บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การหล่อโลหะ [2]

การหล่อโลหะ (Foundry Processes) คือ การทำแบบหล่อ (Molds) การทำกระสวนงานหล่อ (Patterns) การเตรียมทรายหล่อ (Sands) การจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จะใช้ในงานหล่อ (Hand tools) การเตรียมและการหลอมละลายของโลหะที่จะทำการหล่อ (Melting) การทำความสะอาดโลหะที่ผ่านการหล่อ (Cleaning) และรวมถึงการตรวจสอบชิ้นงานหล่อและการควบคุมคุณภาพ (Inspecting Testing and Quality Control in foundries)

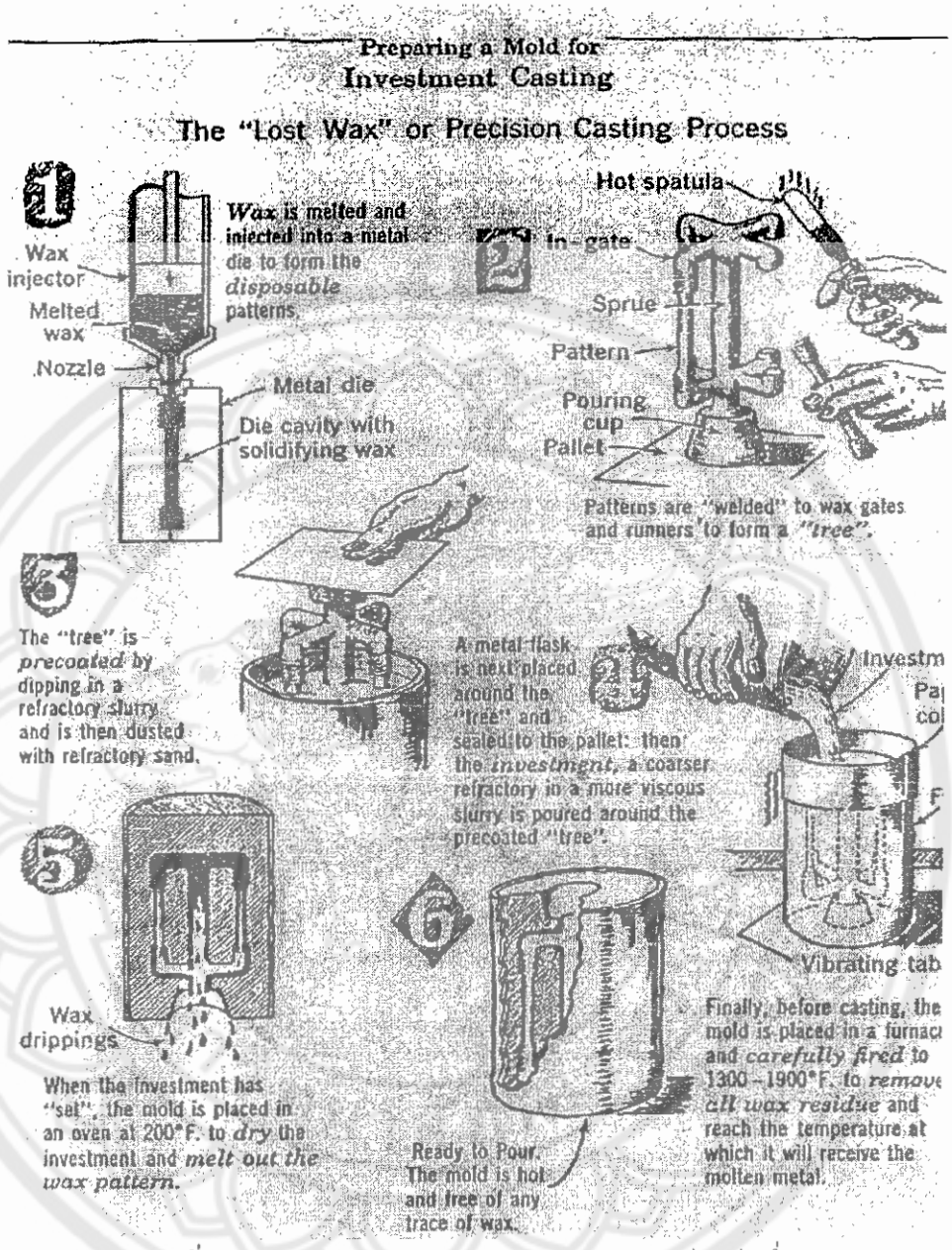
งานหล่อโลหะ คือ ชิ้นงานที่เราได้จากการเทน้ำโลหะที่กำลังหลอมละลายลงไปในโพรงของแบบหล่อ (Molds) ที่ได้จัดเตรียมไว้ล่วงหน้าแล้ว หลังจากนั้นก็ปล่อยให้เย็นตัวลงมาจนถึงอุณหภูมิปกติก็จะได้รูปร่างของชิ้นงานหล่อที่มีลักษณะเหมือนกับโพรงแบบหล่อ (Molds) นั่นเอง

การหล่อแบบอินเวสเมนต์ (Investment Casting)เป็นการหล่อโลหะแบบขี้ผึ้งหาย (Lost Wax) ใช้กระสวนที่เป็นขี้ผึ้ง (Wax) เพื่อผลิตงานหล่อออกมาให้มีความละเอียด ประณีตสูงๆ นอกจากนี้อาจจะใช้พลาสติก (Plastic) หรือปรอท (Hg) มาทำเป็น Pattern ก็ได้เช่นกัน โดยก่อนเทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อ (Molds) ต้องไล่กระสุนระเหยเป็นแก๊สออกไปจากแบบเสียก่อน งานที่ได้ออกมาส่วนใหญ่จะใช้หล่อพระพุทธรูป หรืองานละเอียดด้านศิลปะต่างๆ

รูปที่ 2.1 Wax Pattern

รูปที่ 2.2 Ceramic Pattern

รูปที่ 2.3 ชิ้นงานหล่อที่ได้



รูปที่ 2.4 แสดงขบวนการหล่อแบบ Lost Wax อีกวิธีหนึ่ง

2.2 ทองเหลือง [3]

ทองเหลืองคือโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี โดยสังกะสีสามารถละลายในทองแดงให้สารละลายของแข็ง ปริมาณของสังกะสีที่ละลายอยู่ได้สูงถึง 39% และถ้าผสมสังกะสีมากกว่านี้จะได้สารประกอบเชิงโลหะระหว่างทองแดงกับสังกะสีอีกหลายชนิด ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียวและคุณสมบัติทนการกัดกร่อน ตลอดจนสีของทองเหลืองเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม

ในอุตสาหกรรมผลิตทองเหลืองทั่วๆไปจะแยกมาตรฐานออกเป็นสองกลุ่มคือ ประเภทรีดเป็นแท่ง หรือเป็นแผ่น (Wrough copper alloys) กับอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นประเภทหล่อ (Cast copper alloys) ซึ่งทั้งสองกลุ่มจะแยกชั้นคุณภาพตามปริมาณของสังกะสีที่ผสม ซึ่งไม่สามารถนำรายละเอียดมาอธิบายได้ในที่นี้เพราะมีมากมายหลายชั้นคุณภาพ จะหารายละเอียดได้จากคู่มือของ ASTM หรือ JIS ในการศึกษาเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกล มักจะกล่าวถึงชื่อทองเหลืองที่รู้จักกันและใช้งานกันอยู่เป็นประจำซึ่งมีอยู่ไม่มากนักคือ

ทองเหลืองที่ผสมสังกะสีไม่เกิน 5 %(95 Cu -5 Zn) มีชื่อเรียกทางการค้าว่า Gilding metal ใช้ทำเหรียญ

ทองเหลืองผสมสังกะสี 10% (90 Cu -10 Zn) เรียก Commerical bronze หรือบรอนซ์ทางการค้า ความจริงเป็นทองเหลือง คุณสมบัติและการใช้งานคล้ายคลึงกับ Gliding metal

ทองเหลืองผสมสังกะสี 12.5% (87.5 -12.5 Zn) เรียก Jewelry bronze หรือทองเหลืองทำเครื่องประดับ

ทองเหลืองผสมสังกะสี 15% (85 Cu -15 Zn) เรียก Red Brass หรือทองเหลืองแดง

ทองเหลืองผสมสังกะสี 20% (80 Cu - 20 Zn) เรียก Low brass ซึ่งคงไม่หมายความถึงทองเหลือง ชั้นคุณภาพต่ำตามความหมาย

ทองเหลืองผสมสังกะสี 30% (70 Cu -30 Zn) เรียก Cattridge brass หมายถึงทองเหลืองที่ใช้ทำปลอกกระสุนปืน ทำท่อที่ต้องอาศัยการอัดขึ้นรูป

ทองเหลืองผสมสังกะสี 35% (65 Cu -35 Zn) เรียก Yellow brass หมายถึงทองเหลืองที่มีสีค่อนข้างเหลืองจัด คุณสมบัติและการใช้งานใกล้เคียงกับ Cartridge brass

ทองเหลืองผสมสังกะสี 40% (60 Cu -40 Zn) เรียก Muntz Metal คำว่า Muntz คงจะเป็นชื่อทางการค้า

นอกจากทองเหลืองที่ได้กล่าวมานี้แล้วยังมีทองเหลืองที่มีชื่อแตกต่างออกไปอีกหลายชนิดตามลักษณะทางการค้า และการผสมธาตุอื่น ๆ นอกจากสังกะสี เช่น ตะกั่ว และดีบุก ดังตัวอย่างเช่น ทองเหลืองตะกั่ว ทองเหลืองดีบุก ทองเหลืองอะลูมิเนียม และทองเหลืองซิลิคอน เป็นต้น ส่วนผสมและคุณสมบัติเชิงกลของทองเหลืองจะปรากฏในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมและคุณสมบัติเชิงกลของทองเหลือง

WROUGHT ALLOYS													
MATERIAL	FORM	COMPOSITION, %				TENSILE STRENGTH, 1,000 PSI		YIELD STRENGTH 0.5% OFFSET 1,000 PSI		ELONGATION, % IN 2 IN		HARDNESS, ROCKWELL B	
		Cu	Zn	Si	OTHERS	HARD	SOFT	HARD	SOFT	HARD	SOFT	HARD	SOFT
Copper	Sheet	99.9+	...	...	...	55	32	48	...	4	50	58	
Gilding metal	Sheet	95.0	5.0	...	...	55	35	45	11	5	38	68	7
Commercial bronze	Sheet	90.00	10.0	...	...	67	37	53	11	3	40	75	10
Red brass	Sheet	85.0	15.0	...	...	80	45	55	15	4	43	85	10
Low brass	Sheet	80.0	20.0	...	...	85	43	65	15	4	50	86	11
	Rod	80.0	20.0	...	...	80	45	60	15	5	50		
Spring brass	Sheet	75.0	25.0	...	...	80	47	60	15	5	45	87	15
Brass	Sheet	70.0	30.0	...	...	86	45	65	15	4	50	87	
Cartridge brass	Sheet	69.0	31.0	...	...	85	48	65	15	4	58	87	22
Yellow brass	Sheet	65.0	35.0	...	...	90	45	70	15	5	60	85	30
Muntz metal	Sheet	60.0	40.0	...	...	80	57	60	15	9	48	87	42
Phosphor bronze	Sheet	96.0	...	4.0	0.25 P	90	45	75	18	4	50	90	30
	Sheet	92.0	...	8.0	+P	110	60	85	25	3	55	99	45
Aluminum brass	Tube	78.0	22.0	...	2 Al	83	62	75	16	17	52	86	33
Aluminum bronze	...	92.0	...	...	8 Al	134	76	100	30	13	55	99	69
Manganese bronze	Rod	58.0	39.0	...	1 Al, 1 Mn, 1 Fe	85	60	50	20	45	90	25	
Admiralty metal	Tube	71.0	21.0	1.0	...	100	53	98	18	3	60	95	13
Naval brass	Rod	60.0	39.0	0.75	0.25 Pb	62	54	39	15	30	40	55	
Silicon brass	...	78.0	20.0	...	2.0 Si	110	55	83	12	4	60		
Tin brass	...	88.0	10.0	2.0	...	85	...	...	...	3	...	86	

ตารางที่ 2.2 Casting alloys

MATERIAL	COMPOSITION, %				TENSILE STRENGTH, 1,000 PSI	YIELD STRENGTH, 1,000 PSI	ELONGATION, %	BHN, 500 kg, 10 mm
	Cu	Zn	Sn	OTHERS				
Cond. copper	99.85	...	...	...	30	17	45	40
Brass	70.0	30.0	...	...	28	16	22	65
Tin brass	63.0	36.0	1.0	...	30	18	18	75
Silicon brass	81.0	15.0	...	4 Si	90	45	16	
Aluminum brass	63.0	32.5	...	2.5 Al	62	35	18	120
Bronze	88.0	...	12.0	+ P	40	22	11	70
	81.0	...	19.0	+ P	35	25	12	135
Gear bronze	88.0	4.0	5.5	2.5 Ni	42	17	32	75
Leaded red brass	85.0	5.0	5.0	5 Pb	34	17	25	60
	80.0	..	10.0	10 Pb	35	17	20	65
Silicon bronze	95.0	1.0	...	4 Si	55	22	35	90
	93.0	4.0	...	2.5 Si, 0.5 Fe	50	18	20	
Aluminum bronze	89.0	...	...	10 Al, 1 Fe	67	32	15	140
	88.0	...	...	9 Al, 3 Fe	80	35	25	140
Manganese bronze	68.0	20.0	...	4 Mn, 5 Al, 2.5 Fe	110	70	15	
	64.0	24.0	...	4 Mn, 5 Ml, 3 Fe	115	70	15	210
Nickel silver	60.0	20.0	...	20 Ni	45	20	35	55
Cupronickel	70.0	...	...	30 Ni	64	33	35	120

*From S.L. Hoyt, "Metal Data", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1952.

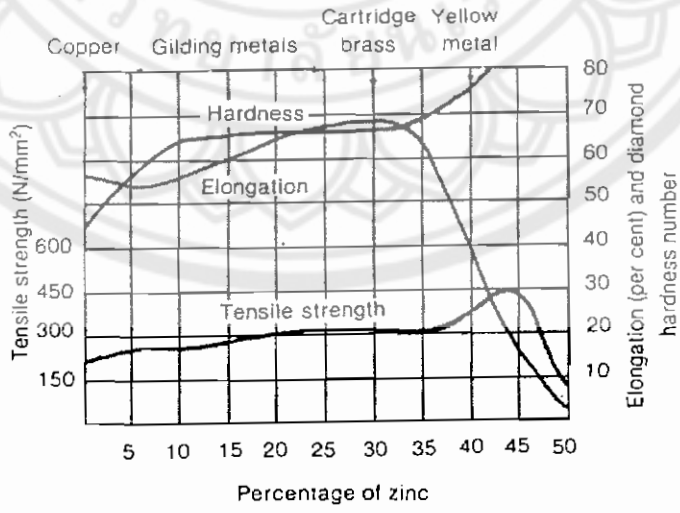
2.2.1 คุณสมบัติเชิงกลของทองเหลือง

สังกะสีมีบทบาทอันสำคัญในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของทองเหลือง โดยเพิ่มทั้งความแข็งแรง ความเหนียว และความแข็งให้กับทองแดง ในช่วงที่สังกะสีสามารถละลายให้กับสารละลายของแข็งในทองแดง แต่เมื่อเลยพิกัดการเป็นสารละลายของแข็งไปแล้ว สังกะสีจะให้สารประกอบเชิงโลหะกับทองแดง ซึ่งมีความแข็งและเปราะ ในช่วงนี้ความแข็งแรงกับความเหนียวจะค่อยๆลดลง คงจะเพิ่มแต่ความแข็งเท่านั้น

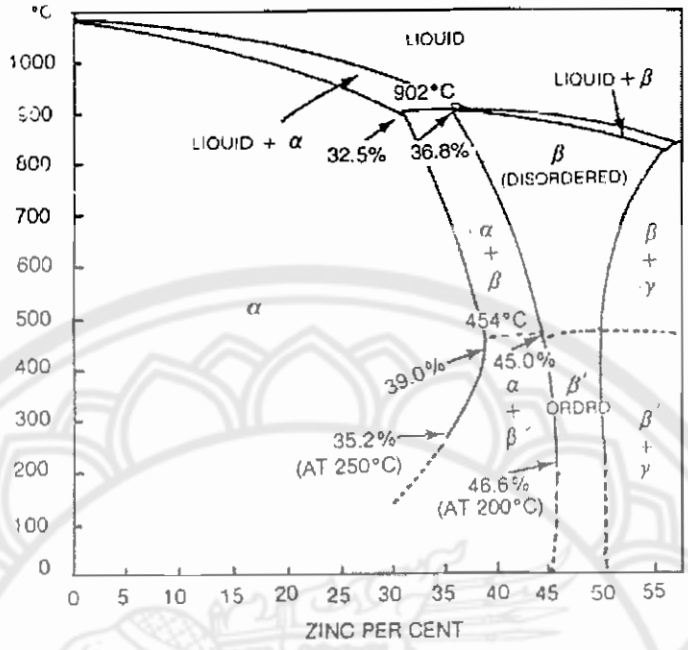
จากการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อผสมสังกะสีประมาณ 40-45% จะได้ความแข็งแรงสูงสุดในสภาพภายหลังการรีด และความเหนียว ซึ่งวัดได้โดยหาค่าอัตราการยืดตัว (% elongation) จะขึ้นสูงสุดเมื่อทองเหลืองมีส่วนผสมสังกะสี 25 – 35% ถ้าเลยขอบเขตอันนี้ความเหนียวจะลดลงอย่างรวดเร็วการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลตามปริมาณสังกะสีทำให้ต้องเลือกให้ถูกลักษณะของโลหะผสมในการใช้งานและทองเหลืองชื่อเรียกแตกต่างกันไป ก็เพราะคุณสมบัติเชิงกลที่ต่างกัน

2.2.2 โลหะวิทยาของทองเหลือง

การนำทองเหลืองไปใช้งานจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเชิงกลของทองเหลืองซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของสังกะสี และลักษณะโครงสร้างจุลภาค ในการศึกษาจึงต้องอาศัยแผนภูมิสมดุลของทองแดงกับสังกะสีเป็นพื้นฐานทำความเข้าใจบทบาทของสังกะสีในทองแดง ซึ่งจะปรากฏในแผนภูมิสมดุลดังรูปที่ 2.5 และ 2.6



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลและปริมาณของสังกะสีที่อยู่ในทองเหลืองประเภทรีด



รูปที่ 2.6 แผนภูมิสมดุลของทองแดง-สังกะสี

จากแผนภูมิสมดุลที่นำมาแสดงจะปรากฏเพียงแค่ประมาณ 60% สังกะสีเท่านั้น เพราะในงานวิศวกรรมจะใช้ทองเหลืองที่มีส่วนผสมสังกะสีไม่เกิน 45% ถ้าทองเหลืองมีสังกะสีสูงกว่านี้จะเปราะแตกหักง่ายไม่เหมาะสำหรับใช้งาน สังกะสีสามารถละลายในทองแดงและให้สารละลายของแข็งได้สูงที่สุด 36% ที่อุณหภูมิ 454°C ซึ่งสารละลายของแข็งนี้เรียกว่าเฟสแอลฟา (α) มีระบบผลึกเป็น FCC มีระยะห่างระหว่างอะตอม 3.61-3.69 A° มีความเหนียวสูงมาก สามารถขึ้นรูปเย็นได้ง่าย จากแผนภูมิสมดุลจะพบว่าเฟสแอลฟามีปริมาณสังกะสี 32.5% ที่ 902°C และเพิ่มขึ้นจนสูงสุด 39% ที่ 454°C และกลับลดลงเหลือ 35.2% ที่ 250°C เฟสแอลฟาจะมีสีแดงจนถึงเหลืองเหมือนทองคำเมื่อปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 10 จนถึง 20% และจะกลับสีจางลงเมื่อปริมาณสังกะสีเพิ่มขึ้นจนถึง 30%

เมื่อผสมสังกะสีเพิ่มขึ้นจะปรากฏเฟสเบต้า (β) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเปริเทคติคระหว่างเฟสแอลฟากับโลหะทองเหลืองหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 902°C เฟสเบต้ามีระบบผลึกเป็นแบบ BCC มีระยะห่างอะตอม 2.945 A° ที่อุณหภูมิสูงกว่า 454°C อะตอมของสังกะสีจะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Disordered) แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 454°C การเรียงตัวของอะตอมสังกะสีในทองแดงจะเป็นระเบียบ (Ordered) เรียกเฟส β' ในหนังสือบางเล่มจะระบุว่าเฟส β และ β' เป็นสารประกอบ ซึ่งมีสูตร $CuZn_8$ มีความแข็งสูงกว่าเฟส α และมีความเหนียวน้อยลงไม่สามารถขึ้นรูปเย็นได้ เฟส β' ที่อุณหภูมิปกติจะมีสีเหลืองอ่อนคล้ายกับเฟส α ที่มีสังกะสีผสม 30%

เฟสแกมมา (γ) จะปรากฏเมื่อเกิดปฏิกิริยาเปริเทคติคครั้งที่สอง ระหว่างเฟส β กับโลหะทองเหลืองหลอมเหลวที่เหลือ ให้เฟส γ ที่อุณหภูมิ 834°C (จากแผนภูมิสมดุลไม่ปรากฏปฏิกิริยานี้ชัดเจน) เฟส γ เป็นสารประกอบเชิงโลหะมีสูตร $CuZn_8$ มีระบบผลึกเป็นระบบลูกบาศก์เชิงซ้อน (Complex Cubic) มีความแข็งสูง และเปราะแตกหักง่าย มีสีกระเดียดไปทางขาวมากกว่าเหลือง

นอกจากเฟสที่กล่าวมาแล้วหลายประเภทที่ปรากฏในแผนภูมิสมดุล แต่ถ้าปริมาณสังกะสีสูงกว่า 68% จะปรากฏเฟส ε ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงโลหะ มีระบบผลึกเป็นหกเหลี่ยมเชิงซ้อน (Complex hexagonal) มีคุณสมบัติคล้ายกับเฟส γ จากแผนภูมิสมดุลทางด้านสังกะสีสูงจะปรากฏเฟส η ที่เป็นสารละลายของแข็งของทองแดงในสังกะสีมีระบบผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยมชนิด Close packed มีสีขาวปนน้ำเงิน มีความเหนียวปานกลางสามารถขึ้นรูปเย็นได้

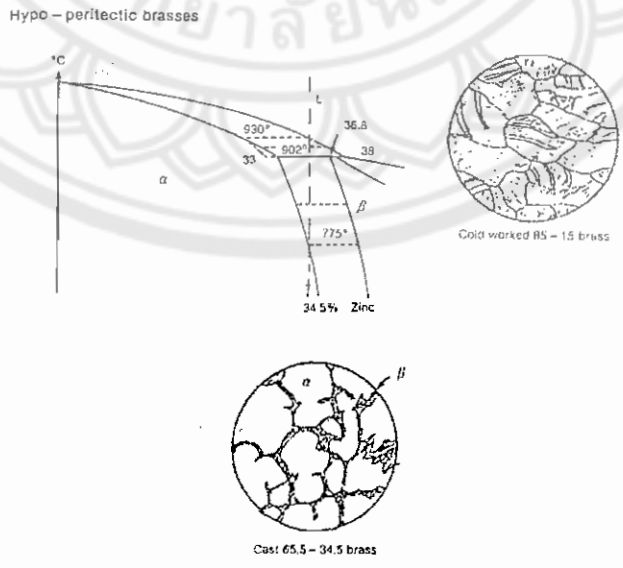
2.2.3 **โครงสร้างจุลภาคของทองเหลือง** (Microstructure)

ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคจะแบ่งลักษณะโครงสร้างของทองเหลืองออกไปได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับปริมาณของสังกะสี ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาเปริเทคติค ขึ้นอยู่กับลักษณะองค์ประกอบของโครงสร้าง α และ β สุดท้ายจะขึ้นอยู่กับการอบความร้อน (Annealing) จากแผนภูมิสมดุลของทองแดงกับสังกะสี จะพบว่าเริ่มตั้งแต่ปริมาณสังกะสีน้อยๆจนถึง 39% โครงสร้างสุดท้ายที่อุณหภูมิปกติจะเป็นสารละลายของแข็งแอลฟา

ทองเหลืองส่วนผสมไฮโป-เปอร์ริเทคติค เป็นทองเหลืองที่ผสมสังกะสีระหว่าง 33 ถึง 36.8% จากแผนภูมิสมดุลที่ส่วนผสม 36.8% คือจุดเปอร์ริเทคติคในที่นี้จะศึกษากรณีของทองเหลือง 34.5% จากอุณหภูมิสูงกว่า 930°C ทองเหลืองจะหลอมละลาย เมื่อปล่อยให้เย็นลงทองเหลืองหลอมเหลวจะเริ่มเกิดนิวเคลียสที่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิ 930°C เกิดเฟส α ที่มีเปอร์เซ็นต์ของสังกะสีต่ำกว่า 34.5% ในช่วงอุณหภูมิจาก 930°C ลงมาจะปรากฏมีเฟส α เพิ่มขึ้นแต่คงเป็นไปในลักษณะ Cored solid solution กล่าวคือที่บริเวณใจกลางของผลึก α จะมีปริมาณสังกะสีต่ำกว่าบริเวณขอบเกรน เมื่ออุณหภูมิอยู่เหนือ 902°C เล็กน้อยจะปรากฏมีผลึก α ที่เป็นของแข็งมีปริมาณเป็น 2/3 โดยมีทองเหลืองที่อยู่ในสภาพหลอมเหลวอีก 1/3 (ตามกฎ Lever arm) ของปริมาณทองเหลืองทั้งหมด ทองเหลืองหลอมเหลวนี้จะมีส่วนผสมของสังกะสี 38% เมื่ออุณหภูมิลดลงมาอยู่ที่ 902°C จะเกิดปฏิกิริยาเปอร์ริเทคติค โดยเฟส α จะทำปฏิกิริยากับทองเหลืองหลอมเหลวให้ผลึกของเฟส β ($L + \alpha \rightleftharpoons \beta$) โดยหลักการทางโลหะวิทยาการเกิดปฏิกิริยาเปอร์ริเทคติคจะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดได้ช้ามาก เพราะโลหะหลอมเหลวจะทำปฏิกิริยาได้ดีเฉพาะบริเวณผิวของเฟสของแข็งเท่านั้น และยิ่งเฟส β ที่เกิดจากปฏิกิริยา มีปริมาณสังกะสี

สูงกว่าเฟส α เป็นการยากที่อะตอมของสังกะสีจะแพร่ซึมเข้าสู่เฟส α จนถึงใจกลางของผลึกย่อม ต้องใช้เวลาที่ยาวนาน ในสภาพอัตราการเย็นตัวในแบบหล่อที่เป็นทรายหรือโลหะย่อมห่างไกลจากอัตราการเย็นตัวเพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลได้ เมื่อสถานการณ์เป็นเช่นนี้ ทองเหลืองเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 902°C ปริมาณของทองเหลืองหลอมเหลวจะแข็งตัวหมดโดยเปลี่ยนเป็นเฟส β ล้อมรอบผลึกของ α โครงสร้างของทองเหลือง 34.5% Zn ในช่วงอุณหภูมิขณะนี้จึงประกอบด้วยผลึกของ α ที่เป็น Cored solid solution เป็นเกรนขนาดโต โดยมีเฟส β ล้อมรอบอยู่ทั่วไปตามขอบเกรน

เมื่อปล่อยให้โลหะผสมเย็นตัวต่อไปจากอุณหภูมิ 902°C จะปรากฏว่าเฟส β ลดปริมาณลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 775°C ในสภาวะสมดุลเฟส β จะหมดไปคงเหลือเพียงเฟส α เท่านั้น จนถึงอุณหภูมิปกติ แต่ในสภาพที่เป็นจริงเมื่ออัตราการเย็นตัวสูงกว่าอัตราการเย็นตัวสภาวะสมดุลจะปรากฏเฟส β หลงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิปกติ ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงจากเฟส β ไปเป็น α เป็นไปได้ช้าเช่นเดียวกัน ทำให้เฟส β เหลืออยู่ที่อุณหภูมิปกติ แต่เป็นเฟสที่ไม่มีเสถียรภาพ ถ้านำโลหะผสมนี้ไปอบความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C ทิ้งไว้ระยะหนึ่ง แล้วปล่อยให้เย็นในอากาศ จะได้โครงสร้างของทองเหลือง 34.5% Zn ประกอบด้วยเฟส α เพียงเฟสเดียว เฟส β จะสลายตัวหมด หรือในลักษณะเดียวกันถ้านำเอาทองเหลือง 34.5% Zn ที่มีโครงสร้างเป็น α ทั้งหมดไปเผาที่อุณหภูมิ 880°C เพื่อให้เกิดเฟส β แล้วทำการชุบในน้ำให้เย็นเร็ว เราจะได้โครงสร้างของโลหะผสมที่ประกอบด้วยเฟส α และ β ซึ่งเฟส β เป็นเฟสที่ไม่อยู่ในสภาวะสมดุล



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของทองเหลืองส่วนผสมไฮโป-เปอร์ริเทคติค

2.2.4 เทคนิคการหล่อหลอม

การหลอมโลหะผสมทองแดง-สังกะสี นิยมใช้เตาหลอมประเภท crucible ซึ่งใช้เชื้อเพลิงทั้งน้ำมันและแก๊ส ถ้าเป็นการหลอมเป็นจำนวนมากจะใช้เตาไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ อุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะผสมจะอยู่สูงกว่าจุดกลายเป็นไอของสังกะสี (913°C) ดังนั้นความดันไอของสังกะสีจะช่วยป้องกันการละลายของแก๊สไฮโดรเจนได้ดี การควบคุมบรรยากาศของเตาหลอม จึงมีความสำคัญน้อยลงแต่ถ้าเป็นเตาที่ใช้น้ำมันหรือแก๊สจะควบคุมการเผาไหม้ให้เป็นกลางหรือรีดิวซิงเล็กน้อย แต่ไม่ควรควบคุมการเผาไหม้ให้เป็นบรรยากาศออกซิไดซิง คือมีออกซิเจนมากเกินไปจะทำให้มีการสูญเสียปริมาณสังกะสีมาก ควรใช้ฟลักซ์ใส่คลุมผิวหน้าของโลหะผสมหลอมเหลวไว้ ฟลักซ์ที่ใช้จะเป็นพวกบอแรกซ์ผสมกับฟลูออไรท์ ฟลักซ์จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวป้องกันไม่ให้สังกะสีหนีออกรวมตัวกับออกซิเจนเป็นออกไซด์

การหลอมจะต้องทำให้เร็ว และไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป เพราะถ้าหลอมใช้เวลานานจะเกิดการสูญเสียโลหะสังกะสีมาก เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการแล้วจะเติมสังกะสีลงไปอีกประมาณ 1% เพื่อชดเชยจากการสูญเสีย จากนั้นจะใส่แก๊สออกซิเจนในโลหะหลอมเหลวด้วยทองแดง-ฟอสฟอรัส หรือทองแดงฟอสไฟด์ประมาณ 0.2% จะทำให้โลหะหลอมเหลวมีคุณสมบัติด้านการหล่อดีขึ้น เหมาะสำหรับงานหล่อที่บางมากๆ และช่วยให้อินคลัสชั่นลอยตัวเป็นตะกรันได้ง่ายขึ้น อุณหภูมิเท (Pouring temperature) ที่เหมาะสมสำหรับโลหะผสมแต่ละประเภทและความหนาที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิเท (Pouring temperature) ที่เหมาะสมสำหรับโลหะผสมแต่ละประเภทและความหนาที่แตกต่างกัน

	Under ½" (13 mm) Section		½" to 1½" (13-38 mm) Section		Over 1½" (38 mm) Section	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F
60/40 - 65/35 alloys	1100	2012	1050	1922	1020	1868
70/30 - 80/20 alloys	1150	2102	1100	2012	1070	1958
85/15 - 90/10 alloys	1190	2172	1150	2102	1110	2030

2.3 **อะลูมิเนียม** (Al)

ความหนาแน่น 2,7 Kg/dm^3 จุดหลอมเหลว 658°C ตรงผิวของอะลูมิเนียมที่สัมผัสกับอากาศจะเกิดเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al+O) ทำให้ทนการกัดกร่อนได้ดีมาก นำกระแสไฟฟ้าได้ 2/3 เท่าของทองแดง สามารถรีด ดึงขึ้นรูปได้ดี นำความร้อนได้ดี จึงนำมาใช้ทำอุปกรณ์ภาชนะหุงต้ม แต่ห้ามมิให้สารละลายประเภทเกลือเกาะที่ผิวอะลูมิเนียมเพราะจะเกิดการกัดอะลูมิเนียมขึ้น ความเค้นของอะลูมิเนียมอยู่ระหว่าง 70 N/mm^2 (ต่ำกว่าทองแดง) มีความยืดราว 20-35 % จึงใช้ดัด เคาะ อัดขึ้นรูปได้ดี ไม่เหมาะเป็นชิ้นส่วนงานสร้างทุกชนิดที่รับภาระมาก อะลูมิเนียมปาดผิวได้ง่ายและรวดเร็ว การที่รีดเย็น ดึงได้ ทำให้ความเค้นความแข็งเพิ่มขึ้น (เกิดความเครียดขณะเย็น) ในการขึ้นรูปมากเกินไปจะต้องนำไปอบลดความเค้นก่อนจึงจะขึ้นรูปต่อไปจนสำเร็จได้ ใช้เชื่อมบัดกรีแข็ง (ใช้เชื่อมประสาน) และยึดต่อกับพลาสติกด้วยกาวแข็งได้

ประโยชน์ เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยจึงนำไปใช้งานได้มาก ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานได้มาก อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ใช้ทำกระป๋อง เครื่องครัว วัสดุก่อสร้าง ชิ้นส่วนงานทางไฟฟ้า นำไปรีด ดึง อัดรีดให้เป็นแผ่นเส้นแบน เส้นลวดท่อ แท่ง หรือรูปพรรณตบแต่งอาคารได้

การหล่อด้วยแบบทราย คือ กระบวนการหล่ออะลูมิเนียมที่ธรรมดาที่สุดและทำได้หลายอย่างที่สุด รูปที่ 9.48 แสดงว่า แบบทรายธรรมดาอันหนึ่งหล่อชิ้นงานขึ้นมาได้อย่างไร ปกติเลือกการหล่อด้วยแบบทรายในการผลิตเพราะ (1) ปริมาณของงานหล่อน้อย (2) ชิ้นงานหล่อซับซ้อนโดยมีแกนรูปร่างละเอียดอ่อนด้วย (3) ชิ้นงานใหญ่ และ (4) เป็นงานหล่อโครงสร้าง

การหล่อด้วยแบบถาวร น้ำโลหะถูกเทลงในแบบโลหะที่ถาวรภายใต้แรงโน้มถ่วงความดันต่ำหรือแรงดันเหวี่ยงเท่านั้น รูปที่ 6.2 แสดงแบบถาวรที่เปิดออกมา ส่วนรูปที่ 6.3a แสดงงานหล่อด้วยแบบถาวรของลูกสูบรถยนต์อะลูมิเนียมผสม 2 ชิ้น งานหล่อของโลหะผสมและรูปร่างชนิดเดียวโดยแบบถาวรให้โครงสร้างเกรนที่ละเอียดกว่า และมีความแข็งแรงสูงกว่างานหล่อด้วยแบบทราย อัตราการเย็นตัวที่เร็วว่าในการหล่อด้วยแบบถาวรให้โครงสร้างเกรนที่ละเอียดกว่า การหล่อด้วยแบบถาวรมักจะให้การหดตัวและรูแก๊สน้อยกว่าการหล่อด้วยแบบทรายด้วย อย่างไรก็ดีแบบถาวรมีขนาดที่จำกัดและชิ้นส่วนที่ซับซ้อนอาจจะหล่อด้วยแบบถาวรได้ยากหรือไม่ได้เลย

ในดายคาสติ้ง (die casting) ชิ้นงานถูกหล่อด้วยอัตราการผลิตสูงที่สุดโดยการอัดน้ำโลหะภายใต้แรงดันสูงเข้าไปในแบบโลหะ แบบโลหะทั้ง 2 ข้างถูกล็อคเข้าด้วยกันอย่างแน่นหนาเพื่อให้ทนแรงดันสูงได้ อะลูมิเนียมหลอมเหลวถูกอัดเข้าไปในช่องว่างในแบบเมื่อโลหะแข็งตัว ปลดล็อคของแบบและเปิดออกเพื่อเอาชิ้นงานที่ร้อนอยู่ออกมา แบบทั้ง 2 ถูกล็อคเข้าด้วยกันอีกและกระทำการหล่อซ้ำอีก ข้อดีบางประการของดายคาสติ้ง คือ (1) ชิ้นงานที่หล่อแบบ ดายคาสติ้ง ที่ได้

ใกล้เคียงกันมากกว่ากระบวนการหล่อที่สำคัญอื่นๆ (3) ได้ผลชิ้นงานเรียบ (4) อัตราการเย็นตัวเร็ว ให้ชิ้นงานที่มีโครงสร้างเกรนละเอียดและ (5) กระบวนการทำให้เป็นแบบอัตโนมัติได้ง่าย

ส่วนผสมของอะลูมิเนียมผสมหล่อ คุณสมบัติเชิงกลและการใช้งานของอะลูมิเนียมผสมหล่อแยกประเภทโลหะผสมเหล่านี้ในสหรัฐอเมริกาตาม Aluminum Association system ในระบบนี้อะลูมิเนียมผสมหล่อแบ่งกลุ่มโดยธาตุผสมหลักด้วยตัวเลข 4 ตัวหลัง ดังตารางที่ 2.4

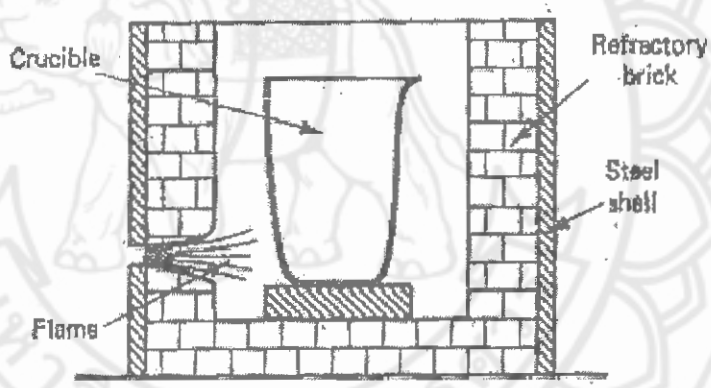
ตารางที่ 2.4 กลุ่มอะลูมิเนียมผสมหล่อ

ชนิดของอะลูมิเนียม	สัญลักษณ์
อะลูมิเนียม อย่างต่ำที่สุด 99.00% และมากกว่า	1xx.x
อะลูมิเนียมผสมที่แบ่งกลุ่มด้วยธาตุผสมหลัก	
- ทองแดง	2xx.x
- ซิลิกอน ที่เติมทองแดง และ/หรือ แมกนีเซียม	3xx.x
- ซิลิกอน	4xx.x
- แมกนีเซียม	5xx.x
- สังกะสี	6xx.x
- ดีบุก	7xx.x
- ธาตุอื่นๆ	8xx.x
ชุดที่ไม่ได้ใช้	9xx.x

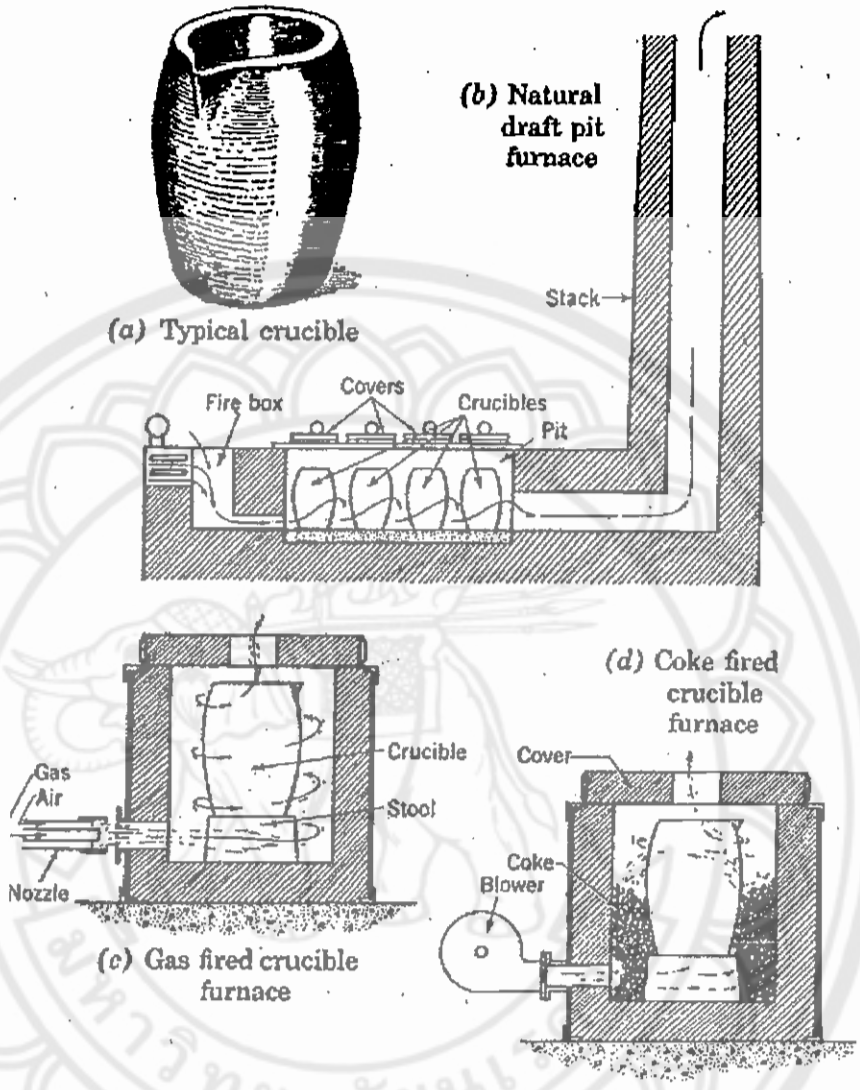
ซิลิกอนในช่วงประมาณ 5-12 % ธาตุผสมที่สำคัญที่สุดในอะลูมิเนียมผสมหล่อเพราะซิลิกอนเพิ่มความสามารถในการไหลของน้ำโลหะและความสามารถในการป้อนเข้าไปในแบบและทำให้อะลูมิเนียมแข็งแรงขึ้น แมกนีเซียมในช่วงประมาณ 0.3-1% เพิ่มความแข็งแรงจากการทำให้แข็งแรงขึ้นจากการตกตะกอนเป็นหลัก ทองแดงในช่วงประมาณ 1-4% ทำให้อะลูมิเนียมผสมหล่อแข็งแรงขึ้นโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ธาตุผสมอื่นๆ เช่น สังกะสี ดีบุก ไทเทเนียม และโครเมียม ก็มีการเติมลงในอะลูมิเนียมผสมหล่อบางชนิดด้วย

2.4 เตาหลอมโลหะ [2]

เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในกระบวนการหล่อ โดยเฉพาะเตาเบ้า(Crucible Furnace) เป็นเตาที่นิยมใช้ในการหลอมทองเหลืองและ โลหะผสมต่างๆ โดยตัวเตาจะเป็นแกรไฟท์ผสมกับดินปั้นเป็นรูปเบ้าเพื่อทนความร้อนได้ดี จะมีโครงเหล็กซึ่งมีวัสดุทนไฟครอบคลุมตัวเตาอีกชั้นหนึ่ง จะทำช่องว่างรอบเตาไว้เพื่อให้เชื้อเพลิงหรืออากาศเข้าทำปฏิกิริยาในการหลอมโลหะเชื้อเพลิงที่นิยมใช้คือ น้ำมัน แก๊ส หรือถ่านโค๊ก เมื่อได้ที่แล้วก็สามารถยกเบ้าออกจากเตาไปเทน้ำโลหะลงสู่แบบได้โดยสะดวกยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.8 ภาพตัดของเตาเบ้า



รูปที่ 2.9 ภาพเตาเบ้า

2.5 ขดลวดความร้อน [6]

พลังงานไฟฟ้าสามารถแปลงให้เป็นความร้อนได้โดยทันที โดยจะมีประสิทธิภาพ 100% พลังงานไฟฟ้าจะใช้ในการให้ความร้อนแก่โลหะ โดยใช้ความต้านทานของโลหะและใช้การเหนี่ยวนำหรือมีการถ่ายเทความร้อนจากตัวให้กำเนิดความร้อน กระแสไฟฟ้าที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นกระแสไฟสลับ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสลับสามารถแปลงได้โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้า ไม่ว่าความต่างศักย์จะมีค่าเท่าใดก็ตาม

พลังงานไฟฟ้าจะมีข้อได้เปรียบมากกว่าการให้ความร้อน โดยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าสามารถควบคุมได้อย่างถูกต้อง ไม่ต้องใช้อากาศในการเผาไหม้ สามารถ

ติดตั้งได้ทุกที่ และถ้ามีการเหนี่ยวนำและมีความต้านทานโดยตรงจะทำให้ใช้งานได้สะดวกและรวดเร็ว

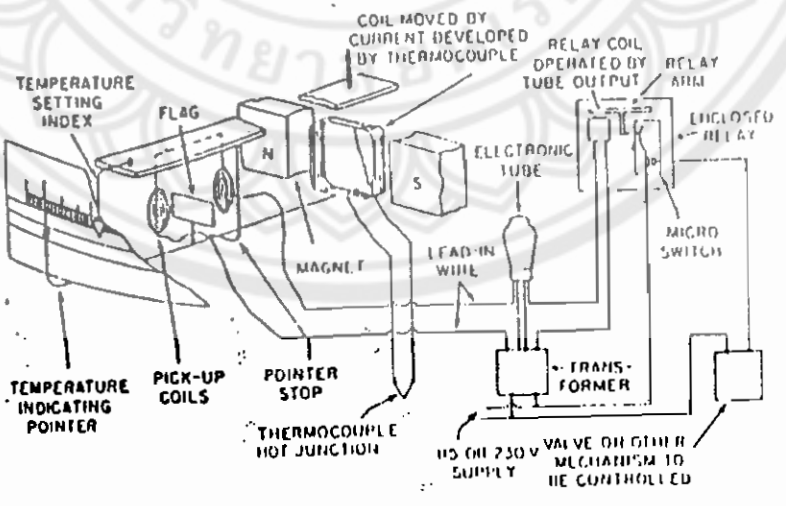
2.5.1 เครื่องมือให้ความร้อนโดยใช้ไฟฟ้า

วัสดุที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมีความร้อนเกิดขึ้น อัตราการให้กำเนิดความร้อนขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส และความต้านทานจำเพาะของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งเป็นตัวต้านทาน อุณหภูมิของตัวต้านทานขึ้นกับอัตราการให้กำเนิดความร้อน

ตัวต้านทาน วัสดุที่ให้ความร้อนจะรักษาอุณหภูมิที่ต้องการไว้ได้โดยจะต้องมีความสมดุลระหว่างพลังงานที่ใส่เข้าไปกับการกระจายของความร้อน วงจรไฟฟ้าจะติดตั้งไว้ด้านนอกของเตาเพื่อเป็นการป้องกันความร้อนที่มีมากเกินไป ส่วนตัวต้านทานซึ่งอยู่ด้านในของผนังเตาจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ หรือทำจากวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง

ตัวต้านทานที่ไม่ใช่โลหะ คือ คาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเม็ด เช่น ถ่านโค๊ก ซึ่งใช้ในการให้ความร้อนเหล็กเหนียวชนิดพิเศษ ในปัจจุบันคาร์บอนจะอยู่ในรูปซิลิกอนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นแท่งใช้เพื่อลดหรือควบคุมบรรยากาศของออกซิเจน ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการทำเป็นตัวต้านทาน ซึ่งจะมีรูปร่างต่างๆกัน เช่น เป็นแท่ง

กระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่เตาโดยใช้แมกเนติค คอนแทคเตอร์ เป็นอุปกรณ์ในการตัดไฟนั่นเอง และเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอีกครั้งหนึ่ง แมกเนติค คอนแทคเตอร์จะทำงาน ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเข้าสู่ลวดต้านทานของเตาอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 2.10 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

ตัวต้านทานที่เป็นโลหะจะสามารถทนอุณหภูมิได้ในช่วง 425°C ถึง 2240°C และในบรรยากาศของการเพิ่มและลดออกซิเจน ในการเลือกโลหะที่จะใช้เป็นตัวต้านทานจะต้องเลือกให้อุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิของเตา และเลือกวัสดุที่ทนและราคาถูก เหล็กเหนียวที่มีคาร์บอนผสมปกติจะไม่สามารถใช้ที่อุณหภูมิเกิน 425°C ได้ เว้นแต่จะมีการเกิดบรรยากาศของการลดออกซิเจน ซึ่งในกรณีนี้จะสามารถทนอุณหภูมิได้มากกว่า 650°C ความต้านทานการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นได้โดยการเติมนิเกิลและโครเมียม ส่วนผสมทางเคมีซึ่งป้องกันผิวของตัวต้านทานคือ อลูมิเนียม ในบรรยากาศที่มีการลดออกซิเจนมากๆ วัสดุที่จะใช้เป็นตัวต้านทานได้ดี คือ โมลิบดีนัม

2.5.2 **ปัจจัยในด้านการออกแบบเตาหลอมชนิดเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน**

2.5.2.1 **หลักเกณฑ์ทั่วไป**

เมื่อทำการออกแบบเตาหลอมต้องคำนึงถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ต้องการก่อน แล้วเลือกวัสดุที่จะทำลวดต้านทานให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ ในที่นี้จะได้ลวดต้านทานที่ทำจาก Kanthal และ Nikrothal เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ลวดต้านทาน Kanthal จะให้อุณหภูมิสูงสุดได้ 1375°C ซึ่งเหมาะสำหรับสร้างเตาหลอมไฟฟ้าที่ต้องการอุณหภูมิเพียง 1200°C ได้ดี ในการออกแบบลวดต้านทานจะต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับสภาพการใช้งาน เช่น อุณหภูมิที่ต้องการ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จะต้องจ่ายเข้าไป

2.5.2.2 **อุณหภูมิของเตาหลอมไฟฟ้า**

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการใช้ของวัสดุ เวลาที่จะอบ และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างตัวกำเนิดความร้อนและวัสดุ โดยทั่วไปจะให้อุณหภูมิของเตาสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการหลอมประมาณ 2-10%

ตารางที่ 2.5 แสดงขนาดและชนิดของลวดต้านทานที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกินค่าดังกล่าวแต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิสูงสุดไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของขดลวดเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเตาหลอมด้วย ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดในตารางได้จากการทดสอบในอากาศ (Operating in air)

ตารางที่ 2.5 อุณหภูมิสูงสุดของลวดแต่ละชนิดที่ขนาดต่างๆ

ชนิดของลวด	ขนาดของลวด, Ø (มม.)			
	0.15-0.4	0.41-0.95	1.0-3.0	>3.0
Kanthal A-1			1225-1350	1375
Kanthal AF	925-1050	1050-1175	1175-1300	1330
Kanthal DSD	925-1050	1025-1100	1100-1200	1280
Alkrothal	900-950	950-1000	1000-1050	1050
Nikrothal 80	925-1000	1000-1075	1075-1150	1200
Nikrothal 60	900-950	950-1075	1000-1075	1125
Nikrothal 40	900-950	950-1000	1000-1050	1100
Nikrothal 20			975-1025	1050

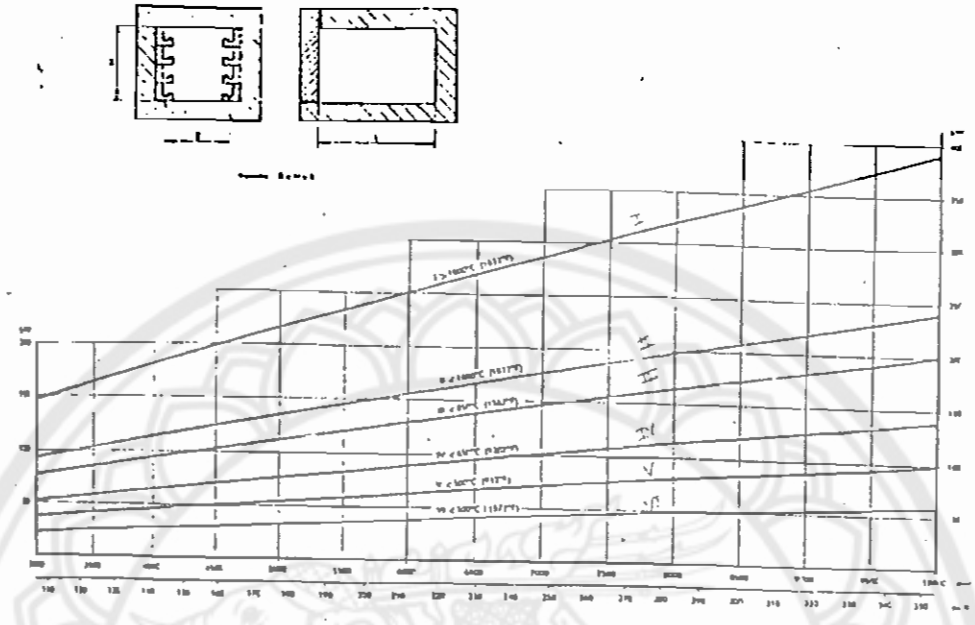
2.5.2.3 กำลังไฟฟ้า

คำนวณได้จากความร้อนที่ต้องการใช้ต่อหน่วยเวลา รวมทั้งความร้อนสูญเสีย การคำนวณค่าความร้อนที่ต้องการจะหาจากความต้องการความร้อนของวัสดุทั้งหมดในเตาพิจารณาร่วมกับประสิทธิภาพของเตาด้วย จะต้องเผื่อการสูญเสียความร้อนด้วย เพื่อให้ได้ความร้อนตามที่ต้องการทั้งหมด

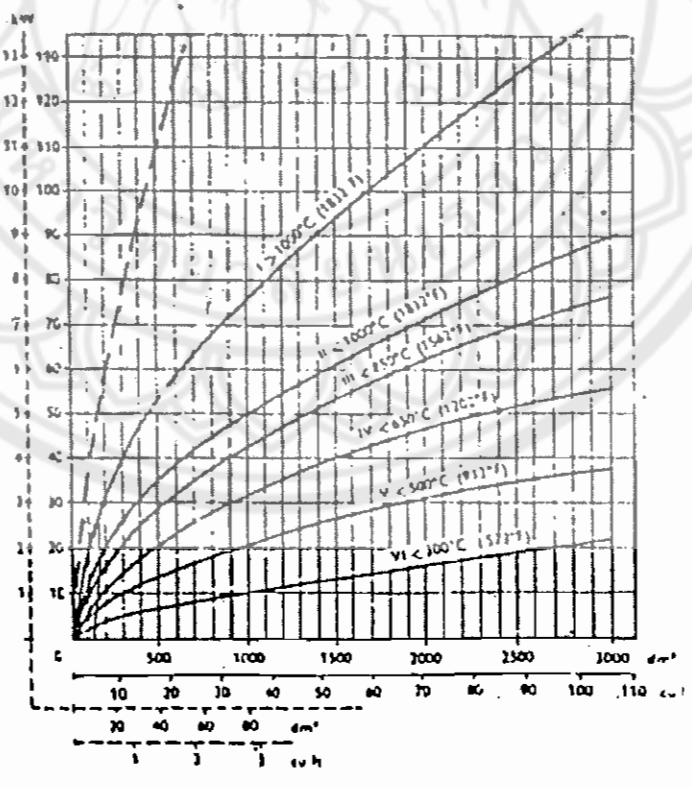
แม้ว่ากำลังไฟฟ้าจะถูกกำหนดได้ค่อนข้างสูง ซึ่งแทบจะไม่มีผลต่อพลังงานที่ได้รับจริงๆและประสิทธิภาพของเตา เพราะอุณหภูมิของเตาจะถูกกำหนดด้วยระบบอัตโนมัติ ดังนั้นพลังงานที่ป้อนเข้าที่สูงเกินไป เมื่อเทียบกับขนาดของเตาจะทำให้ตัวกำเนิดความร้อนมีอุณหภูมิสูง ซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานของลวด

จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 เส้นโค้งที่ I แสดงกำลังไฟฟ้าของเตาที่มีอุณหภูมิปานกลางจนถึงอุณหภูมิสูงตามขนาดของช่องว่างภายในเตา สำหรับเตาที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ กำลังไฟฟ้าจะลดลงประมาณ 25% จากค่าปกติ

เส้นโค้งที่ II แสดงกำลังไฟฟ้าของเตาที่ผนังทำด้วยเซรามิก ช่วงอุณหภูมิปานกลางประมาณ 1000°C เตาเซรามิกจะใช้เวลาในการให้ความร้อนมากเพราะมันไม่สามารถให้ความร้อนได้เร็ว ถ้าอุณหภูมิของเตาเซรามิกสูงขึ้น 30% เมื่อเผาเป็นชนิดเดียวกัน สำหรับเตาอบต่อเนื่องที่เป็นท่อ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 30 - 35 กิโลวัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 2.11 กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับเตาธรรมดา



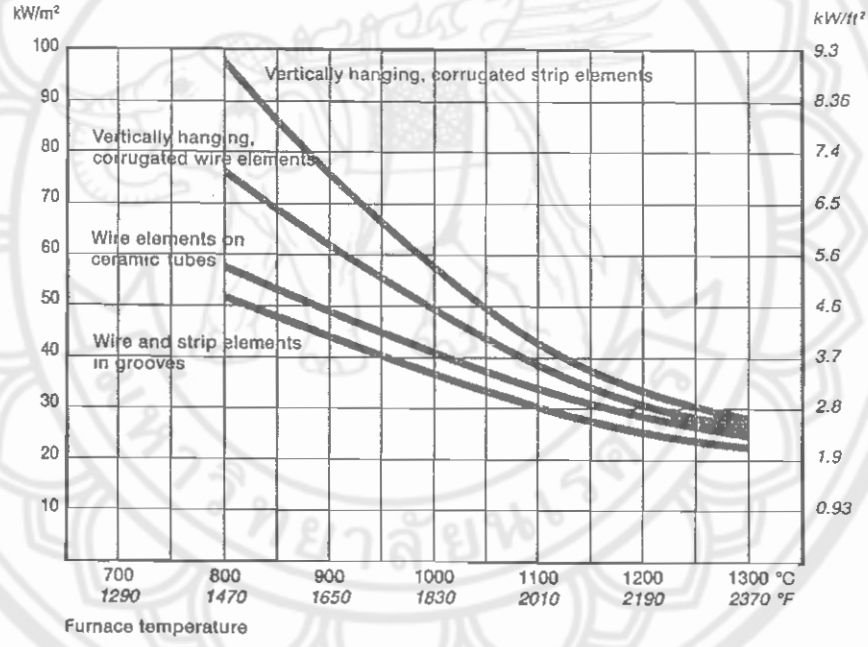
รูปที่ 2.12 กำลังไฟฟ้าของเตาที่มีฉนวนความร้อน

2.5.2.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้า

เตาหลอมไฟฟ้าอุณหภูมิสูงขนาดเล็ก ปกติจะใช้แรงเคลื่อนต่ำโดยต่อกับหม้อแปลงก่อน แต่ส่วนใหญ่จะต่อตรงได้เลย

2.5.2.5 ภาระที่ผนังเตา

ในการคำนวณหาขนาดของลวดต้านทาน จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิและพื้นที่หน้าตัดของลวดต้านทาน และจะต้องพิจารณาถึงอายุการใช้งาน ภาระที่ผนังเตา คุณสมบัติของผนัง และวัสดุที่ทำตัวต้านทาน ตลอดจนสภาพการถ่ายเทความร้อน รูปที่ 2.13 แสดงภาระที่ผนังเตากับอุณหภูมิ โดยเฉพาะเตาที่มีอุณหภูมิสูง ค่านี้จะถูกต้องยิ่งขึ้นเมื่อการกระจายความร้อนสม่ำเสมอและพื้นที่ผิวของผนังเตามาก

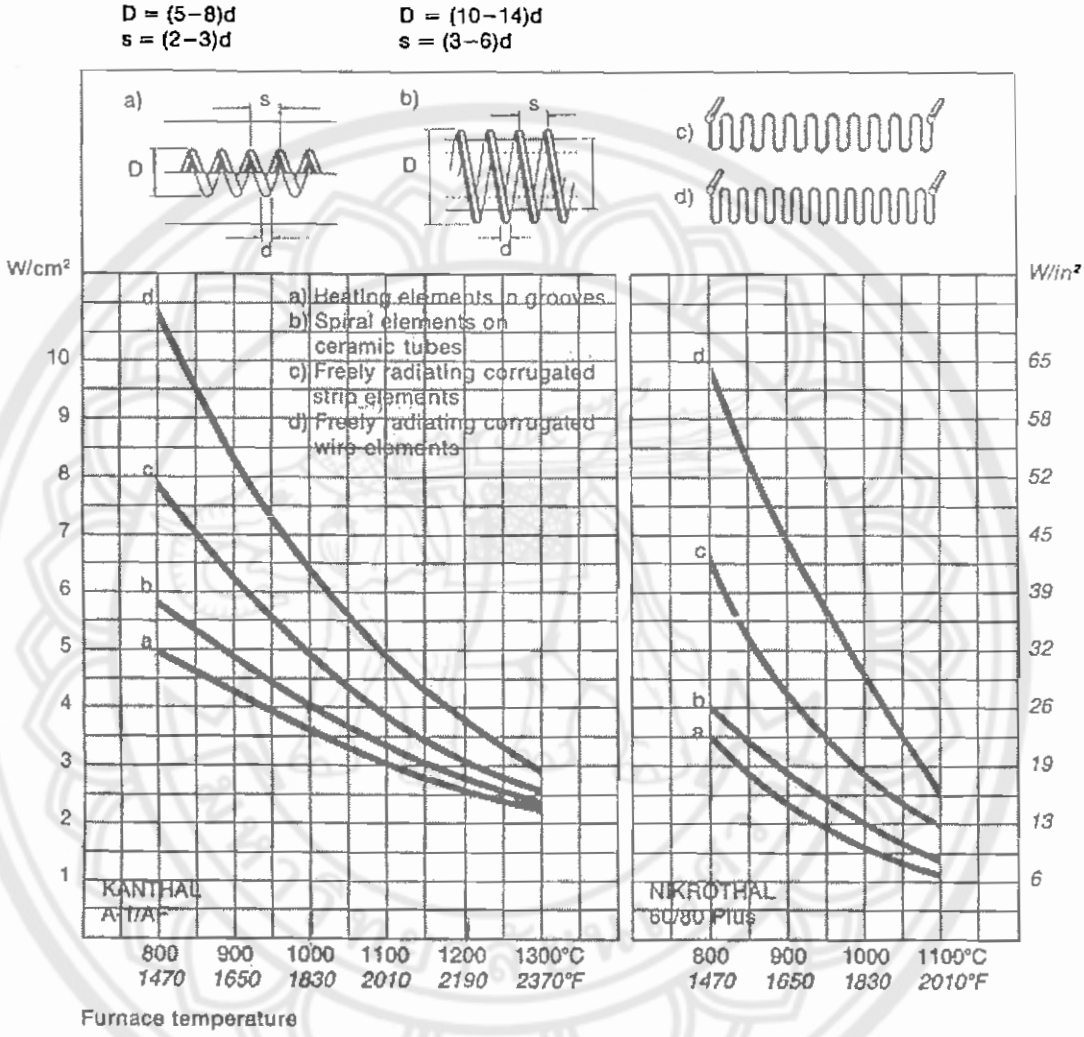


รูปที่ 2.13 ภาระที่ผนังเตา

2.5.2.6 ภาระที่ผิวของตัวต้านทาน

การเพิ่มภาระที่ผิวของตัวต้านทานจะทำให้อุณหภูมิรอบๆตัวต้านทานสูงขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิสูงสุดจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของภาระที่ผิวด้วย ภาระที่ผิวของตัวต้านทานเป็นสัดส่วนผกผันกับอุณหภูมิ หรืออาจกล่าวได้ว่า ภาระที่ผิวตรงข้ามกับปริมาณการใช้วัสดุต้านทาน คือถ้าค่าภาระที่ผิวต่ำ อายุการใช้งานของตัวต้านทานจะต่ำ จะใช้ตัวต้านทานในปริมาณที่มากกว่าเมื่อใช้ภาระที่ผิวสูงในช่วงเวลาเดียวกัน

ความสัมพันธ์ที่กล่าวนี้ไม่ชัดเจนในบางกรณี แต่สามารถประมาณอายุการใช้งานได้โดยอาศัยค่าที่ได้จากรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาระที่ผิวของโลหะผสมแคนธอลและโลหะผสมนิโครธอล

2.5.2.7 **รูปร่างของตัวต้านทาน**

โดยทั่วไปรูปร่างของตัวต้านทานจะมี 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ เป็นเส้นลวดและเป็นแผ่น ความแข็งแรงของตัวต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การออกแบบความหนาของแผ่นต้านทาน และเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดต้านทานจะต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะแบบแผ่นจะต้องแน่ใจได้ว่าจะไม่บิดเบี้ยวเมื่อร้อน ขนาดที่ออกแบบมีผลต่ออายุการใช้

ป TN
674
ก124ท
2547

4840133

สำนักหอสมุด

งานซึ่งต้องพิจารณาจากอุณหภูมิที่ต้องการ แผ่นต้านทานจะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าขดลวดต้านทาน

15 ก.ค. 2548

ตัวต้านทานที่มีพื้นที่หน้าตัดอยู่จะยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านน้อย ซึ่งควรเลือกตัวต้านทานที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยเมื่อสภาพต่างๆเท่ากัน ตัวต้านทานที่มีพื้นที่หน้าตัดมากจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงซึ่งควรแยกต่อเป็นแบบขนาน 2 ชุด (ลวดความต้านทาน) สำหรับไฟฟ้า 3 เฟส กระแสสลับ การต่อแบบวายเหมาะสำหรับเตาที่มีโหลดต่ำทุกๆพื้นที่หน้าตัด ในขณะที่การต่อแบบสตาร์เหมาะสำหรับการต่อตัวต้านทานที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจะมีความทนทานสูง

2.5.3 ปัจจัยในการออกแบบทางด้านความร้อน ไฟฟ้า และอายุการใช้งาน

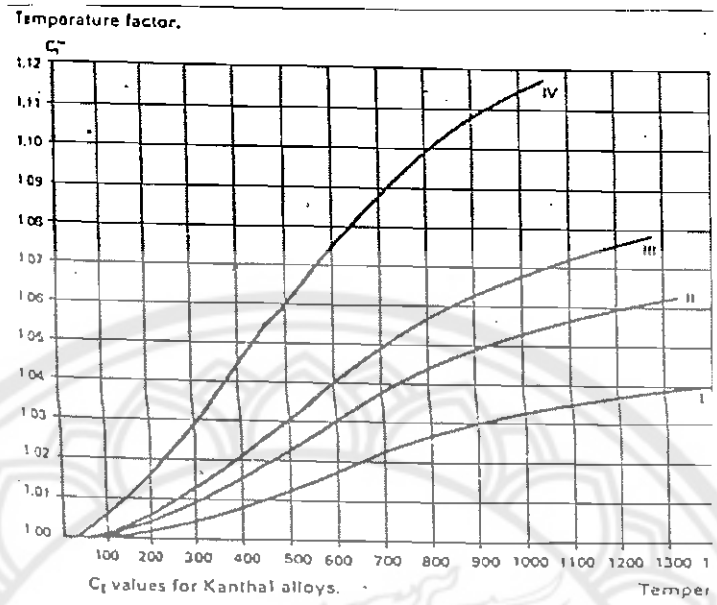
2.5.3.1 อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้กับส่วนกำเนิดความร้อน

ตารางที่ 2.5 แสดงขนาดและชนิดของขดลวดต้านทานที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกินค่าดังกล่าวแต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิสูงสุดไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของขดลวดเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานของเตาหลอมด้วย ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดในตารางได้จากการทดสอบในอากาศ (Operating in air)

2.5.3.2 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับอุณหภูมิ

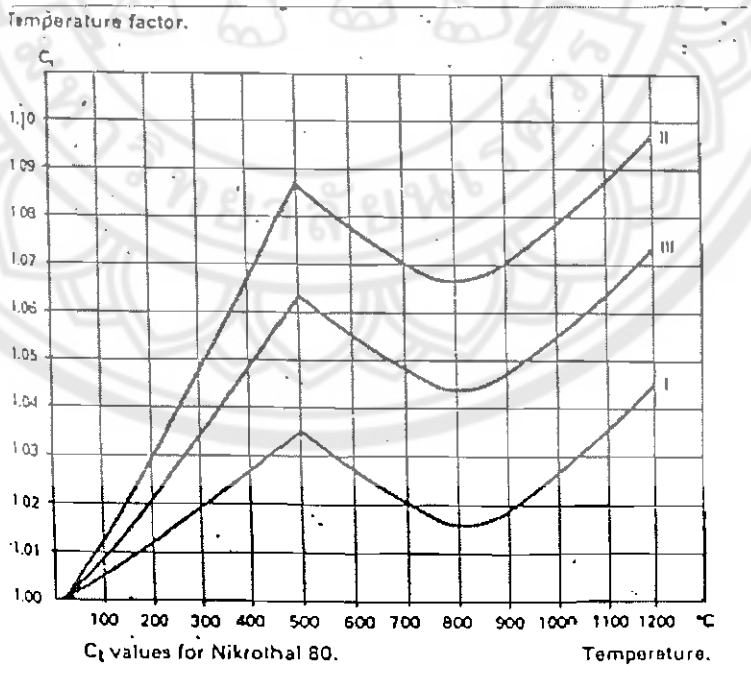
การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อัตราการเย็นตัวของตัวกำเนิดความร้อนหลังจากการให้ความร้อนจะมีผลอย่างมาก การคำนวณค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆหาได้จากการคูณความต้านทานที่อุณหภูมิห้องกับแฟคเตอร์ (C_t)

สำหรับวัสดุชนิดแคนธอล ผลของการเย็นตัวมีผลน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา สภาพความต้านทานของแคนธอลขึ้นอยู่กับปริมาณของอลูมิเนียมที่ผสมอยู่ การใช้งานนานๆที่อุณหภูมิสูงๆจะทำให้ปริมาณอลูมิเนียมลดลง ซึ่งทำให้สภาพความต้านทานที่อุณหภูมิห้องลดลง อย่างไรก็ตามสภาพความต้านทานที่อุณหภูมิใช้งานเกือบคงที่ การเพิ่มสภาพความต้านทานด้วยปัจจัย (C_t) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ที่ได้จากการทดลอง

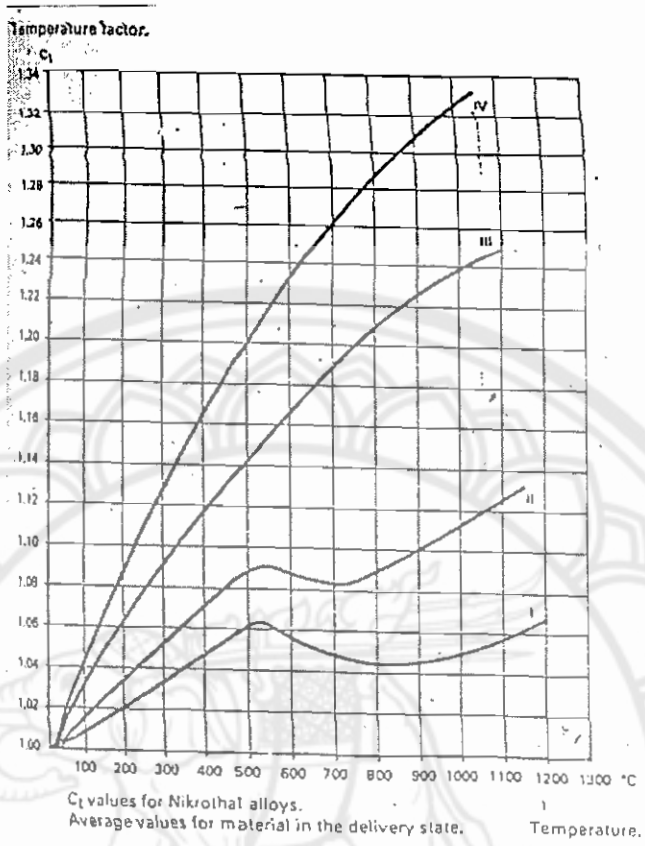


รูปที่ 2.15 ปัจจัยอุณหภูมิ (C_t) ของโลหะผสมแคนธอล

สำหรับวัสดุชนิดนิโครธอล ซึ่งมีส่วนผสมของนิเกิลสูง อัตราการเย็นตัวจะมีผลต่อสภาพความต้านทานอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องพิจารณาทั้งปริมาณของนิเกิลที่ผสม และอัตราการเย็นตัว ดังรูปที่ 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2.16 ปัจจัยอุณหภูมิของลวดนิโครธอล 80



รูปที่ 2.17 ปัจจัยอุณหภูมิของโลหะผสมนิโครธอล

2.5.3.3 **อายุการใช้งานของตัวต้านทาน**

อายุการใช้งานของตัวต้านทานขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งาน เช่น ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ ภาระที่ผิว ความถี่ของรอบการทำงานและการออกแบบตัวกำเนิดความร้อน

2.5.4 การออกแบบขดลวด

2.5.4.1 การหาเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสามารถหาได้ 3 วิธี

ก) ใช้สมการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดที่เหมาะสมคือ

$$d = \sqrt[3]{\frac{p.4.p}{p.10.\pi^2 R_t}} = \frac{1}{2.91}\sqrt[3]{(\frac{P}{V^2}).\rho.\frac{C_t}{P}} \qquad (2.1)$$

ข) การคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดโดยวิธีลัด

ขนาดลวดสามารถคำนวณได้โดยอาศัยพื้นที่ผิวของตัวต้านทานที่สภาพปกติ ค่า cm^2/Ω แสดงไว้ดังตารางที่ 2.6 ตามพื้นที่หน้าตัด

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของลวด KANTHAL A-1

Wire mm 12.0-1.0 mm Ø

Resistivity, $\Omega mm^2 m^{-1}$ 1.45

Density, g cm^{-3} 7.1

$$cm^2/\Omega = \frac{I^2 C_t}{P}$$

I = Current

C_t = Temperature factor

P = Surface load W cm^2

To obtain resistivity at working temperature multiply by the factor C_t in the following table :

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
C_t	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05

Diameter mm.	Resistance Ω/m 20 °C	cm^2/Ω 20°C	Weight g/m	Surface area cm^2/m	Cross Sectional Area mm^2
12.0	0.0128	29400	803	377	113
10.0	0.0185	17000	558	314	78.5
9.5	0.0205	14600	503	298	70.9
8.25	0.0271	9560	380	259	53.5
8.0	0.0288	8710	357	251	50.3
7.5	0.0328	7180	314	236	44.2
7.0	0.0377	5840	273	220	38.5
6.5	0.0437	4670	236	204	33.2
6.0	0.0513	3680	201	188	28.3
5.5	0.0610	2830	169	173	23.8
5.0	0.0738	2130	139	157	19.6
4.75	0.0818	1820	126	149	17.7
4.5	0.0912	1550	113	141	15.9
1.25	0.102	1310	101	134	14.2
4.0	0.115	1090	89.2	126	12.6
3.75	0.131	897	78.4	118	11.0
3.5	0.151	730	68.3	110	9.62
3.25	0.175	584	58.9	102	8.30
3.0	0.205	459	50.2	94.2	7.07
2.75	0.244	354	42.2	86.4	5.94

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) คุณสมบัติของลวด KANTHAL A-1

Diameter mm.	Resistance Ω/m 20 °C	Cm^2/Ω 20°C	Weight g/m	Surface area Cm^2/m	Cross Sectional Area mm^2
2.5	0.295	266	34.9	78.5	4.91
2.25	0.365	194	28.2	70.7	3.98
2.0	0.462	136	22.3	62.8	3.14
1.8	0.570	99.2	18.1	56.5	2.54
1.7	0.639	83.6	16.1	53.4	2.27
1.6	0.721	69.7	14.3	50.3	2.01
1.5	0.821	57.4	12.5	47.1	1.77
1.4	0.942	46.7	10.9	44.0	1.54
1.3	1.09	37.4	9.42	40.8	1.33
1.2	1.28	29.4	8.03	37.7	1.13
1.1	1.53	22.6	6.75	34.6	0.950
1.0	1.85	17.0	5.58	31.4	0.785

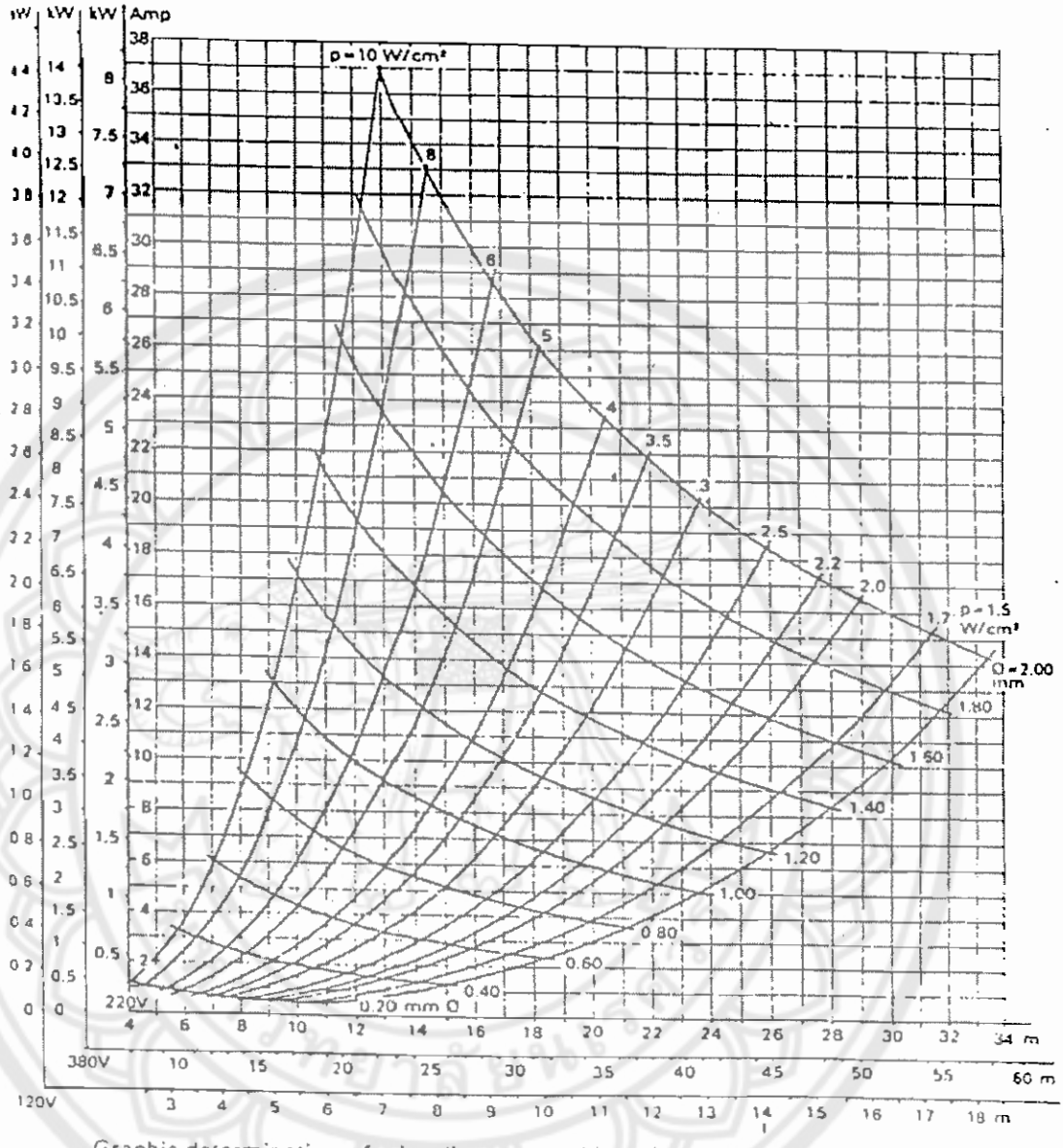
ข้อมูลที่มี คือ อุณหภูมิของลวด ภาระที่ผิว ค่า ซม.^{2}/โอห์ม ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$cm^2/\Omega = I^2 . \frac{C_t}{R} = \frac{p.C_t}{p.R_t} \qquad (2.2)$$

เมื่อทราบค่า cm^2/Ω ก็สามารถหาเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดได้จากตารางที่ 2.7 จะเห็นว่าขนาดของลวดที่เหมาะสมได้จากการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจากการทำงานจริง คือ ค่ากำลังไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า C_t หรือ R_t

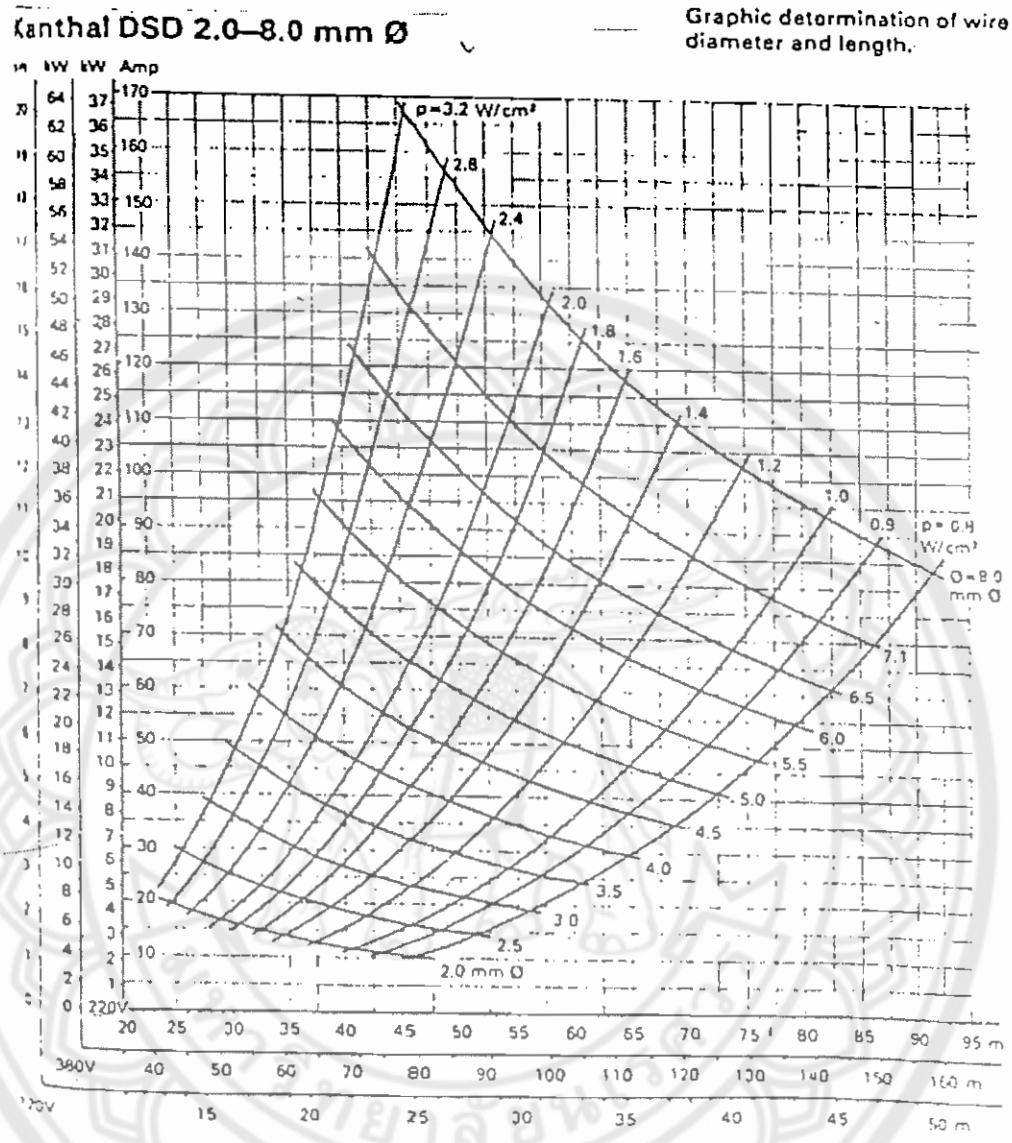
ค) การหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลวดโดยใช้กราฟ

ไดอะแกรมสำหรับการหาขนาดของลวดหรือใช้ตรวจสอบเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.18 และ 2.19



Graphic determination of wire diameter and length.

รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาว



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางของลวด Kanthal DSD เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0-8.0 มิลลิเมตร

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับภาระที่ผิวไม่สามารถกำหนดเป็นไดอะแกรมได้ทุกสภาวะ อย่างไรก็ตาม ถ้ามีข้อมูลการทำงานก็สามารถหาขนาดของลวดได้โดยไดอะแกรมของแคนธอลและนิโครธอลได้ โดยแต่ละไดอะแกรมมีเงื่อนไขดังนี้

ก) สำหรับอุณหภูมิสูงกว่า 1000°C ขนาดอยู่ในช่วง 2.0-8.0 มิลลิเมตร

ข) สำหรับอุณหภูมิต่ำกว่า 1000°C ขนาดอยู่ในช่วง 0.2-2.0 มิลลิเมตร

ในทางปฏิบัติขนาดลวดดังกล่าวจะให้ค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ต้องการได้ สำหรับลวดเบอร์อื่นๆนอกจากแคนธอล DSD หรือนิโครธอล 80 จะต้องใช้แฟคเตอร์ (C_t) คูณเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

ตารางที่ 2.7 ตัวคูณเพื่อปรับค่าความยาวและภาระผิว

Grade	Correction facter for :		Max. errror
	Wire length	Surface lode	
Kanthal A-1	0.96	1.04	> 1000°C - 3% <1000°C - 7%
Kanthal AF	0.98	1.02	> 1000°C - 1% < 1000°C - 7%
Kanthal DSD	1.00	1.00	> 1000°C + 1% < 1000°C - 7%
Nikrothal 80	1.00	1.00	> 1000°C + 2% < 1000°C - 5 %
Nikrothal 60	0.98	1.02	> 1000°C + 8% < 1000°C + 6% - 5%

2.5.4.2 **การหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดลวด**

ก) แคนธอลผสม

กำหนดอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (D) กับเส้นผ่าศูนย์กลางของลวด (d)

- สำหรับในอุตสาหกรรม

  อุณหภูมิน้อยกว่า 1000°C D/d = 6-8

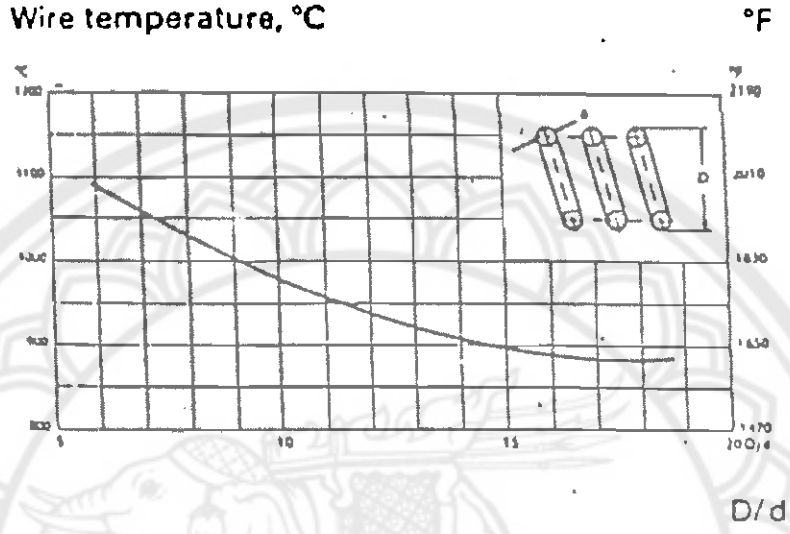
  อุณหภูมิมากกว่า 1000°C D/d = 5-6

- สำหรับเตาไฟฟ้าทั่วๆไป

  D/d = 4-10

อัตราส่วน D/d ที่น้อยจะทำให้เกิดการยืดตัวของลวดสูง แต่ถ้าอัตราส่วน D/d มากจะทำให้ขดลวดไม่แข็งแรง ในความเป็นจริงอัตราส่วน D/d มีความสัมพันธ์กับ

อุณหภูมิการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 แต่ก็สามารถประมาณได้เป็นช่วงดังแสดงไว้ข้างต้น ซึ่งกราฟนี้ใช้ได้ทั้งในอุตสาหกรรมเตาหลอมและเตาไฟฟ้าทั่วๆไป



รูปที่ 2.20 อัตราส่วน D/d

ข) นิโครธอลผสม

กำหนดอัตราส่วนไว้ดังนี้

- สำหรับในอุตสาหกรรม

อุณหภูมิน้อยกว่า 1000°C D/d = 6-9

อุณหภูมิมากกว่า 1000°C D/d = 5-6

- สำหรับเตาไฟฟ้าทั่วๆไป

D/d = 4-12

สำหรับสูตรการหาจำนวนขดลวด เมื่อทราบความยาว

จำนวนขดลวด $$w = \frac{1000}{\pi(D-d)} \qquad (2.3)$$

ความยาวขดลวด $$L_w = w \times d \qquad (2.4)$$

เพื่อให้ระยะพิทช์ (S) สม่ำเสมอ ได้กำหนดอัตราส่วนดังนี้

อัตราส่วน S/d = 2-4

ความยาวเมื่อยืด $$L = \frac{S}{d \times L_w} \quad (2.5)$$

2.6 **วัตถุทนไฟ** (Refractory materials) [1]

วัตถุทนไฟ (Refractory materials) หมายถึง วัตถุเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีความสามารถทนทานต่อความร้อน (Refractoriness) ได้สูงกว่าอุณหภูมิ 1,500°C วัตถุชนิดนี้จึงมีอุณหภูมิจุดอ่อนตัว (Softening point) และจุดหลอมตัว (Melting point) สูง และยังสามารถทนทานยืนตัวอยู่ในสภาพอุณหภูมิสูงได้และยาวนานโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุ ความทนทานต่อความร้อนโดยตรงของวัตถุทนไฟยังมีสมบัติถึงความทนทานต่อความร้อนที่วัตถุถูกกระทำในขณะนั้นๆ อาทิเช่น

- ทนต่ออิทธิพลเนื่องจากการกดทับที่อุณหภูมิสูง (Thermal loading)
- ทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical attack) จากสารหลอมละลาย (Slags) หรือจากไอบรรยากาศภายในเตา (Furnace atmosphere)
- ทนต่อการสึกกร่อนเนื่องจากการเสียดสี (Abrasion resistance)
- ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหัน (Thermal shock)
- ทนต่อการแตกเสียหายเนื่องด้วยวัตถุถูกความร้อนมีการยืดขยายตัวและหดตัว (Thermal spalling)
- ทนได้ถึงแม้วัตถุจะขยายตัวด้วยความร้อน (Thermal expansion) ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องด้วยการยืดตัวและหดตัว(Elastic and plastic deformation) และการนำความร้อนได้ต่ำหรือสูง (Low or high thermal conductivity) เป็นต้น

2.6.1 **ประโยชน์ใช้งานวัตถุทนไฟ**

ประโยชน์ที่เห็นได้ชัดของการใช้วัตถุทนไฟ คือ การนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในงานที่เกี่ยวกับทนความร้อนหรือทนไฟ (Constructional refractories) เช่น อิฐทนไฟ (Refractory bricks) วัสดุบุผนัง (liners) ในเตาหรืออุปกรณ์และเครื่องมือทนความร้อนต่างๆ เตาแต่ละชนิดที่มีชื่อเรียกว่า Kilns, Muffles, Furnaces, Ovens และ Stoves จะถูกสร้างด้วยอิฐทนไฟและชิ้นส่วนวัตถุทนไฟที่ใช้งานทนความร้อนได้ตั้งแต่ 400-500°C และสามารถใช้งานอุณหภูมิสูงถึง 2,000°C หรือมากกว่าสำหรับเตาไฟสูง วัตถุทนไฟบางชนิดมีความมุ่งหมายให้ใช้งานได้ดีสำหรับการเป็น

ฉนวนความร้อนและเป็นฉนวนทนไฟ (Thermal or refractory insulations) เช่น วัสดุฉนวนที่ทนความร้อนตรงผิวสัมผัสเปลวไฟ (Hot face insulations) และการใช้ช่วยป้องกันความร้อนเสริมชั้นนอก (Back-up insulation) ซึ่งปัจจุบันมักนิยมใช้เส้นใยเซรามิก (Ceramic fibers) มากขึ้น อุปกรณ์ต่างๆภายในเตา (Kiln furnitures) เช่น แผ่นรอง ขาตั้งสำหรับวางผลิตภัณฑ์เผาในเตา จำเป็นต้องใช้วัสดุทนไฟ นอกจากนี้ประโยชน์ใช้งานของวัตถุทนไฟยังแพร่หลาย ใช้ทำอุปกรณ์เครื่องมืออื่นๆที่ต้องทำงานในอุณหภูมิสูงๆ เช่น เบ้าหลอม (Crucibles) อุปกรณ์การตัด (Cutting tools) เครื่องปฏิกรณ์ทางเคมี (Chemical reactors) ทางปรมาณู (Atomic reactors) การบุผนังตุ๊กตา (Bearing liners) และชิ้นส่วนอุปกรณ์ทนความร้อนสูงสำหรับ Aircraft jet engines, Jet nozzles, Heating elements, Pyrometric tubes และอื่นๆอีกมากมาย

การใช้วัตถุทนไฟมีปริมาณมากสำหรับงานอุตสาหกรรม ปริมาณการใช้ยังคงต้องป้อนเข้าโรงงานทุกๆวัน เพราะได้ใช้วัตถุทนไฟในลักษณะที่อาจเรียกว่าเป็นวัสดุสิ้นเปลือง เช่น โรงงานอุตสาหกรรมเหล็กที่ใช้วัตถุทนไฟเป็นอุปกรณ์การหล่อเหล็กที่หลอมแล้วให้เป็นวัตถุแข็งที่มีรูปร่างเป็นแท่งหรือก้อน ด้วยเบ้าหรือชิ้นงานวัตถุทนไฟเรียกว่า Runner bricks จากนั้นจึงต้องทุบทำลายเบ้าให้แตกออกไปเพื่อต้องการแท่งเหล็กนำไปเข้ากระบวนการทำเป็นเส้นหรือแผ่นผลิตต่อไป โรงงานเหล็กและเหล็กกล้าจึงต้องใช้วัตถุทนไฟมากเช่นนี้เป็นต้น และความสำคัญของโรงงานทุกประเภทต่างก็ยังมีเตาเผาหรือเตาหลอม และเตาอย่างใดอย่างหนึ่งสำหรับงานการผลิตที่ต้องใช้วัตถุทนไฟ หรือวัตถุทนไฟเป็นชิ้นส่วนการสร้างเตาและอุปกรณ์เครื่องมือเหล่านั้น อุตสาหกรรมที่ใช้วัตถุทนไฟเกี่ยวข้องมากๆ ได้แก่

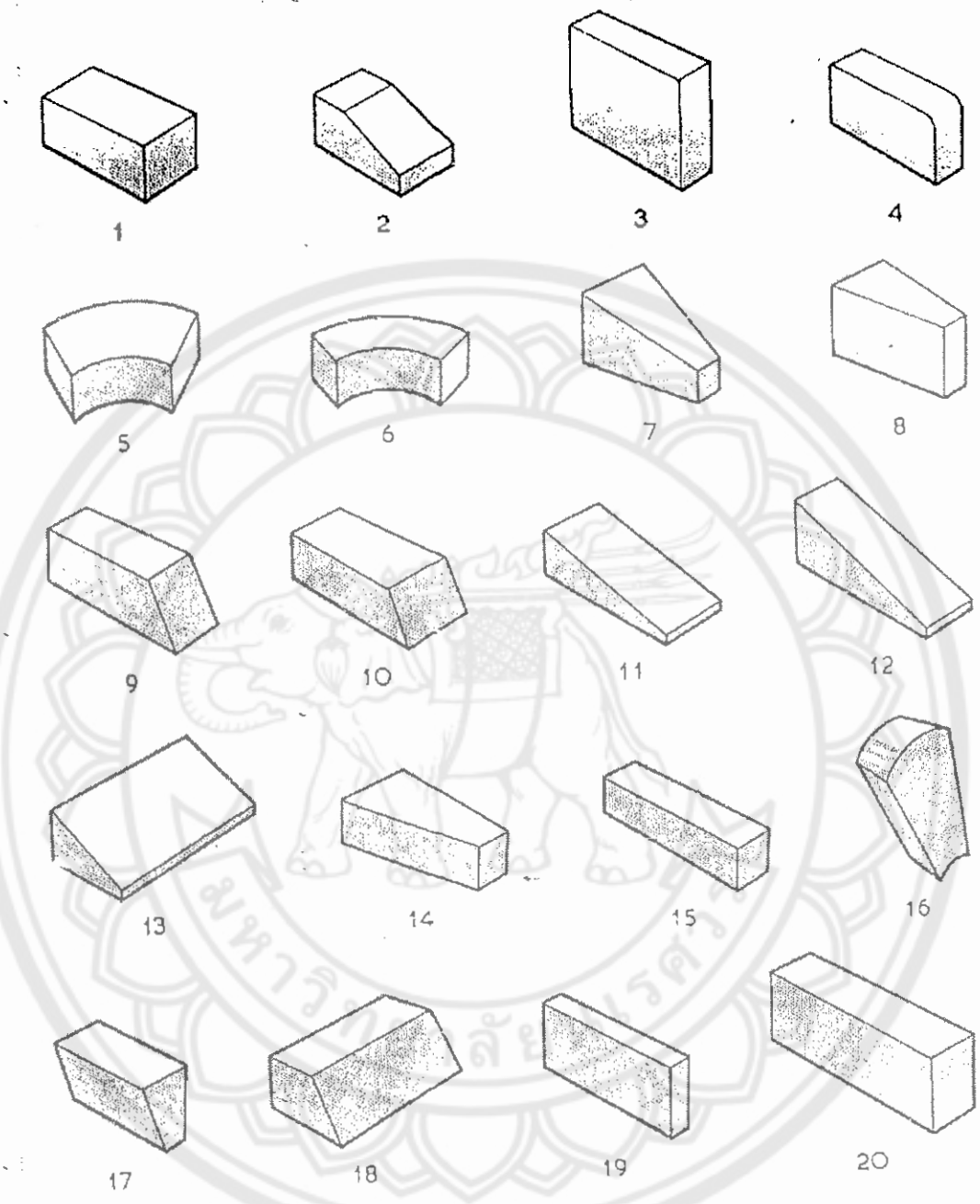
- อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า (Iron and steel)
- อุตสาหกรรมโลหะอย่างอื่นที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous metals)
- อุตสาหกรรมแก้ว (Glass)
- การผลิตแก๊ส (Gas)
- เครื่องกำลังผลิตไอน้ำ (Steam power)
- เซรามิก (Ceramics)
- เครื่องกำลังนำส่งแก๊สและไอร้อนกำลังสูง (Gas and jet turbines)
- การผลิตกำลังนิวเคลียร์ (Nuclear power)
- อุตสาหกรรมซีเมนต์และการผลิตปูนขาว (Cement and lime)
- เตาเผาขยะหรือเตาเผากำจัดของเสีย (Incinerators)
- โรงงานกระดาษ (Paper mills)

- การผลิตวัสดุเคลือบ (Enamelling)
- ระบบให้ความร้อนต่างๆใช้ในครัวเรือน (Domestic heating)

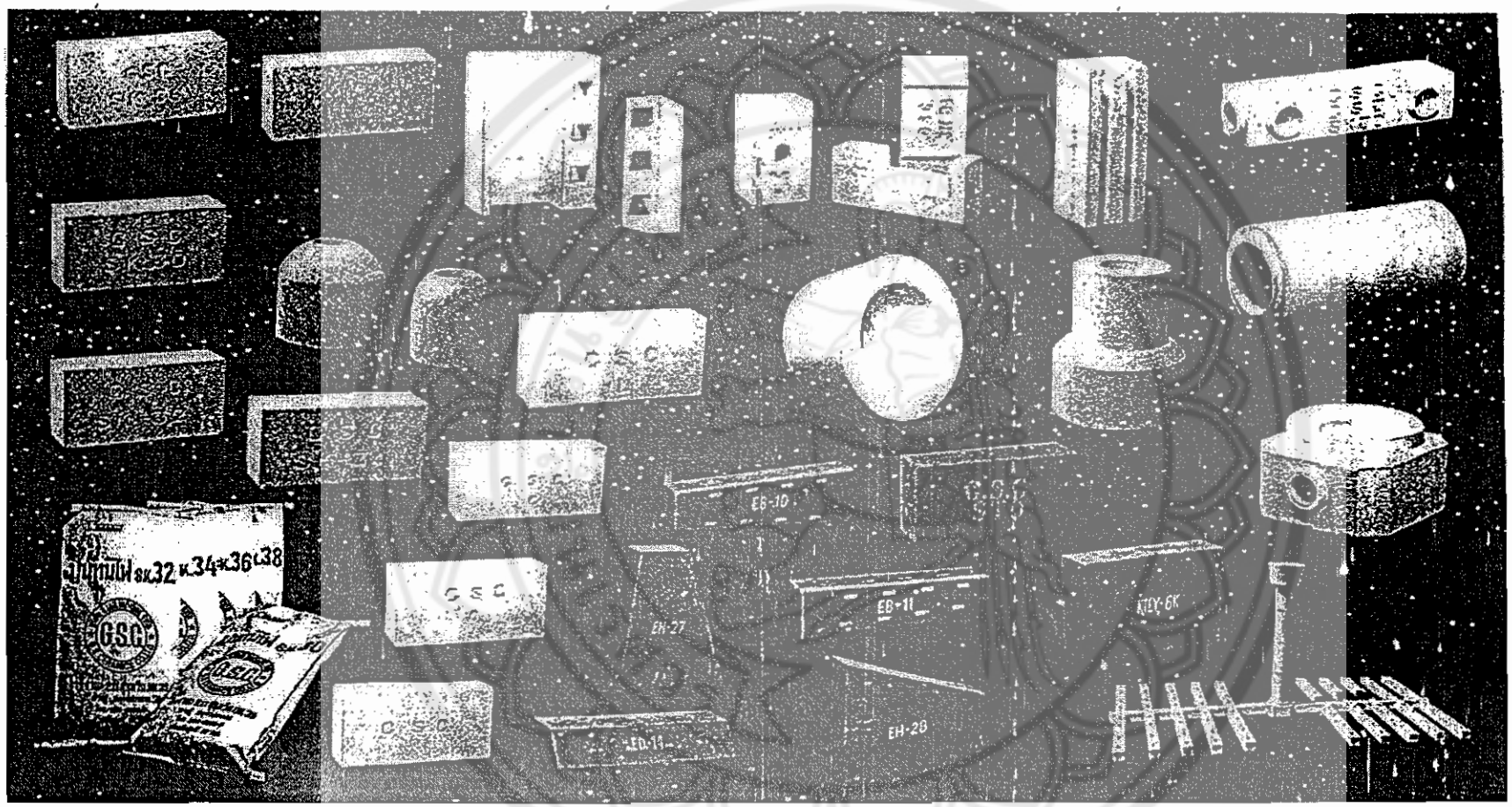
2.6.2 ชนิดของวัตถุทนไฟ

2.6.2.1 อิฐทนไฟ (Bricks)

อิฐทนไฟมีหลายชนิด มีรูปร่าง ขนาด และการเรียกชื่อต่างๆกัน จนได้กำหนดมาตรฐานสากลของอิฐทนไฟ (Standard brick) ออกมาใช้งานเพื่อสะดวกต่อการออกแบบก่อสร้างในงานนั้นๆ เมื่องานออกแบบก่อสร้างเครื่องมือหรืออุปกรณ์ใดๆก็มักจะนึกถึงอิฐที่จะนำมาใช้โดยสามารถจัดหาชนิดและขนาดของอิฐที่เป็น อิฐตรง (Straight brick) อิฐกลีบส้ม (Arch brick) อิฐลิ่ม (Key brick) และรูปร่างอื่นๆดังแสดงในรูปที่ 2.21 และยังมีอิฐที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นแผ่นบุผนัง (Liners) ในเตาหรืออุปกรณ์เครื่องมือทนความร้อน เรียก Liner bricks ตลอดจนเป็นอิฐทรงท่อกลาง หรือทำเป็นท่อนำส่งเหล็กหลอมเหลวป้อนสู่แบบพิมพ์ เรียก Runner bricks เป็นต้น นอกจากนี้การเรียกชื่ออิฐอาจเรียกตามเนื้อวัตถุทนไฟ (Refractory materials) เช่น อิฐซิลิกา (Silica brick) อิฐดินทนไฟ (Fire-clay brick) อิฐอลูมินา (Alumina brick) และอื่นๆอีกของเนื้อวัตถุชนิดเซอโคเนีย แมกนีเซีย โครไมท์ ฯลฯ ดังแสดงในรูปที่ 2.22



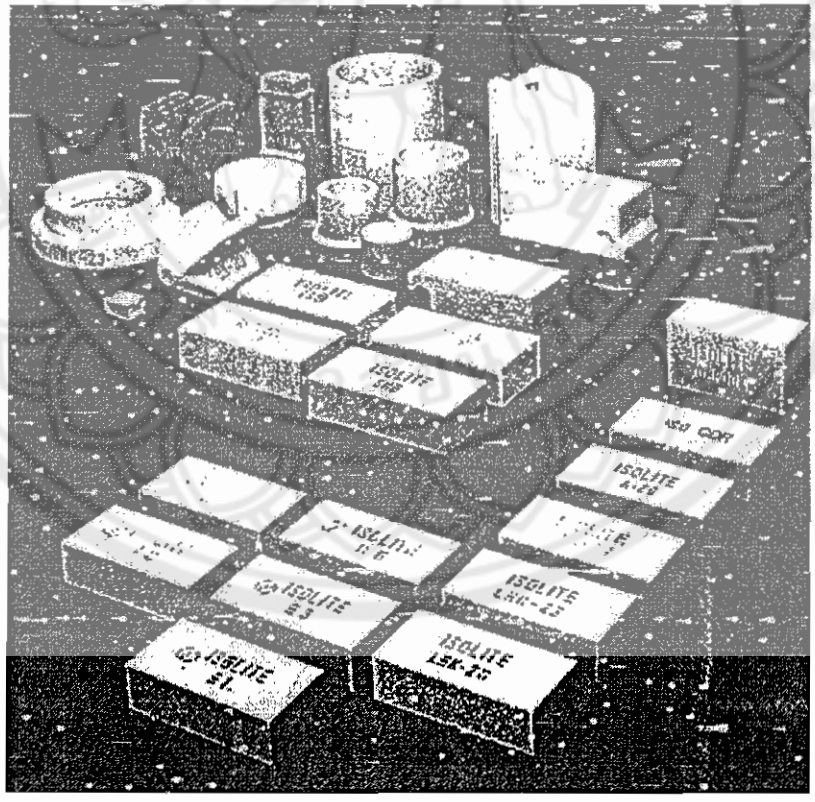
รูปที่ 2.21 รูปร่างและขนาดอิฐทนไฟชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.22 อิฐทนไฟชนิดต่างๆ

2.6.2.2 **วัสดุทนไฟฉนวนความร้อน** (Insulating refractories)

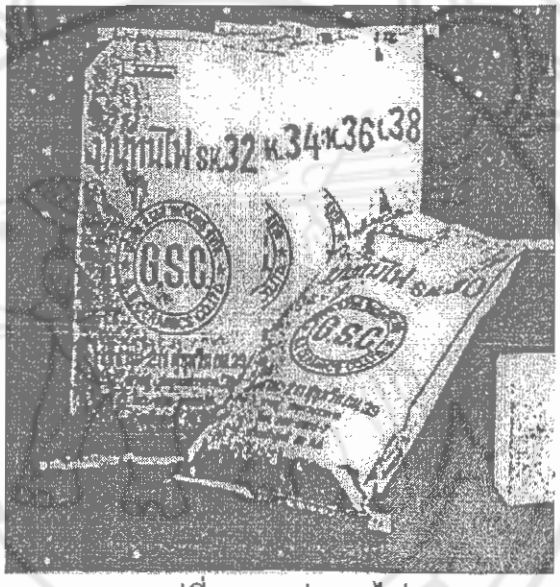
วัสดุทนไฟชนิดนี้มีความสามารถกักกั้นความร้อนโดยไม่อมความร้อนภายในตัวเนื้อวัตถุ จึงมีน้ำหนักเบามากเนื่องจากเนื้อวัตถุมีความพรุนตัวสูง เนื้อวัตถุชนิดนี้อาจทำเป็นอิฐ เรียกว่า อิฐฉนวน (Insulation bricks) หรือ อิฐเบา (Light-weight bricks) มักใช้ในงานก่อสร้างเตา และอื่นๆที่มุ่งหมายเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนสูญหายจากเตา ปัจจุบันผู้ใช้วัสดุฉนวนความร้อนนิยมใช้ไฟเบอร์ทนไฟ (Refractory fibers) มีลักษณะเป็นเส้นใยเซรามิก (Ceramic fibers) ที่ทำมาจากเนื้อวัตถุทนไฟชนิดอลูมิโนซิลิเกตประเภทมัลไลท์ (Mulite) เนื้ออลูมินาสูง (High alumina) เนื้อเซอคอนและเซอโคเนีย (Zircon and Zirconia) ความเป็นเส้นใยจึงสามารถนำมาทำใช้งานได้สะดวก โดยทำเป็นก้อน (Bulk หรือ Block) เป็นผืน (Blanket) เป็นเชือก (Rope) เป็นแผ่น (Board) และอื่นๆอีกมากมาย เส้นใยเซรามิกสามารถใช้เป็นวัสดุฉนวนความร้อนที่ถูกสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง หรืออาจใช้ทำเป็นผนังกันความร้อนผิวชั้นนอก (Back-up insulation) ก็ยิ่งให้ผลดีต่อการกักกั้นความร้อนภายในเตา



รูปที่ 2.23 อิฐฉนวนทนไฟ (Insulating firebrick)

2.6.2.3 **ปูนทนไฟ** (Mortars)

วัตถุทนไฟชนิดนี้ได้มาจากการบดเนื้อวัตถุทนไฟให้ละเอียดผสมกับวัตถุที่มีความเหนียว (Plasticizers) เมื่อผสมกับน้ำจะก่อให้เกิดเนื้อเหนียวนำไปใช้ฉาบบางๆระหว่างพื้นที่ผิวก้อนอิฐทำการก่องานอิฐ (Brick work) ปูนทนไฟจะแนะนำผู้ใช้ให้เลือกชนิดปูนทนไฟชนิดเดียวกับอิฐนั้นๆ เพื่อจะไม่ให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีในที่อุณหภูมิสูง ดังเช่นการเลือกใช้ปูนทนไฟชนิดด่าง (Basic mortar) ควบคู่กับอิฐชนิดด่าง (Basic bricks) ด้วยเหมือนกัน

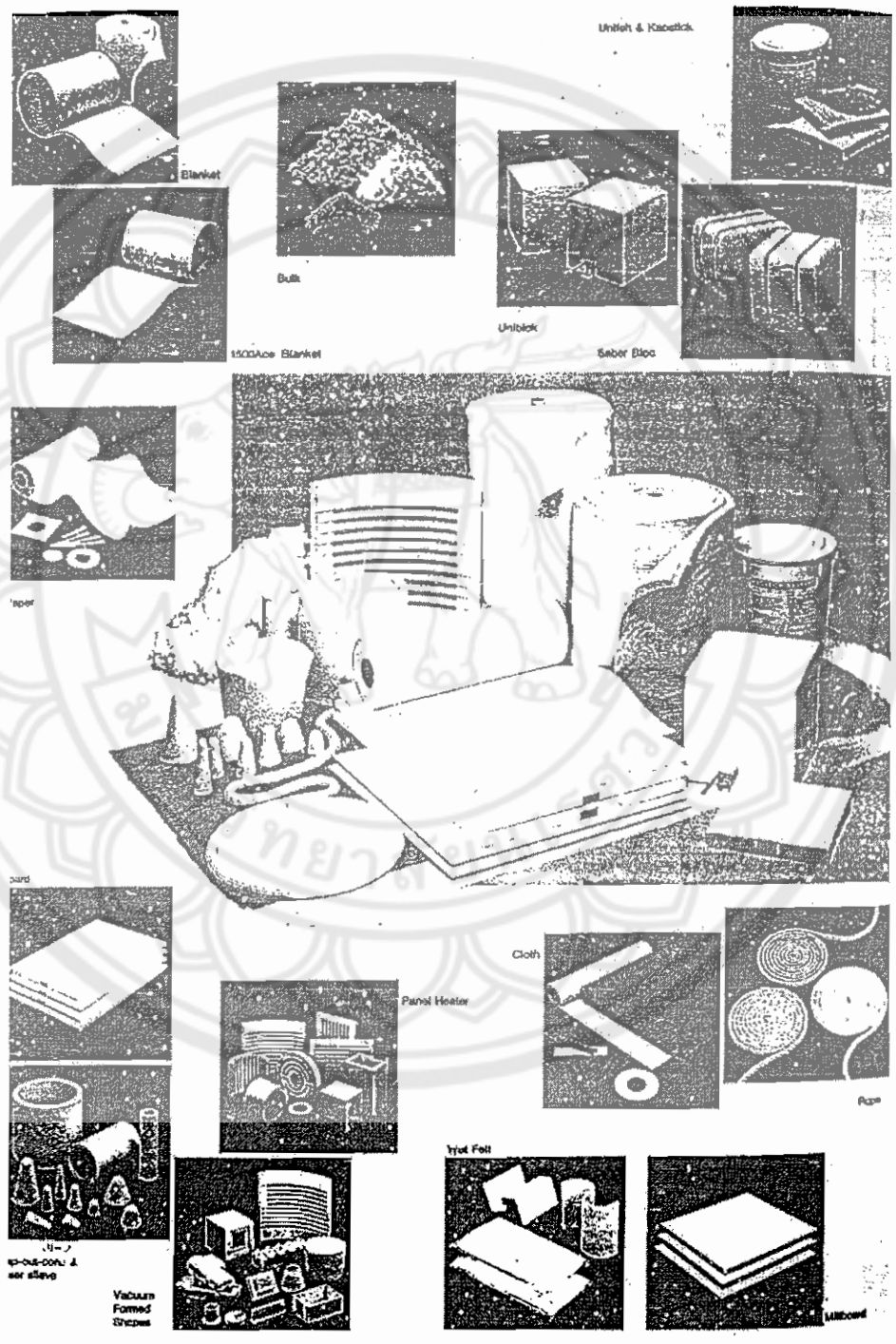


รูปที่ 2.24 ปูนทนไฟ

2.6.2.4 **เส้นใยเซรามิก** (Ceramic fibers)

เส้นใยเซรามิก หรือเซรามิกไฟเบอร์ โดยหลักแล้วหมายถึงเส้นใยที่ทำมาจากวัตถุเซรามิกหลายชนิด เช่น อลูมินา ซิลิกา อลูมิโนซิลิเกต เซอร์โคเนีย ซิลิกอน-คาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไทรด์ คาร์บอน-แกรไฟต์ ฯลฯ ทั้งที่เป็นชนิดวัตถุเดี่ยว หรือนำมาผสมกัน ทั้งนี้โดยมีสารตัวช่วยหลอม (Fluxes) เช่น บอโรซิลิเกต (Boro-silicate) และตัวประสาน (Binding agent) เช่น เอทิลซิลิเกต (Ethyl silicate) และอื่นๆ เมื่อส่วนผสมหลอมตัวดีแล้วจะนำเข้าอัดฉีดด้วยความดันสูงผ่านอุปกรณ์รูนมหนู (Nozzles) รีดเป็นเส้นใย เข้าสู่ระบบลดความร้อนลงอย่างรวดเร็วจนได้เส้นใยในสภาพเป็นเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันตามแต่ขนาดของรูพ่น (Orifice) และความดันแรงอัด บรรดาเส้นใยเซรามิกเหล่านี้นำมาใช้เป็นวัสดุน้ำหนักเบาให้ความเหมาะสมในด้านความร้อน สมบัติไฟฟ้า และใช้เป็นฉนวนของเสียง ยังสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุตัวกรอง (Filter) มีความเหมาะสมกับการกรองที่อุณหภูมิ และยังนำไปใช้เป็นวัสดุบรรจุ (Packing)

ผลิตภัณฑ์ป้องกันการเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ต้องบรรจุไว้ในที่อุณหภูมิสูง และประโยชน์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งใช้เป็นตัวเติมในเนื้อวัสดุเซรามิกเพื่อเสริมความแข็งแรง (Reinforcement) ให้กับโครงสร้างให้ดีขึ้น ทำให้เรียกวัสดุชนิดนี้ว่า Fiber-reinforced composites



รูปที่ 2.25 เส้นใยเซรามิกทำขึ้นเป็นวัตถุทนไฟในรูปแบบต่างๆ

ในปัจจุบันมีงานวิจัยและการพัฒนาในด้านเส้นใยเซรามิกเป็นต้นว่าจากเส้นใยแก้ว (Glass-fiber) มาเป็นเส้นใยที่มีคุณภาพสูงขึ้นของ Glass-ceramic fiber โดยการพิจารณาใช้วัตถุที่มีความแข็งหรืออกไซด์เซรามิกต่างๆ รวมทั้งคาร์บอนและแกรไฟต์ จุดมุ่งหมายที่สำคัญเพื่อการใช้งานของเส้นใยคือ การทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมาก (High-strength fiber) นั่นคือการทำวัตถุที่เป็นส่วนผสมมีโครงสร้างที่ถูกเสริมความแข็งแรงขึ้นภายในเนื้อวัตถุนั้น เส้นใยเซรามิกที่เป็นเส้นใยมาจากผลึกเดี่ยว (Single-crystal filaments) เรียกเส้นใยชนิดนี้ว่า วีสเกอร์ (Whiskers) ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ที่มุ่งให้มีสมบัติที่แข็งแรงต่อแรงดึงได้สูง ความแข็งแรง (Strength) ของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับส่วนผสม (Composition) ดังกรณีความแข็งแรงเนื่องมาจากแรงดึง (Tensile strength)จะมีค่าอยู่ในระหว่าง 200,000-340,000 psi ในกลุ่มของไฟเบอร์ที่มาจาก Polycrystalline และ Composite fiber แต่ถ้าเป็นผลึกชนิดเดี่ยวจะสามารถพัฒนาให้สูงขึ้นได้ถึง 700,000 psi

เส้นใยเซรามิกมีอยู่หลายรูปแบบตามแต่จะนำไปใช้งาน ดังตารางที่ 2.28

ตารางที่ 2.8 ชนิดของเส้นใยเซรามิกที่แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งาน

ชนิดของเส้นใยเซรามิก	ลักษณะและการนำไปใช้งาน
1. เส้นใยเป็นแผ่นหรือผืน (Blanket)	- มีความแข็งแรง เบา ยืดหยุ่นได้ - ใช้บุผนังเตา อุดรอยต่อ ทำ Heater lining
2. เส้นใยอัด (Bulk)	- เป็นกลุ่มเส้นยาวเรียงตัวไขว้กันไปมา - ใช้อุดรอยต่อ ทำเป็นฉนวนในเตา
3. เส้นใยแผ่นอาบน้ำยาให้แข็ง (wet felt)	- ทำจาก Blanket ที่อิ่มตัวด้วยน้ำยาทำให้แข็ง มีความแข็ง ดัดได้ง่าย จะแข็งตัวทันทีเมื่ออยู่ในอากาศ
4. เส้นใยอัดแผ่น (Board)	- ได้จากการขึ้นรูปภายในสุญญากาศ - ใช้ใน Combustion chamber, Kiln lining
5. เส้นใยแบบแผ่นกระดาษ (Paper)	- ได้จากการผสม Binder แล้วรีดเป็นแผ่น - ใช้ทำประเก็น หรือแผ่นฉนวนกันความร้อน
6. เส้นใยถักทอ (Textile : Rope, Cloth, Tape)	- ทำจาก Kaowool fiber และ Organic fiber - ใช้ทำประตูเตา
7. เส้นใยที่มีรูปร่างเฉพาะแบบ (Shape)	- ใช้ทำเบ้าหลอม ฉนวนกันความร้อน

ตารางที่ 2.8 (ต่อ) ชนิดของเส้นใยเซรามิกที่แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้งาน

ชนิดของเส้นใยเซรามิก	ลักษณะและการนำไปใช้งาน
8. เส้นใยชนิด Cement	- ใช้เกาะติดระหว่างวัสดุอื่นๆ ใช้อุดรูพรุน
9. เส้นใยเพื่อการอุดหรือฉาบ (Coating)	- ทนการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี - ใช้ใน Ceramic fiber lining
10. เส้นใยอัดก้อน (Module)	
- Kaoclad	- เป็นแผ่นบางประกอบด้วย Kaowool fiber และ Organic binder ใช้ทำ Lining kiln,Boiler
- Blanket	- เส้นใยที่เกิดจากการอัดเป็น Module ตัดเป็นแผ่นตามต้องการ ใช้ทำ Kiln lining บุผนังฉนวนความร้อนและ Boiler
- Weld on	- นำ Blanket มาใช้แรงกดอัดเป็นแผ่นพับไปมาใช้ทำผนังเตาถ้ามีแท่งโลหะไว้ยึดเรียกว่า Pyro-block อัดเป็นก้อนมีขนาดต่างๆ เช่น 20 ซ.ม. เป็นความหนาที่เหมาะกับเตาบุเส้นใย

ประโยชน์ของเส้นใยเซรามิก มีดังนี้

ก) การใช้เส้นใยสำหรับเตาเผา

- เตาอบอุณหภูมิสูง (Annealing furnace) เช่น เตาอบแก้วที่ 600-650°C
- เตาหลอมหรือเตาหล่อ (Forge furnace) ใช้หลอมและหล่อโลหะ
- เตาอุ่นใช้งานอุณหภูมิสูง (Preheating furnace) สำหรับการเริ่มใช้งานที่ต้องการอุ่นหรือให้ความร้อนในช่วงแรก เช่น เตาอุ่นน้ำมัน
- เตาชนิดหมุนเวียน (Shuttle kiln) เตาเผาผลิตภัณฑ์เครื่องปั้น-ดินเผา และเซรามิกอื่นๆ
- เตาอุโมงค์ (Tunnel kiln) เช่น เตาเผากระเบื้อง เตาเผาเครื่องสุขภัณฑ์
- เตาเผาขยะที่มีปล่องควัน (Fume incinerators)

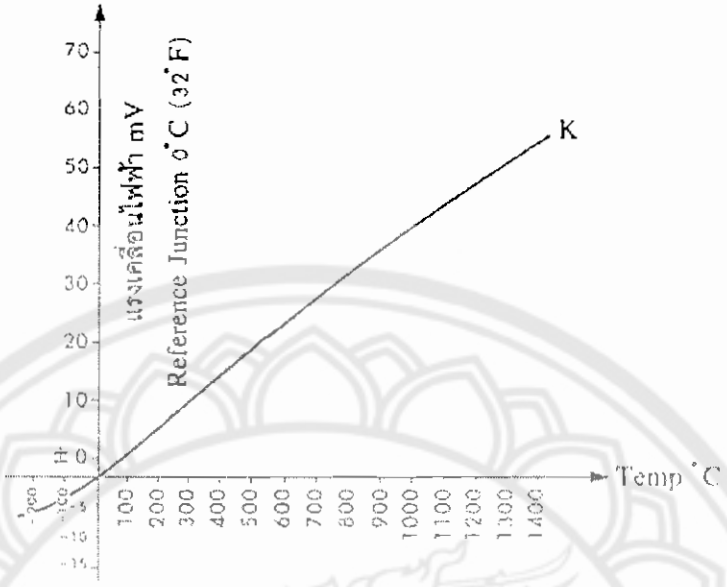
- เตาเผาน้ำมันดิบ (Crude oil heater) ใช้ในโรงงานกลั่นน้ำมันที่มีความหนืดสูง
- เตาเผาให้ความร้อนสูง (Pyrolysis heater) เตานี้จะเผาที่อุณหภูมิสูงใช้เวลาสั้นในการขึ้นและลดอุณหภูมิ เช่น เตาเผาพลอย เตาทดลองเพื่อวิเคราะห์สารเคมี เตาสกัดแยกสารระเหยออกจากวัตถุทนความร้อน (Retorts)

ข) การใช้เส้นใยในงานอื่นๆ

- ท่อระบายความร้อนหรือท่อไอเสียจากระบบกังหันลมร้อน
- อุปกรณ์ผลิตแอมโมเนีย (Ammonia) เนื่องจากใช้ความร้อนในช่วง 150 - 250°C ในหม้อปฏิกิริยา
- ใช้อุดตามรูและรอยต่อที่ที่ทำงานในอุณหภูมิสูง
- ใช้เชื่อมรอยต่อที่มีการขยายตัวเมื่อมีความร้อนสูง
- ใช้ป้องกันไฟ (Fire protection)
- ใช้เป็นฉนวนหุ้มท่อ เครื่องมือ เครื่องจักรที่มีความร้อนสูง
- ใช้เป็นส่วนผสมกับวัตถุทนความร้อน เช่น Mortar หรือซีเมนต์ทนไฟ เพื่อใช้เป็นเส้นใยเสริมความแข็งแรง (Reinforcement)
- ใช้ทำประเก็นความร้อน (Thermal sealing)
- ใช้ทำวัสดุฉนวนไฟฟ้า (Electrical insulator)

2.7 เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K Chromel V.S. Alumel) [5]

เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่าจึงได้มีผู้ประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิลแบบใหม่ที่สายบวก ทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 90 % + โครเมียม 10 % และสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95 % + 5 % ของส่วนผสมระหว่างอะลูมิเนียม แมงกานีส และซิลิคอน ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นมาตรฐานแบบ K เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสามารถวัดงานที่เป็น Oxidizing หรือ Inert ได้ดีกว่าแบบอื่น สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1260°C (2300 °F) และอุณหภูมิต่ำถึง -250°C (-420 °F) ในสภาพงานที่ต้องรับการแผ่รังสีโดยตรงจากแหล่งกำเนิดความร้อน แบบ K ก็สามารถใช้งานได้ดีเช่นกัน



รูปที่2.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K

คุณสมบัติที่เด่นมากของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K คือให้แรงเคลื่อนเอาต์พุตสูง

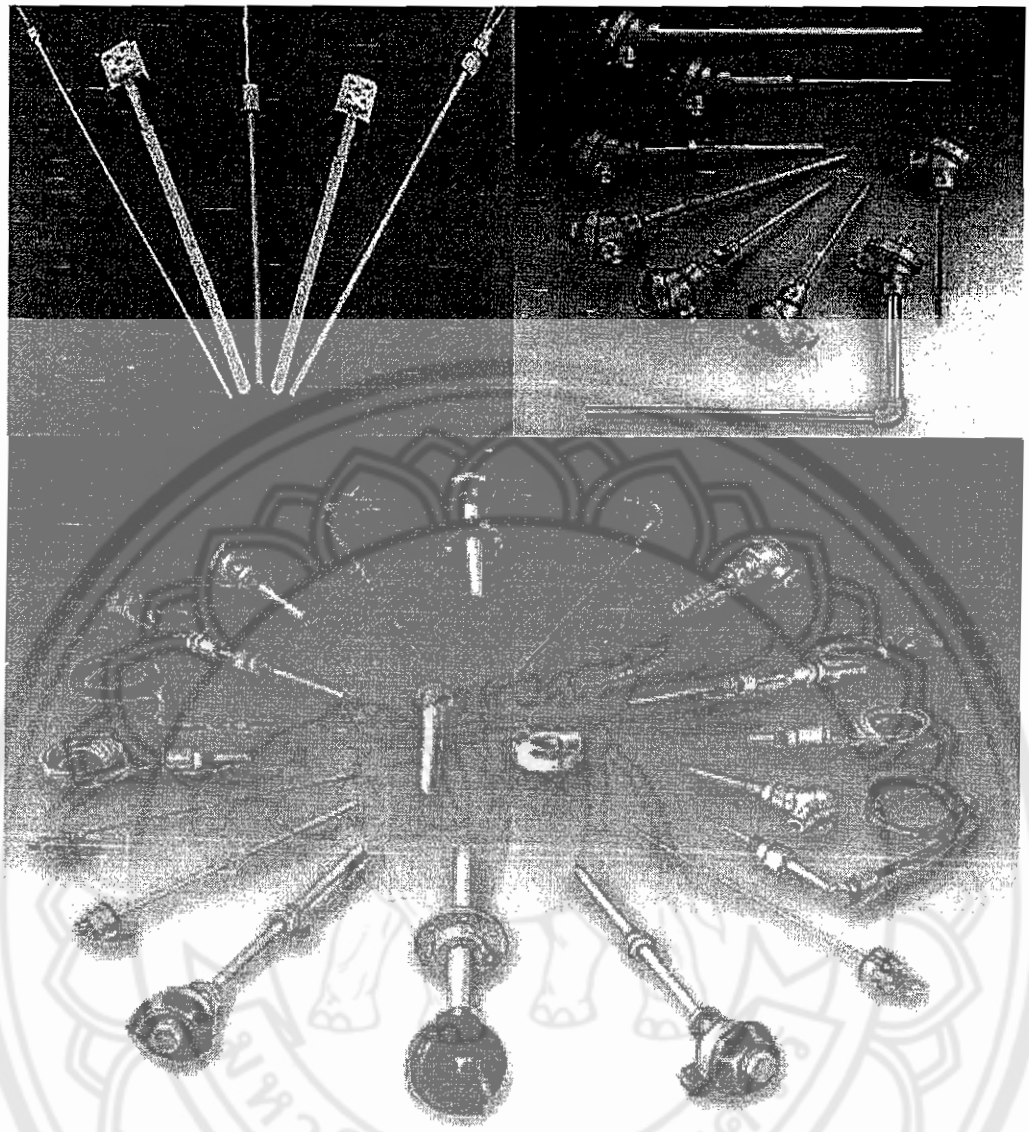
ข้อควรระวัง ไม่ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K สัมผัสโดยตรงกับ

ก) ในงานสภาวะที่เป็น Reducing หรือเป็นการใช้งานสลับกันระหว่าง Oxidizing และ Reducing

ข) สภาวะงานที่ไอของซัลเฟอร์เพราะซัลเฟอร์จะทำลายโลหะทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิล โดยเฉพาะสายลบจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

ค) สภาวะงานที่เป็น Vacumm ยกเว้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ

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



รูปที่ 2.27 เทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ

การควบคุมอุณหภูมิภายในเตามีความสำคัญ [6] เพื่อป้องกันไม่ให้อัตราการให้พลังงานมากกว่าอัตราการสูญเสียความร้อนที่สภาวะสมดุล นั่นคืออุณหภูมิจะมีค่ามากเกินความต้องการ โดยส่วนใหญ่แล้วเตาหลอมลวดต้านทานจะควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

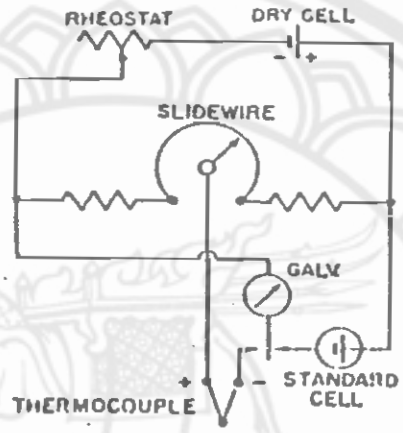
ก) หน่วยรับความร้อน หรือเทอร์โมคัปเปิล

ข) หน่วยวัดค่าความร้อน

ค) หน่วยควบคุม

จากรูปวงจรไฟฟ้าของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ในรูปที่ 2.28 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อน หน่วยรับค่าความร้อนหรือเทอร์โมคัปเปิลจะรับค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นแล้วเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งมีค่าน้อยมากเป็นจำนวนมิลลิโวลต์ ส่งต่อไปยังหน่วยวัดค่าความร้อนซึ่งแสดงค่าออกมาเป็นตัวเลข โดยอาศัยหลักการของมิลลิโวลต์มอเตอร์หรือเครื่องวัดความต่างศักย์

(Potentiometers) เข็มชี้ของเครื่องวัดจะหักเหไปตามค่าของมิลลิโวลต์ที่ถูกส่งมา และที่เครื่องวัดจะมีเข็มอีกเข็มหนึ่งซึ่งเป็นตัวตั้งค่าความร้อนให้เป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งใช้หลักการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับเข็มอ่านแต่เป็นคนละชุดกันและทำงานในลักษณะตรงข้ามกัน คือ เมื่อเข็มอ่อนมาตรงกับเข็มตั้ง จะก่อให้เกิดการตัด



รูปที่ 2.28 วงจรเครื่องวัดความต่างศักย์

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของเครื่องมือวัดพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มีการนำระบบตัวเลขมาใช้ในเครื่องวัด ซึ่งทำให้สะดวกและมีความถูกต้องมากขึ้น ระบบควบคุมแบบดั้งเดิมที่ใช้เข็มจึงค่อยๆ หมดความนิยมลงไป