรปรวนมาวิเคราะห์ซึ่ง R.A. Fisher ได้ทำการวิเคราะห์ที่ความแตกต่าง โดยวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของค่าความแปรปรวนแล้วแปรเป็นความแตกต่างย่อย จากนั้นนำความแตกต่างย่อยนั้นมาเปรียบเทียบถ้าความแตกต่างใดมีค่ามากแสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีผล ข้อดีของการใช้ ANOVA เป็นการแก้ปัญหาการเฟ้อของ α (inflated risk) ดูตัวอย่างตาราง ANOVA ดังตารางที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่2.4 ตารางแสดงตัวอย่างตาราง ANOVA

Source of Variation	*Sum of Squares*	*Degrees of Freedom*	*Mean Square*	F_o
A	$\sum_{i=1}^{a} (y^2_{i..} / bn) - (y^2_{...} / abn)$	a-1	MS_A	MS_A/MS_E
B	$\sum_{j=1}^{b} (y^2_{.j.} / an) - (y^2_{...} / abn)$	b-1	MS_B	MS_B/MS_E
AxB	$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} (y^2_{ij.} / n) - (y^2_{...} / abn) - SS_A - SS_B$	(a-1)(b-1)	MS_{AB}	MS_{AB}/MS_E
Error	$SS_{Total} - SS_A - SS_B - SS_{AxB}$	(abn-1)-(a+1)-(b+1)-(a-1)(b-1)	MS_E	
Total	$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y^2_{ijk} - (y^2_{...} / abn)$	abn-1		

ซึ่งหลักเกณฑ์ในการพิจารณาว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อกระบวนการนั้น ดูที่ F_o ว่าตกอยู่ในพื้นที่แรเงาหรือไม่ หากตกอยู่ในพื้นที่แรเงาแสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีผล ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 รูปแสดงการกระจายของฟิชเชอร์ (Fisher)

2.6.9 รูปแบบการทดลอง

ในกรณี Single Factor มีรูปแบบการทดลอง

1. Complete Randomized Design (CRD) เหมาะที่จะใช้กับ Uncontrollable Factor ที่มีขนาดไม่โตนัก และไม่มี noise factor การทดลองจะยึดหลักการทำแบบสุ่ม และการทำซ้ำ

2. Randomized Block Design (RBD) ต้องมีการทำสุ่มทุกครั้ง ทำซ้ำทุกการทดลองและมีการทำบล็อค (blocking)

3. Latin Square Design (LSD)

ในกรณีที่เป็น Multi Factor มีรูปแบบการทดลอง

1. General Factorial ซึ่งใช้กับการทดลองที่มี 2 ปัจจัยขึ้นไป จึงทำให้เกิดผลของอิทธิพลร่วม (interaction effect) และอิทธิพลหลัก (main effect) ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยร่วมคือผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนไปแล้วทำให้อิทธิพล (effect) ของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย

2. Fractional Factorial Design

2.6.10 %R&R (Repeatability and Reproducibility)

ในการวัดค่าแต่ละครั้งนั้นจะเกิดความแตกต่างขึ้นเสมอ ซึ่งสาเหตุที่สำคัญที่เป็นเช่นนั้นมีอยู่ 3 สาเหตุด้วยกันคือ

1) ความผันแปรของกระบวนการ (process variation)

2) ระบบการวัด (measurement system)

3) ขนาดของข้อมูลตัวอย่าง (sample size) และความถี่ หรืออาจบอกได้ว่า

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{product} + \sigma^2_{gage} \quad \ldots.(2.9)$$

ซึ่งในการเก็บข้อมูลนั้น หากเราทำให้ความผิดพลาดจากระบบการวัดมีน้อยที่สุดก็จะให้เรามีความเชื่อมั่นในการที่จะได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากขึ้น ความแตกต่างจากระบบการวัดนี้มีสาเหตุมาจาก

1) การวัดต่างตำแหน่งกัน

2)ผู้ตรวจสอบเอง

3) เครื่องมือวัด ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องมือวัดที่เราต้องการคือ

-ความแม่นยำ (precision) ซึ่งหมายถึง ความสม่ำเสมอในการวัดซ้ำ ซึ่งโดยปกติจะแสดงถึงองศาความอิสระ (degree of freedom) จากค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด

-ความถูกต้อง (accuracy) เบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ยในการวัดจากค่าจริงซึ่งมักระบุเป็นค่าร้อยละของค่า Full Scale ของค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด

-ความมีเสถียร (stability)

-คุณสมบัติเชิงเส้นตรง (linearity) คือรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของปริมาณที่วัดกับค่าที่วัดได้

ความแตกต่างจากการวัดนั้นเราสามารถลดความแตกต่างภายในหน่วยวัดได้ โดยการกำหนดจุดวัด แต่เราไม่สามารถลดความแตกต่างจากผู้ตรวจสอบและความแตกต่างที่เกิดจากเครื่องมือวัดได้

การหาประสิทธิภาพของการวัดนั้น หาได้จาก %R&R (percent of Repeatability and Reproducibility)

- Repeatability คือความสม่ำเสมอของค่าที่วัดได้จากการวัดในช่วงสั้นๆ ภายใต้เงื่อนไขการวัดเดียวกัน อุปกรณ์เดียวกัน พนักงานคนเดียวกัน และวัดในตำแหน่งเดียวกัน

- Reproducibility คือความสม่ำเสมอของค่าที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการวัด คือ วิธีการวัด พนักงานวัด

ซึ่ง %R&R สามารถหาได้จาก

$$\%R\&R = \text{Capability} / \text{Spec Tolerance} \quad \ldots.(2.10)$$

โดยค่า Capability ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 ค่า คือ 5.15, 6, 4

ดังนั้น

$$\%R\&R = (5.15\ \sigma_{R\&R} / \text{USL-LSL})100$$

โดย USL = ข้อจำกัดบน (Upper Specification Limit)

LSL = ข้อจำกัดล่าง (Lower Specification Limit)

$$\sigma_{R\&R} = \sqrt{\sigma^2_{repeatability} + \sigma^2_{reproducability}}$$

$$\sigma_{reproducibility} = R(\bar{x})/d2 \quad \ldots.(2.11)$$

$$\sigma_{repeatability} = R(x)/d2 \quad \ldots.(2.12)$$

สรุปว่า ถ้า %R&R <= 10% ถือได้ดีเลิศ

10% < %R&R<= 30% ถือว่ายอมรับได้

%R&R > 30% ถือว่าไม่ยอมรับ

หาค่า %R&R ออกมาไม่ยอมรับ ต้องหาสาเหตุทีละตัว

$$\%repeatability = (5.15\ \sigma_{repeat} / \text{USL-LSL})\ 100\%$$

$$\%reproducibility = (5.15\ \sigma_{reproduct} / \text{USL-LSL})\ 100\%$$

หาตัวไหนออกมาก็แสดงว่าตัวนั้นทำให้เกิดความแตกต่างจากการวัดมากซึ่งมีวิธีการแก้ไข โดยถ้า %Repeatability มาก

1) ให้วัดซ้ำมากขึ้น

2) ให้ใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำกว่านี้

หาก %Reproducibility มากแก้โดยฝึกอบรมการวัดใหม่