

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน



นายปัญญา บัวสมนุรา

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

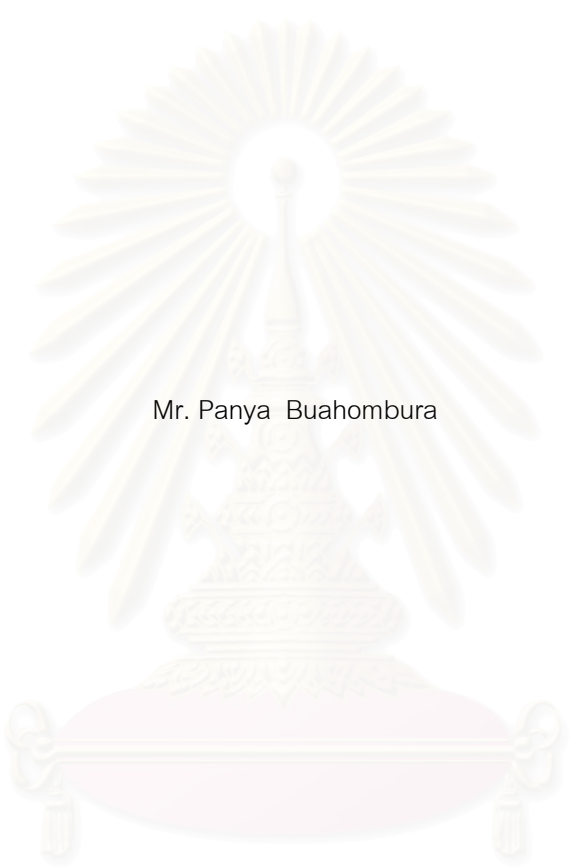
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2808-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NUMERICAL ANALYSIS OF WHEEL/BELT CONTINUOUS CASTER



Mr. Panya Buahombura

สถาบันวิทยบริการ  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical Engineering  
Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2808-1



ปัญหา บัณฑิต : การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน.  
(NUMERICAL ANALYSIS OF WHEEL/BELT CONTINUOUS CASTER) อ. ที่ปรึกษา :  
อาจารย์ ดร. มาวิน สุประคิษฐ ฌ อยุธา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : Professor Takateru UMEDA,  
D.Eng. : 78 หน้า. ISBN 974-53-2808-1.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสามมิติในสภาวะไม่คงตัวเพื่อตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนและการแข็งตัวในการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานของโลหะอะลูมิเนียมและโลหะนอกกลุ่มเหล็กประเภทอื่นๆ ในการคำนวณสมการการนำความร้อนในสภาวะไม่คงตัวจะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมและพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ภาษาซี การคิดความร้อนแฝงในการแข็งตัวในช่วงที่โลหะมีการคายความร้อนแฝงออกมาขณะเกิดการแข็งตัวจะใช้ระเบียบวิธีความจุความร้อนเทียบเท่าร่วมกับระเบียบวิธีการกึ่งขั้นตอนหภูมิ ในส่วนของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่มีการเปรียบเทียบผลกับการทดลอง นอกจากนี้ยังนำผลการคำนวณที่ได้จากตัวโปรแกรมซึ่งได้นำข้อมูลที่ใช้ในการผลิตจริงในโรงงานมาทำการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากกระบวนการผลิต โดยผลจากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงจากกระบวนการมีความสอดคล้องกันดี จากนั้นได้ทำการคำนวณเพื่อหาการกระจายตัวของอุณหภูมิและการแข็งตัวของแท่งงานหล่ออะลูมิเนียม ซึ่งในการคำนวณจะทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการ เช่น ความเร็วในการหล่อ สภาวะการเย็นตัว และอุณหภูมิเท เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์เหล่านี้ที่มีต่อกระบวนการผลิต โดยในการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 4 กรณีหลักๆ ดังนี้ คือ กรณีที่ 1 จะทำการจำลองการเย็นตัวในรูปแบบของการหล่อแบบลูกรีดคู่และการหล่อแบบไดเรคชิลล์ กรณีที่ 2 จะทำการจำลองการเย็นตัวของการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน กรณีที่ 3 จะทำการจำลองการเย็นตัวของการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานโดยมีการนำข้อมูลที่ใช้ในการผลิตจริงมาใช้ในการคำนวณ และกรณีที่ 4 จะทำการจำลองการเย็นตัวของการหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานในรูปแบบที่การถ่ายเทความร้อนมีความไม่สมมาตร ซึ่งข้อสรุปที่ได้จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าทั้งการเย็นตัวในแบบหล่อและความเร็วในการหล่อมีผลต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะ โดยการเย็นตัวที่ไม่ดีในแบบหล่อจะส่งผลกระทบต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะมากกว่าการเพิ่มความเร็วในการหล่อ และยังทำให้ตำแหน่งเริ่มต้นในการแข็งตัวที่เปลือกของแท่งงานหล่อมีระยะที่ต่ำลงจากบริเวณเมนิสคัสอีกด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....

ปีการศึกษา.....2548.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....Takateru Umeda.....

## 4670375521 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: MATHEMATICAL MODEL / HEAT TRANSFER / SOLIDIFICATION / WHEEL/BELT CONTINUOUS CASTER / FINITE DIFFERENCE METHOD

PANYA BUAHOMBURA : NUMERICAL ANALYSIS OF WHEEL/BELT CONTINUOUS CASTER. THESIS ADVISOR : MAWIN SUPRADIST NA AYUDHAYA, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : PROF. TAKATERU UMEDA, D.Eng., 78 pp. ISBN 974-53-2808-1.

A three dimensional transient heat transfer model has been developed to investigate heat transfer and solidification characteristics of the near net shape wheel/belt type aluminum continuous casting and continuous casting of other non-ferrous metals. The transient heat conduction equation was discretized by using explicit finite difference scheme and the program code was developed using C programming language. Treating of the latent heat evolved during solidification was done using the equivalent specific heat and the temperature recovery method. The model has been validated by comparing with the results found in the literatures which were previously confirmed by experiments. The calculation results were also compared to the measured data from the wheel/belt continuous casting process. Good agreement were obtained for both comparisons. Temperature profile and progress of solidification were calculated by varying important process parameters such as casting speed, cooling condition and pouring temperature for studying the effect of these parameters. Calculation of the model are divided into four cases; case 1: simulating the condition of twin roll caster and direct chill caster, case 2: simulating the case of wheel/belt continuous caster, case 3: simulating the wheel/belt continuous caster by using the actual operating data of the process and case 4: simulating the un-symmetry mold case of wheel/belt continuous caster. The calculation results yield conclusions that the casting speed and the cooling condition in the mold affect the pool depth. The cooling condition in the mold have stronger effect on the pool depth and shift downward the starting point of solidified shell from the meniscus than the casting speed does.

Department... Metallurgical Engineering..... Student's signature..... *Phya Panyabura*  
 Field of study... Metallurgical Engineering..... Advisor's signature..... *Ma Win Supradist*  
 Academic year ..... 2005..... Co-advisor's signature..... *Takateru Umeda*

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือและคำแนะนำจากหลายท่าน ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความเมตตาของ Professor Takateru UMEDA อาจารย์ ดร. มาวิน สุประคิษฐ ฌ อยุธา และอาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ เป็นอย่างสูงที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าของท่านในการถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา ตลอดจนให้กำลังใจและคำแนะนำต่างๆ รวมทั้งให้โอกาสที่ดีแก่ข้าพเจ้าในตลอดช่วงระยะเวลาในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้ทางด้านโลหะในด้านต่างๆ และบุคลากรในภาควิชา รวมทั้งเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโททุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าในด้านต่างๆ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ข้าพเจ้ามิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจ และให้โอกาสที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2    วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3    ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2    การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.1    แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.2    พื้นฐานการถ่ายเทความร้อน.....	7
2.3    การถ่ายเทความร้อนในการหล่อแบบต่อเนื่อง.....	9
2.4    สมการพื้นฐานของการหล่อแบบต่อเนื่อง.....	10
2.5    ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องแบบชัดเจน.....	11
2.6    เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต.....	13
2.7    การคิดความร้อนแฝงจากการแข็งตัว.....	14
2.8    วรรณกรรมปริทรรศน์.....	17
3    วิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1    การประยุกต์ใช้สมการการถ่ายเทความร้อนกับการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท วงล้อ/ สายพาน.....	19
3.2    เทคนิคสำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสามมิติที่อยู่ในสถานะ ไม่คงตัว.....	24
3.3    การคูณความร้อนในสามมิติ.....	25



3.4	การประยุกต์ใช้เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการห่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน.....	27
3.4.1	การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 1.....	28
3.4.2	การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 2.....	30
3.4.3	การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 3.....	32
3.4.4	การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 4.....	34
3.5	สมบัติทางความร้อนที่ใช้ในการคำนวณ.....	36
3.6	การคิดความร้อนแฝงจากการแข็งตัว.....	36
3.7	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	39
3.8	แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรม.....	43
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
4.1	แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 1.....	45
4.2	แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 2.....	53
4.3	แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 3.....	59
4.3.1	แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณี 3d.....	59
4.3.2	แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณี 3b.....	63
4.3.3	แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณี 3C.....	67
4.4	แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 4.....	70
5	สรุปผลการวิจัย.....	75
	รายการอ้างอิง.....	76
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	78



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของกระบวนการผลิตด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่องของโลหะอะลูมิเนียม.....	5
ภาพที่ 2.2 แสดงการกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง.....	7
ภาพที่ 2.3 แสดงการถ่ายเทความร้อนในบริเวณต่างๆ ของการหล่อแบบต่อเนื่อง.....	9
ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างการคำนวณด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน.....	12
ภาพที่ 2.5 แสดงผลกระทบของพารามิเตอร์ $\gamma$ ต่อความถูกต้องของผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน.....	13
ภาพที่ 2.6 แสดงระเบียบวิธีการกึ่งอินอนุหภูมิ.....	16
ภาพที่ 3.1 แสดงเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานและวงล้อที่ใช้หล่อ.....	20
ภาพที่ 3.2 เปรียบเทียบผลจากการคำนวณ โดยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (เส้นทึบ) และค่าที่คำนวณจากผลเฉลยแม่นยำ (เส้นประ) สำหรับผลกระทบของความโค้ง (curvature effects).....	21
ภาพที่ 3.3 แสดงกระบวนการที่มีการประยุกต์ใช้ในการคำนวณ.....	22
ภาพที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนจริงของแท่งงานหล่อกับการเคลื่อนที่ที่มีการประยุกต์ใช้ในการคำนวณ.....	25
ภาพที่ 3.5 แสดงเอลิเมนต์ในการคำนวณสำหรับการถ่ายเทความร้อนในสามมิติด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	26
ภาพที่ 3.6 อธิบายการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 1.....	28
ภาพที่ 3.7 แสดงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 1.....	29
ภาพที่ 3.8 อธิบายการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 2.....	30
ภาพที่ 3.9 แสดงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 2.....	31
ภาพที่ 3.10 อธิบายการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 3.....	32
ภาพที่ 3.11 แสดงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 3.....	33
ภาพที่ 3.12 อธิบายการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 4.....	34

ภาพที่ 3.13	แสดงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขต กรณี 4.....	35
ภาพที่ 3.14	แสดงระเบียบวิธีการกักเก็บอุณหภูมิ.....	38
ภาพที่ 3.15	แสดงผลการคำนวณของโปรแกรมการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติเปรียบเทียบกับ ผลเฉลย.....	40
ภาพที่ 3.16	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่ความละเอียดของระยะมิติ ( $\Delta x$ ) และช่วงเวลา ( $\Delta t$ ) ที่ต่างๆ กัน.....	40
ภาพที่ 3.17	แสดงการเขียนตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ในชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม.....	41
ภาพที่ 3.18	แสดงผลการคำนวณจากงานวิจัยที่มีการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	42
ภาพที่ 3.19	แสดงผลการคำนวณจากโปรแกรมที่ใช้ข้อมูลในการผลิตจริงเพื่อเปรียบเทียบกับ อุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จริงจากโรงงาน.....	43
ภาพที่ 3.20	ลำดับขั้นตอนหลักๆ ในการคำนวณของโปรแกรมการถ่ายเทความร้อนสามมิติ ในสถานะไม่คงตัว.....	44
ภาพที่ 4.1	(a) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของ แท่งงานหล่อ และความลึกของบ่อน้ำโลหะซึ่งแสดงให้เห็น โดยอุณหภูมิลิควิดัส อุณหภูมิโซลิดัส และ (b) แสดงอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง ด้วยความเร็วในการหล่อ 3 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิที่ 680 องศาเซลเซียส ของกรณี 1a ในตารางที่ 3.1.....	46
ภาพที่ 4.2	การกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางของกรณี 1a ในตารางที่ 3.1 ที่มี ความเร็วในการหล่อ 3 เมตรต่อนาที.....	47
ภาพที่ 4.3	ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเย็นตัวในแบบหล่อและความเร็วใน การหล่อที่มีต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะ โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตในตารางที่ 3.1....	49
ภาพที่ 4.4	ผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสในแบบหล่อต่อความลึก ของบ่อน้ำโลหะ .....	50
ภาพที่ 4.5	ผลกระทบของความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะ.....	51
ภาพที่ 4.6	ผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสในแบบหล่อและ ความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่ออุณหภูมิที่ผิวและใจกลางแท่งงานหล่อที่ตำแหน่ง กึ่งกลางด้านความกว้าง.....	52

ภาพที่ 4.7	ผลการคำนวณโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตในตารางที่ 3.2 ในกรณี 2a ซึ่งภาพ (a) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อ และความลึกของบ่อน้ำโลหะซึ่งแสดงให้เห็นโดยอุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิโซลิดัส และภาพ (b) แสดงอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง ด้วยความเร็วในการหล่อ 3 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิเทที่ 680 องศาเซลเซียส.....	54
ภาพที่ 4.8	แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางของกรณี 2a ในตารางที่ 3.2 ที่มีความเร็วในการหล่อ 3 เมตรต่อนาที.....	55
ภาพที่ 4.9	ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเย็นตัวในแบบหล่อและความเร็วในการหล่อต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตในตารางที่ 3.2.....	57
ภาพที่ 4.10	ผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสในแบบหล่อและความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่ออุณหภูมิที่ผิวและใจกลางแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง .....	58
ภาพที่ 4.11	การกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อและอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง.....	60
ภาพที่ 4.12	รูปร่างและความลึกของบ่อน้ำโลหะ.....	61
ภาพที่ 4.13	รูปร่างของบ่อน้ำโลหะและการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางที่ระยะต่างๆ จากตำแหน่งเมนีสคัส.....	62
ภาพที่ 4.14	การกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อและอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง.....	64
ภาพที่ 4.15	รูปร่างและความลึกของบ่อน้ำโลหะ.....	65
ภาพที่ 4.16	รูปร่างของบ่อน้ำโลหะและการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางที่ระยะต่างๆ จากตำแหน่งเมนีสคัส.....	66
ภาพที่ 4.17	การกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อและอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง.....	68
ภาพที่ 4.18	รูปร่างและความลึกของบ่อน้ำโลหะ.....	69
ภาพที่ 4.19	รูปร่างของบ่อน้ำโลหะและการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางที่ระยะต่างๆ จากตำแหน่งเมนีสคัส.....	69

ภาพที่ 4.20 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อและ  
อุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง..... 71

ภาพที่ 4.21 รูปร่างและความลึกของบ่อน้ำโลหะ..... 72

ภาพที่ 4.22 รูปร่างของบ่อน้ำโลหะและการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางที่  
ระยะต่างๆ จากตำแหน่งเมนิสคัส..... 73



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 1.....	29
ตารางที่ 3.2	เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 2.....	31
ตารางที่ 3.3	เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 3.....	33
ตารางที่ 3.4	เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 4.....	35
ตารางที่ 3.5	คุณสมบัติทางความร้อนที่ใช้ในการคำนวณ.....	36
ตารางที่ 3.6	แสดงสมบัติของเหล็กและเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ.....	39



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การหล่อแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญและได้มีการดำเนินการผลิตกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมทางด้านโลหะ รวมทั้งได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลายาวนาน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการผลิตโดยมีเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้จากการผลิต (% Yield) สูง สามารถผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพและมีความสม่ำเสมอ อีกทั้งในปัจจุบันเทคโนโลยีของการหล่อแบบต่อเนื่องสมัยใหม่ได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อทำการผลิตด้วยการหล่อแบบต่อเนื่องให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการ (Near-net-shape continuous casting) และเข้ามามีบทบาทในการผลิตโลหะเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถลดขั้นตอนในกระบวนการผลิต ลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต ทำให้ต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการผลิตลดลง รวมทั้งเงินลงทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตด้วยการหล่อแบบต่อเนื่องแบบดั้งเดิม (Conventional continuous casting) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตทั้งโลหะในกลุ่มเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็ก อีกทั้งในปัจจุบันได้มีงานวิจัยและพัฒนาออกมาเผยแพร่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นถึงความสำคัญและแนวโน้มของการพัฒนาที่จะมีต่อไปในอนาคต

การศึกษาและทำการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการผลิตด้วยการหล่อแบบต่อเนื่องนั้น ชิ้นงานที่ทำการหล่อก็มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา จึงเป็นการยากที่จะทำการตรวจวัดหาข้อมูลและพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการผลิต อาทิเช่น อัตราการแข็งตัวของโลหะ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ เป็นต้น ดังนั้นทางเลือกหนึ่งที่จะสามารถเข้ามามีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ คือการนำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ในกระบวนการผลิตซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายในการศึกษาลง เนื่องจากคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณในปัจจุบันมีราคาถูกและมีสมรรถนะที่สูงขึ้นมาก รวมทั้งสามารถทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อกระบวนการได้ค่อนข้างสะดวก

ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งถ้าหากได้มีการนำเอาการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาทำการศึกษากระบวนการผลิตด้วยการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน ซึ่งเครื่องหล่อประเภทนี้เป็นเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องที่ใช้ในการผลิตแผ่นอะลูมิเนียมที่จะนำไปขึ้นรูปต่อด้วยวิธีการอัดกระแทก (Impact extrusion) เพื่อผลิตหลอด และกระป๋องอะลูมิเนียม การวิเคราะห์เชิงตัวเลขนี้สามารถนำมาศึกษาและ



วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการแข็งตัวของอะลูมิเนียมในเครื่องหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน ตลอดจนศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อกระบวนการเพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปใช้ในการเฝ้าติดตามและควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการเพื่อให้สามารถทำการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือ การปรับปรุงและพัฒนากระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องที่ใช้เครื่องหล่อประเภทวงล้อ/สายพานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยทำการศึกษาในเรื่องของการถ่ายเทความร้อนและการแข็งตัวของน้ำโลหะ โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น ขนาดของแบบหล่อ รัศมีของวงล้อ อัตราเร็วในการหล่อ อุณหภูมิของน้ำโลหะที่ใช้ในการหล่อ เงื่อนไขและวิธีที่ใช้ในการหล่อเย็น ที่มีผลต่อกระบวนการหล่อ

1.2.2 เพื่อประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปในการคำนวณการถ่ายเทความร้อน และการแข็งตัวของน้ำโลหะที่ง่ายต่อการใช้งาน สำหรับงานหล่อแบบต่อเนื่องที่ใช้เครื่องหล่อประเภทวงล้อ/สายพาน และเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องในลักษณะอื่นๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน

1.3.2 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาซีเพื่อหาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method)

1.3.3 ทำการพิสูจน์ความถูกต้องของโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบผลของการคำนวณกับกรณีศึกษาที่มีคำตอบในรูปของผลเฉลยแน่นอนตรง (Exact solution)

1.3.4 ศึกษาและเก็บข้อมูลจริงจากโรงงานทั้งในส่วน of เงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตที่จำเป็น พร้อมกับเก็บข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

1.3.5 ใช้โปรแกรมในการคำนวณผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อกระบวนการหล่อเพื่อศึกษาแนวทางในการปรับปรุง และพัฒนาประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต

1.3.6 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนที่ใช้แสดงผลหลังจากการคำนวณที่สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน



## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สะดวก และง่ายต่อการใช้งานในการคำนวณการถ่ายเทความร้อน และการแข็งตัวของน้ำโลหะเพื่อใช้ในการปรับปรุง และควบคุมกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน

1.4.2 เพื่อที่จะทราบถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการผลิต ซึ่งจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำไปทำการควบคุมและปรับปรุงกระบวนการผลิต

1.4.3 เป็นข้อมูลในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองปรากฏการณ์ในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทอื่นๆ ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

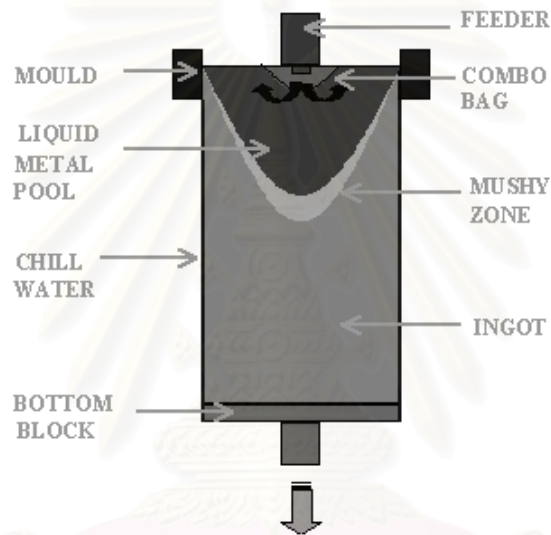
### การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

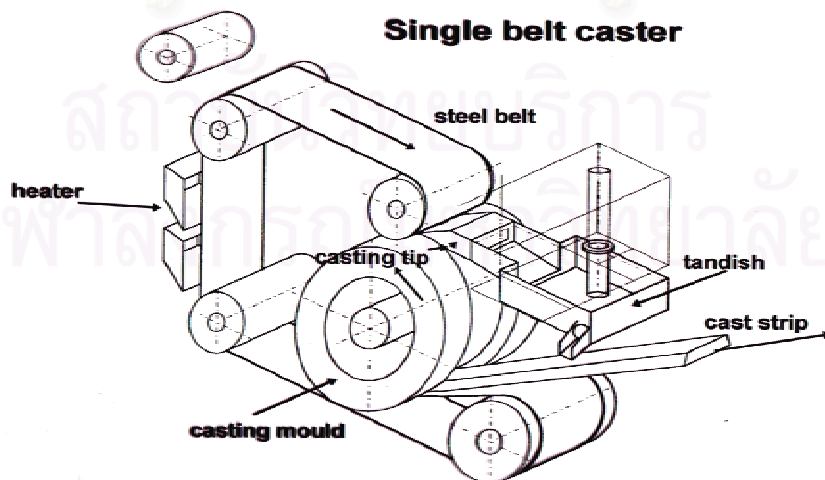
กระบวนการผลิตด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous casting process) เป็นกรรมวิธีการผลิตโลหะที่มีความสำคัญ ซึ่งมีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตชิ้นงานหล่อแบบดั้งเดิม (Conventional ingot casting) เช่น การเพิ่มขึ้นของปริมาณการผลิต, พลังงานที่ใช้ลดลง, ให้ผลผลิตที่สูงขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ ในการที่จะทำการผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีข้อดีดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจำเป็นต้องมีความเข้าใจในกลไกของการถ่ายเทความร้อน และพฤติกรรมการณ์การเย็นตัวของชิ้นงานหล่อ โดยวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการศึกษา คือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิ และศึกษาการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อ ซึ่งสามารถที่จะศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการผลิตและสภาวะที่ใช้ในการหล่อ

ในปัจจุบันการผลิตโดยกรรมวิธีการหล่อแบบต่อเนื่องได้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตโลหะอะลูมิเนียม โดยตัวอย่างที่มีการทำการผลิตเช่น การผลิตอะลูมิเนียมแท่งแบน (Slab) จากขั้นตอนเริ่มต้นด้วยกระบวนการหล่อแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous casting) ที่เรียกว่า การหล่อแบบไดเรกชิลล์ (Direct chill casting) ไปจนกระทั่งถึงกระบวนการหล่อต่อเนื่องให้ได้ขนาดของชิ้นงานใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการ (Near net shape continuous casting) เช่น การผลิตอะลูมิเนียมแท่งแบนแบบบาง (Thin slab) และโลหะอะลูมิเนียมแผ่นบาง (Strip) ด้วยกระบวนการหล่อต่อเนื่องแบบวงล้อ/สายพาน (Wheel/belt continuous casting), แบบสายพานคู่ (Twin belts casting) และแบบลูกรีดคู่ (Twin rolls casting) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งกระบวนการหล่อต่อเนื่องแบบวงล้อ/สายพานในประเทศไทยได้มีการเริ่มทำการผลิตตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 เพื่อทำการผลิตเหรียญอะลูมิเนียม (Aluminum slug) สำหรับเป็นวัตถุดิบในการอัดขึ้นรูป (Impact extrusion) เป็นกระป๋องและหลอดอะลูมิเนียม โดยข้อดีของกระบวนการนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการหล่อแบบไดเรกชิลล์ คือ สามารถลดขั้นตอนในกระบวนการผลิตได้หลายขั้นตอน เช่น การปาดผิว (Scalping) และการรีดขั้นต้น (Roughing rolling) ซึ่งชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียมที่ได้จากการหล่อจะถูกส่งต่อเนื่องไปยังกระบวนการรีดร้อนและรีดเย็นต่อไป จากนั้นก็นำอะลูมิเนียมแผ่นบางที่ผ่านการรีดแล้วมาทำการอัด (Pressing) ให้อยู่ในรูปของเหรียญอะลูมิเนียม ถึงแม้ว่าการผลิตด้วยกระบวนการหล่อต่อเนื่องให้ได้ขนาดของชิ้นงานใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการได้มีการพัฒนาให้มีการผลิตที่ทันสมัยแล้ว แต่ต้องยอมรับว่าโดยทั่วไปแล้วสภาวะที่ใช้ในการหล่อ เช่น ความเร็วในการหล่อ, อุณหภูมิเท และสภาวะการเย็นตัว มีผลกระทบอย่างมากต่อการกระจายตัวของ

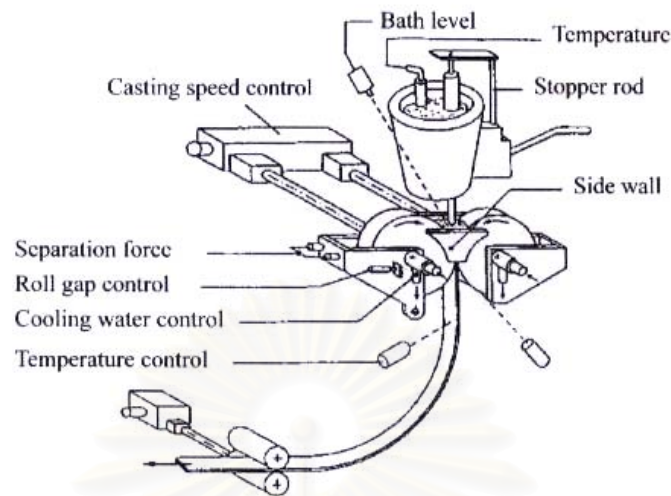
อุณหภูมิในชิ้นงานและการเย็นตัวของชิ้นงานหล่อซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต การเข้าใจผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเหล่านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้สำหรับการควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ อีกทั้งการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษากระบวนการหล่อต่อเนื่องของโลหะอะลูมิเนียมในประเทศไทยมีค่อนข้างน้อย เนื่องจากขาดแคลนบุคลากรและเครื่องมือที่จะทำการพัฒนาโปรแกรมและการนำไปใช้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องทำการพัฒนาโปรแกรมการถ่ายเทความร้อนสำหรับการคำนวณในกระบวนการหล่อต่อเนื่องของโลหะอะลูมิเนียมซึ่งจะใช้สำหรับการเฝ้าติดตามและทำการควบคุมกระบวนการเพื่อปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม



เครื่องหล่อประเภทไดเรกชิลล์ (Direct chill casting machine)



เครื่องหล่อประเภทวงล้อ/สายพาน (Wheel/belt caster)



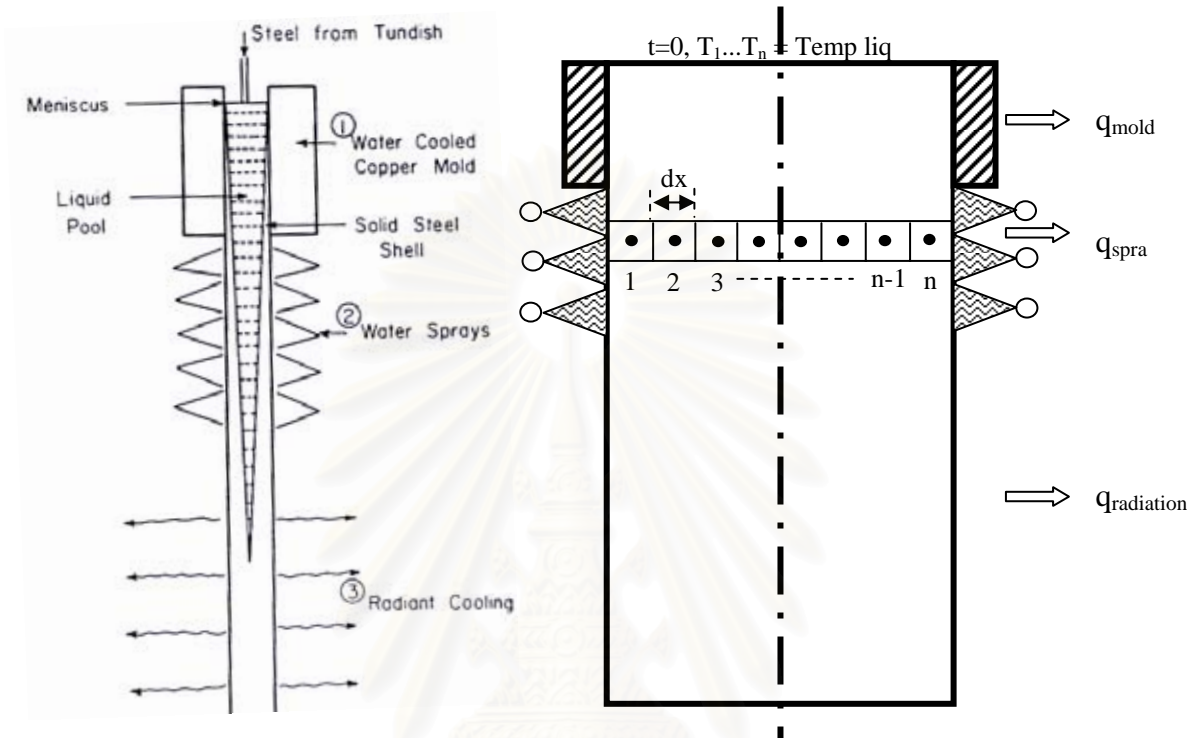
เครื่องหล่อประเภทลูกรีดคู่ (Twin roll caster) [1]

รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของกระบวนการผลิตด้วยวิธีการหล่อแบบต่อเนื่องของโลหะอะลูมิเนียม

ในกระบวนการผลิตโดยการหล่อแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.2 น้ำโลหะจะถูกปล่อยลงมาจากที่พักน้ำโลหะ (Tundish) ผ่านท่อที่ทำจากเซรามิก (Submerge entry nozzle) เข้าสู่แบบหล่อ (Mold) เมื่อสัมผัสกับแบบหล่อที่ทำจากทองแดงที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำ น้ำโลหะจะเริ่มเกิดการแข็งตัว ในขณะที่ผิวชั้นส่วนล่างที่มีการแข็งตัวแล้วก็จะถูกดึงออกไปด้วยอัตราเร็วในการหล่อค่าหนึ่งซึ่งจะรักษาระยะรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวให้คงที่ และในที่สุดระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ดังนั้นในการนำแบบจำลองมาใช้ในการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนของการหล่อแบบต่อเนื่องนั้น เราสามารถที่จะทำการสมมติให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวและกำหนดให้ผู้สังเกตการณ์เคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของชิ้นโลหะหลอมเหลวที่มีการแข็งตัวและถูกดึงออกไปตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุดที่ต้องการทำการศึกษาได้

สำหรับการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการศึกษากระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องนั้น จะทำการแบ่งโดเมนที่ใช้ในการคำนวณออกเป็นชั้นต่างๆ แล้วแบ่งแต่ละชั้นออกเป็น ส่วน (Element) ย่อยๆ และแต่ละส่วนจะถูกแทนที่ด้วยจุด (Node) โดยจะมีตำแหน่งอยู่ตรงกลางของแต่ละส่วน ที่เวลาเริ่มต้น  $t = 0$  อุณหภูมิของแต่ละจุดจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) และเมื่อช่วงเวลาถัดไป  $\Delta t$  อุณหภูมิที่ตำแหน่งของจุดที่ 2 ถึง จุดที่  $(n-1)$  จะถูกคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ที่อยู่ในรูปของสมการการถ่ายเทความร้อนและผลจากอุณหภูมิที่ทราบค่าแล้วในเวลา  $t = 0$  จากนั้นอุณหภูมิที่จุดที่ 1 และจุดที่  $n$  จะถูกคำนวณโดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะเป็นการเสร็จสิ้นในการคำนวณอุณหภูมิที่ช่วงเวลา  $\Delta t$  จากนั้นขั้นตอนของการคำนวณจะทำการคำนวณซ้ำด้วยขั้นตอนเช่นนี้และใน

ระหว่างการคำนวณจะมีการปรับเงื่อนไขขอบเขตและสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในแต่ละส่วนจนกระทั่งเวลาดำเนินไปถึงจุดสิ้นสุดที่ต้องการทำการคำนวณ [2]



รูปที่ 2.2 แสดงการกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง [3]

## 2.2 พื้นฐานการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนมีกลไกที่สำคัญด้วยกัน 3 กลไก ดังนี้คือ การนำความร้อน (Conduction), การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

### (1) การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่าง 2 บริเวณจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำในตัวกลางที่อยู่หนึ่ง ซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier's law of conduction)

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q_x$  คือ ฟลักซ์ความร้อนของการนำความร้อนในทิศทาง  $x$



$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

$\frac{dT}{dx}$  คือ อัตราผลต่างระหว่างอุณหภูมิของ 2 บริเวณในทิศทาง  $x$

## (2) การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นผลมาจากรูปแบบของการถ่ายเทความร้อน 2 ชนิด คือ การถ่ายเทความร้อนในทิศทางของการไหลเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหลทั้งก้อน (Bulk fluid motion) และการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลที่มีการเคลื่อนที่กับขอบเขตของพื้นผิว (Bounding surface) ที่ของไหลสัมผัสซึ่งมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิ เพื่อลดความยุ่งยากในการประยุกต์ใช้กับการคำนวณจึงได้มีการรวมเอาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อการพาความร้อนให้รวมอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และให้การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนของ 2 บริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างพื้นผิวของวัสดุกับของไหลหรือตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิววัสดุนั้น ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$q_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $q_{conv}$  คือ ฟลักซ์ความร้อนของการพาความร้อน ระหว่างของไหลและพื้นผิววัสดุ

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$T_\infty$  คือ อุณหภูมิของของไหลหรือตัวกลางสำหรับการพาความร้อน

$T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ

## (3) การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$q_{rad} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $q_{rad}$  คือ ฟลักซ์ความร้อนของการแผ่รังสีความร้อน

$\epsilon$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

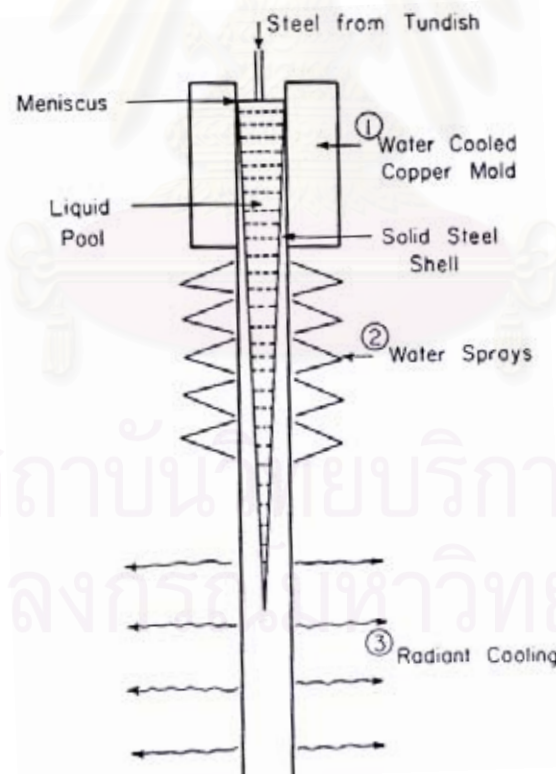
$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann constant)

$T_{surr}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

$T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ

### 2.3 การถ่ายเทความร้อนในการหล่อแบบต่อเนื่อง

กระบวนการถ่ายเทความร้อนของการหล่อแบบต่อเนื่องนั้น เป็นการดึงเอาความร้อนออกจากโลหะหลอมเหลวเพื่อให้โลหะหลอมเหลวมีการแข็งตัวกลายเป็นของแข็ง โดยความร้อนที่ถูกดึงออกมานั้นประกอบด้วย ความร้อนในส่วนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว เรียกว่า Superheat ความร้อนในส่วนที่ถูกคายออกมาในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากของเหลวไปเป็นของแข็งที่เรียกว่า ความร้อนแฝง (Latent heat) และ Sensible heat ซึ่งเป็นความร้อนในส่วนที่มีการเย็นตัวของของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus temperature) การพาความร้อนในบ่อน้ำโลหะ (Liquid pool) เนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมของน้ำโลหะที่ไหลจากต้นคิซเข้าไปในแบบหล่อ การนำความร้อนเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของเปลือกของแข็ง (Solid shell) จากด้านที่ร้อนกว่าไปสู่ด้านที่เย็นกว่า และการถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณผิวด้านนอกชิ้นงานที่ทำการหล่อ โดยบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนหลักๆ จะประกอบด้วย 3 บริเวณด้วยกัน คือ การนำความร้อนบริเวณแบบหล่อ การพาความร้อนบริเวณที่มีการหล่อเย็นด้วยการสเปรย์ (Spray) และการแผ่รังสีความร้อนบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน[3] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการถ่ายเทความร้อนในบริเวณต่างๆ ของการหล่อแบบต่อเนื่อง [3]



เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์หลักที่เกิดขึ้นในการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดปัจจัยที่จะมีผลต่อการดำเนินงานของเครื่องจักรที่ใช้ในการหล่อ จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า ความลึกของบ่อน้ำโลหะมีความสัมพันธ์กับระยะในการสิ้นสุดการแข็งตัวของโลหะ (Metallurgical length) ในเครื่องหล่อ โดยความลึกของบ่อน้ำโลหะจะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านจากเปลือกของแข็ง ไปยังผิวด้านนอกของแท่งงานหล่อ (Strand) ซึ่งบ่อน้ำโลหะจะต้องมีความลึกไม่เกินระยะในการสิ้นสุดการแข็งตัวของโลหะ ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดความเร็วในการหล่อ โดยจะต้องมีเวลานานเพียงพอสำหรับการดึงความร้อนจากใจกลางของแท่งงานหล่อ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนไม่เพียงแต่เป็นตัวกำหนดผลิตผลสูงสุด (Maximum productivity) เท่านั้น แต่ยังมีผลกระทบต่อคุณภาพของโลหะที่ทำการผลิตด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการเกิดรอยแตกที่ผิว (Surface cracks) และรอยแตกภายใน (Internal cracks) เนื่องจากถ้าหากมีการดึงความร้อนออกจากโลหะในอัตราที่สูงเกินไปจะมีผลทำให้เกิดความเครียดแรงดึงจากการขยายตัวและหดตัวในระหว่างการแข็งตัวของโลหะ และยังส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของผลิตภัณฑ์อีกด้วย ดังนั้นในการถ่ายเทความร้อนของการหล่อแบบต่อเนื่องไม่เพียงแต่จะต้องพิจารณาการดึงความร้อนออกจากโลหะหลอมเหลวเท่านั้น แต่จะต้องพิจารณาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วย

## 2.4 สมการพื้นฐานของการหล่อแบบต่อเนื่อง (Governing Equation)

สมการอนุพันธ์แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในกระบวนการสามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\rho C_p \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right\} = k \nabla^2 T - v \rho C_p \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.4)$$

โดยที่  $\mathbf{u}$  คือ ความเร็วในการไหลของน้ำโลหะ

$v$  คือ ความเร็วในการดึงขึ้นงาน

ซึ่งถ้าไม่คิดพจน์ของการไหลของน้ำโลหะ จะได้สมการเป็น

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T - v \rho C_p \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะ

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อน

$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$T$  คือ อุณหภูมิ

$v$  คือ ความเร็วในการหล่อ

$z$  คือ ทิศทางตามแนวการหล่อ

## 2.5 ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน (Explicit Finite Difference Method)

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะสร้างขึ้นเพื่อทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องนี้จะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมาใช้ในการคำนวณ โดยในเบื้องต้นจะแสดงการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจนกับปัญหาใน 1 มิติ สำหรับปัญหาใน 2 มิติและ 3 มิติ ก็สามารถทำการประยุกต์ใช้ได้ในลักษณะเดียวกัน

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ สำหรับบริเวณที่มีมิติแน่นอน (Finite region)  $0 \leq x \leq L$  ซึ่งมีความยาวเป็นระยะเท่ากับ  $L$  สามารถแสดงอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L, \quad t > 0 \quad (2.6)$$

ในขั้นแรกนั้นระยะ  $0 \leq x \leq L$  จะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ จำนวน  $M$  เอลิเมนต์ ซึ่งจะได้ขนาดของเมช (Mesh size) ที่มีขนาดเท่ากับ

$$\Delta x = \frac{L}{M} \quad (2.7)$$

และ อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและอนุพันธ์อันดับที่สอง สามารถกระจายออกมาอยู่ในรูปของการประมาณเพื่อที่จะนำไปใช้ในคำนวณได้ดังนี้ คือ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{(\Delta x)^2} [T_{i-1}^t - 2T_i^t + T_{i+1}^t] \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{(\Delta t)} [-T_i^t + T_i^{t+\Delta t}] \quad (2.9)$$

ซึ่งเมื่อนำสมการที่ 2.8 และ 2.9 ไปแทนในสมการที่ 2.6 จะได้

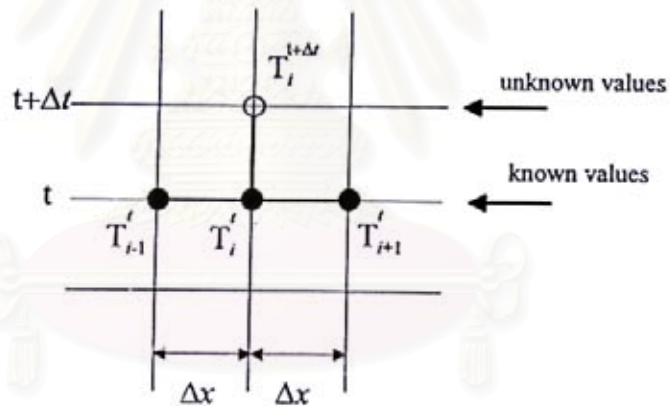
$$\frac{1}{(\Delta t)} [-T_i' + T_i'^{\Delta t}] = \frac{\alpha}{(\Delta x)^2} [T_{i-1}' - 2T_i' + T_{i+1}'] \quad (2.10)$$

$$T_i'^{\Delta t} = \gamma T_{i-1}' + (1 - 2\gamma)T_i' + \gamma T_{i+1}' \quad (2.11)$$

$$\text{เมื่อ } \gamma = \frac{\alpha(\Delta t)}{(\Delta x)^2}$$

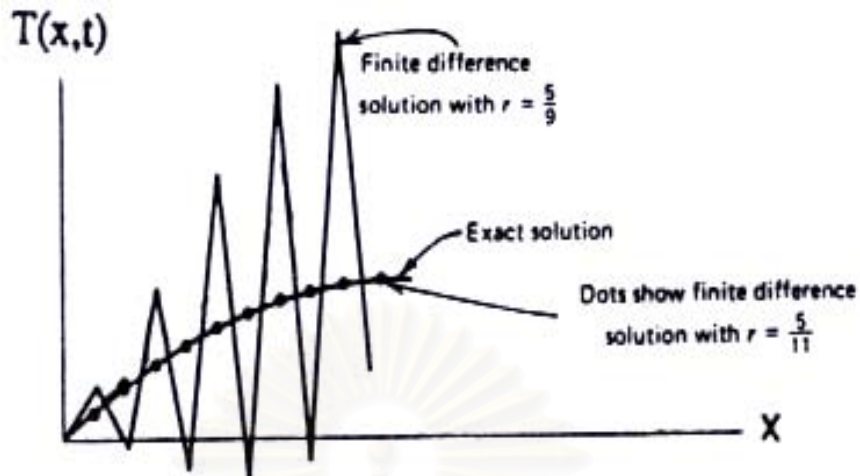
จากสมการที่ 2.11 เราสามารถที่จะหาอุณหภูมิในช่วงเวลาถัดไปได้โดยการคำนวณจากข้อมูลของอุณหภูมิที่ทราบค่าแล้วจากเวลาปัจจุบันดังแสดงในรูปที่ 2.4 เพื่อให้สมการสามารถคำนวณค่าได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ค่า  $\gamma$  ควรจะอยู่ในช่วง

$$0 \leq \gamma \leq \frac{1}{2} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างการคำนวณด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน

ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดค่าของ  $\Delta x$  และ  $\Delta t$  ที่จะใช้ในการคำนวณเพื่อความถูกต้องและความแม่นยำในการคำนวณของโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงผลกระทบของพารามิเตอร์  $\gamma$  ต่อความถูกต้องของผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีผลต่าง  
สี่เหลี่ยมแบบชัดเจน

## 2.6 เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

ในการแก้สมการทางการถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม

เงื่อนไขเริ่มต้นในกระบวนการถ่ายเทความร้อน คือ อุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มต้นที่เราสนใจศึกษา ซึ่งอาจจะเป็นค่าคงที่หรืออยู่ในรูปของฟังก์ชันก่ตัวแปรของตำแหน่งระยะทาง (Space variable)

$$T = 0 \text{ หรือ } T = T_0(x, y, z) \text{ ที่ } t = 0 \quad (2.13)$$

เงื่อนไขขอบเขตในกระบวนการถ่ายเทความร้อนมี 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้ คือ

(1) กำหนดอุณหภูมิ (Prescribed temperature)

$$T = T_b \text{ ที่ } x = x_b \quad (2.14)$$

เมื่อ  $T_b$  คือ อุณหภูมิคงที่โดยการกำหนดที่ขอบเขต ( $x = x_b$ )

(2) กำหนดฟลักซ์ความร้อน (Prescribed heat flux)

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_b} = q_b \quad (2.15)$$

ถ้าเป็นระนาบที่มีความสมมาตรของรูปร่างและความร้อน,  $q_b = 0$

(3) กำหนดการพาความร้อน

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_b} = h(T_f - T_s) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$T_f$  คือ อุณหภูมิของของไหล

$T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ

(4) กำหนดการแผ่รังสีความร้อน

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_b} = h_r(T_{surr} - T_s) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $T_{surr}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

$h_r$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

โดย  $h_r = \varepsilon \sigma (T_{surr} + T_s)(T_{surr}^2 + T_s^2)$

## 2.7 การคิดความร้อนแฝงจากการแข็งตัว

ความร้อนแฝง คือ ความร้อนที่วัสดุคายออกมาในระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าวัสดุนั้นเป็นโลหะบริสุทธิ์หรือโลหะผสม เนื่องจากโลหะบริสุทธิ์จะแข็งตัวที่อุณหภูมิแข็งตัวคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนโลหะผสมนั้นการแข็งตัวจะอยู่ในลักษณะที่เป็นช่วงของอุณหภูมิ โดยอยู่ระหว่างอุณหภูมิหลิวิดัส (Liquidus temperature) และอุณหภูมิโซลิดัส (Solidus temperature) ซึ่งในช่วงนี้จะมีโลหะที่มีสถานะเป็นของเหลวกับของแข็งอยู่ผสมกัน เรียกว่า มัชชีโซน (Mushy zone) สำหรับโลหะผสมสมการที่เกี่ยวข้องกับความร้อนแฝงสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (2.18)$$

$$\rho \left( C - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (2.19)$$

สำหรับเทคนิคที่จะใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการคิดความร้อนแฝงขณะเกิดการแข็งตัวนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีอาทิเช่น ระเบียบวิธีความจุความร้อนเทียบเท่า ระเบียบวิธีเอนทาลปี แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า ระเบียบวิธีการกู้คืนอุณหภูมิ (Temperature recovery method) [4] เนื่องจากมีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้ได้กับการจำลองการแข็งตัวของทั้งวัสดุที่มีการหลอมตัวแบบคอนกรูเอนต์ (Congruently melting material) และสำหรับโลหะผสมที่มีการแข็งตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ รวมทั้งยังสามารถใช้ได้กับแบบจำลองที่ใช้การคำนวณโดยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง และวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ซึ่งจะมีหลักการดังต่อไปนี้

ระเบียบวิธีการกู้คืนอุณหภูมิจะทำการแปลงค่าความร้อนแฝงให้อยู่ในรูปของค่าองศาเทียบเท่า (Equivalent number of degrees) ด้วยการหารค่าความร้อนแฝงด้วยค่าความจุความร้อน (Specific heat) โดยขั้นตอนการคำนวณเมื่อเข้าสู่อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการแข็งตัวนั้น จะเริ่มต้นด้วยการทำการคำนวณโดยไม่คิดค่าความร้อนแฝง ซึ่งจะใช้สมการถ่ายเทความร้อนที่แสดงข้างล่างมาใช้ในการคำนวณ

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (2.20)$$

และถ้าหากพบว่าภายหลังจากการคำนวณในแต่ละช่วงเวลาถัดไปมีอุณหภูมิลดต่ำลงไปอยู่ในช่วงของการแข็งตัวของโลหะซึ่งจะต้องมีการคายความร้อนแฝงออกมา จะมีการกู้คืนอุณหภูมิกลับโดยทำการชดเชยความร้อนอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการคายความร้อนในขณะแข็งตัวของโลหะ ซึ่งจะทำการชดเชยความร้อนไปจนกระทั่งการแข็งตัวสิ้นสุดลงที่  $f_s = 1.0$  โดยการคายความร้อนแฝง ( $\Delta Q_L$ ) จะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของแข็ง (Solid fraction :  $\Delta f_s$ ) ในช่วงเวลา  $\Delta t$  โดย

$$\Delta Q_L = \rho C_v V \Delta T = \rho Q_L V \Delta f_s \quad (2.21)$$

โดยที่  $f_s = \sum \Delta f_s$

ในการคำนวณจะพิจารณาเป็น 2 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยขั้นตอนที่ 1 จะแสดงกรณีเสมือน (Imaginary case) ซึ่งการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะมีการนำความร้อนแฝงเข้ามาคิดด้วย ส่วนขั้นตอนที่ 2 จะแสดงกรณีที่ไม่นำความร้อนแฝงเข้ามาคิด โดยจะสามารถแสดงความร้อนที่ถูกคายออกมาให้อยู่ในรูปของสมการดังนี้

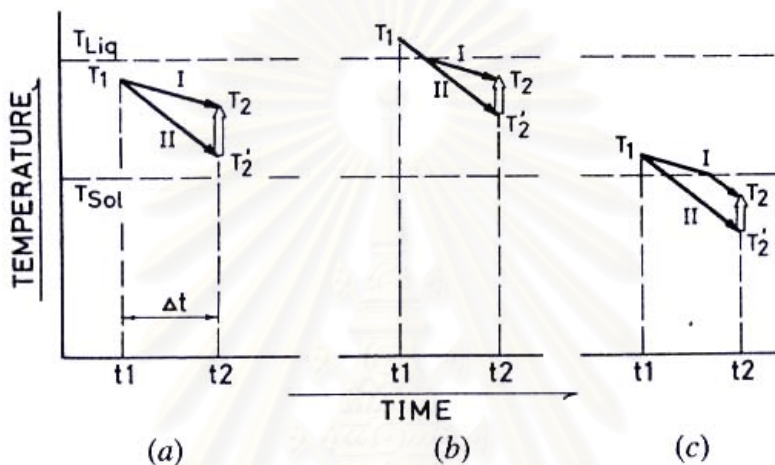
สำหรับขั้นตอนที่ 1



$$Q_{step1} = \int_{t_1}^{t_2} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dt + \Delta Q_s = \int_{T_1}^{T_2} \rho C dT - \int_{T_1}^{T_2} \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} dT \quad (2.22)$$

สำหรับขั้นตอนที่ 2

$$Q_{step2} = \int_{t_1}^{t_2} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dt = \int_{T_1}^{T_2} \rho C dT \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.6 แสดงระเบียบวิธีการกู้คืนอุณหภูมิ [4]

กำหนดให้ความร้อนที่ปล่อยออกมาในขั้นตอนที่ 1 เท่ากับขั้นตอนที่ 2 จะได้

$$\int_{T_1}^{T_2} \rho C dT = \int_{T_1}^{T_2} \rho C dT - \int_{T_1}^{T_2} \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} dT \quad (2.24)$$

ส่วนในกรณี (b) และ (c) ที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.6 นั้นสามารถแสดงออกมาในรูปของความสัมพันธ์

สำหรับกรณี (b)

$$\int_{T_{Liq}}^{T_2} \rho C dT = \int_{T_{Liq}}^{T_2} \rho C dT - \int_{T_{Liq}}^{T_2} \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} dT \quad (2.25)$$

สำหรับกรณี (c)



$$\int_{T_1}^{T_2} \rho C dT = \int_{T_1}^{T_2} \rho C dT - \int_{T_1}^{T_{Sol}} \rho L \frac{df_s}{dT} dT \quad (2.26)$$

## 2.8 วรรณกรรมปริทรรศน์

ปัจจุบัน ได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาทำการคำนวณสร้างแบบจำลองปรากฏการณ์ต่างๆ ของกระบวนการผลิตด้วยการหล่อแบบต่อเนื่องกันอย่างแพร่หลาย และได้มีผู้ทำการศึกษาและนำเสนอแบบจำลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องที่ทำการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์กันอย่างมากมาย เช่น E.A. Mizikar [2] ได้นำสมการการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ มาทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและการแข็งตัวในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องแบบแท่งแบนสำหรับเหล็กกล้า โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการทำนายความหนาของชั้นของแข็งที่มีการแข็งตัวในส่วนของแบบหล่อ รวมทั้งการควบคุมการเย็นตัวในบริเวณที่มีการเย็นตัวด้วยการสเปรย์ (Spray cooling zone) และบริเวณที่มีการเย็นตัวด้วยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation cooling zone), J.K. Brimacombe [5] ได้นำสมการการถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติ มาทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและการแข็งตัวในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องแบบแท่งแบนสำหรับเหล็กกล้า ซึ่งทำการศึกษาค่าความหนาของชั้นของแข็งที่มีการแข็งตัว ณ ตำแหน่งที่ออกจากแบบหล่อทองแดงที่มีความสัมพันธ์กับระยะของแบบหล่อ และความเร็วที่ใช้ในการหล่อ รวมทั้งสภาวะและการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเย็นตัวในบริเวณที่มีการเย็นตัวด้วยการสเปรย์ โดยการใช้อยู่ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบกระบวนการผลิตในส่วนบริเวณแบบหล่อ และบริเวณที่มีการสเปรย์ของเครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง K. Piya [6] และคณะได้นำสมการการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติและ 2 มิติ มาทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องแบบแท่งแบนสำหรับเหล็กกล้า และการหล่อแบบต่อเนื่องแบบแท่ง รวมทั้งได้นำสมการการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติ มาดำเนินการเพื่อที่จะทำการศึกษาค่าการเย็นตัวของโลหะนอกกลุ่มเหล็กไปแล้วเป็นบางส่วน โดยการใช้อยู่ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการทำนายการแข็งตัว และการกระจายตัวของอุณหภูมิของโลหะในกระบวนการผลิตได้

ในส่วนของกระบวนการที่เป็นการหล่อแบบต่อเนื่องให้ได้ขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการก็ได้มีการนำแบบจำลองมาใช้ในการศึกษากระบวนการผลิตในหลายๆ ประเภทด้วยเช่นกัน ดังนี้ R.K. Mallik [7] และคณะได้มีการนำแบบจำลองมาทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลในเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องเหล็กกล้าแผ่นบางประเภทลูกรีดเดี่ยว (Single roll continuous steel strip caster) ซึ่งทำการศึกษาผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิต โดยการใช้อยู่ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งผลที่ได้สามารถทำให้ทราบถึงผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อ

กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต G. Li [8] และคณะได้มีการนำแบบจำลองมา ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการหล่อโลหะแผ่นบางประเภทวงล้อเดี่ยว (Single-wheel thin-strip casting) ซึ่งทำการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในโลหะแผ่นบางขณะแข็งตัว (Solidifying strip) ควบคู่ไปกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวงล้อที่มีการหมุน (Rotating wheel) โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบชัดเจน ซึ่งผลที่ได้สามารถทำให้ทราบถึงผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการที่มีต่อความหนาของชั้นโลหะที่มีการแข็งตัวและการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผลิต

จากตัวอย่างและผลงานวิจัยที่แสดงไว้ข้างต้นชี้ให้เห็นถึงการพัฒนาทางด้านงานวิจัยโดยใช้แบบจำลองเข้ามาช่วยในการศึกษา รวมทั้งประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัยเหล่านี้ จึงเป็นเหตุผลและแรงจูงใจที่ทำให้ต้องมีการใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาทำการศึกษาผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงของ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความแตกต่าง จากกระบวนการที่มีการวิจัยดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



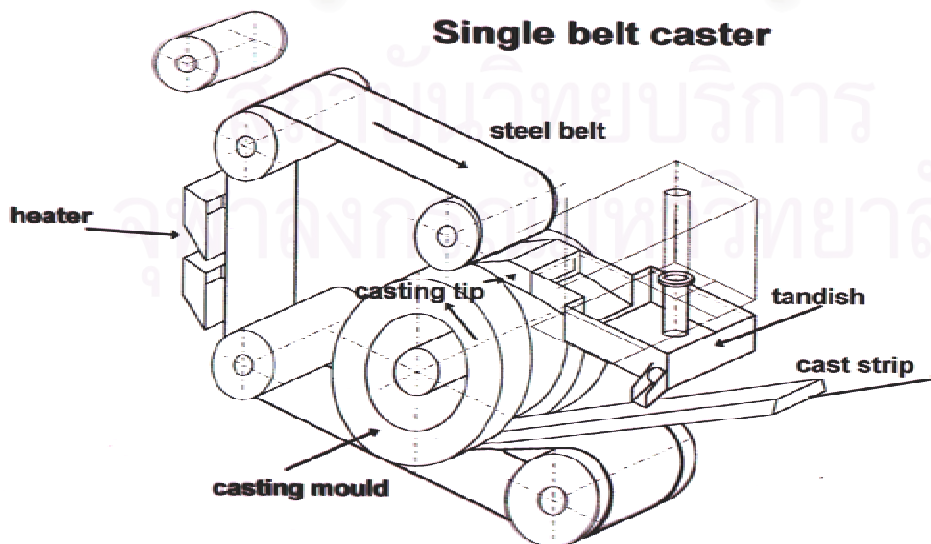
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

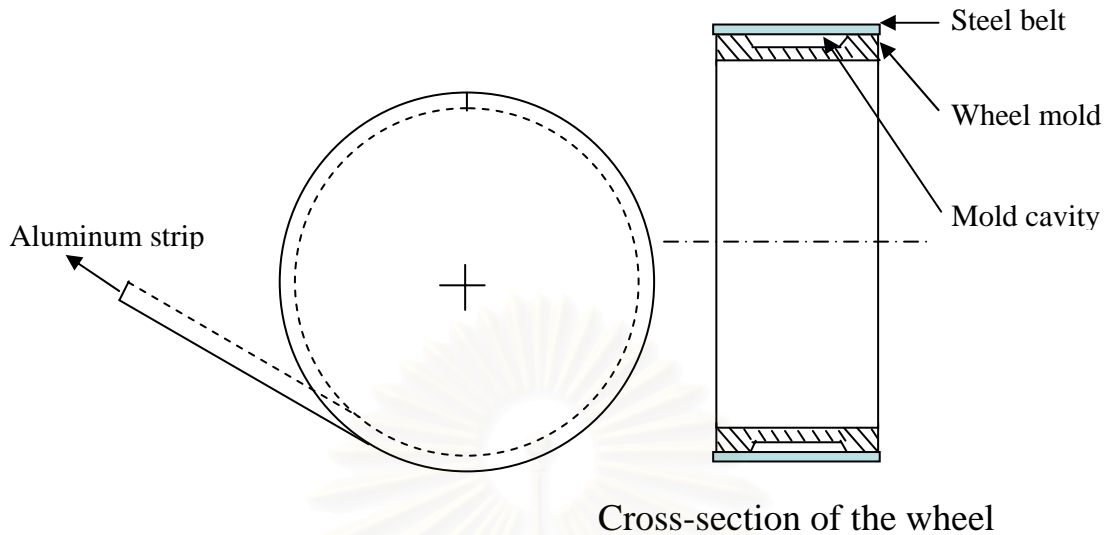
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การประยุกต์ใช้สมการการถ่ายเทความร้อนกับการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/ สายพาน

ในการหล่อโดยเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานนั้น แบบหล่อที่ใช้ในการหล่อจะเป็นวงล้อที่ทำจากเหล็กกล้าละมุนตีขึ้นรูป (Forging mild steel) ซึ่งจะหมุนอยู่ตลอดเวลาและจะมีร่องบากเป็นรูปร่างของชิ้นงานที่จะทำการหล่อในตัวแบบหล่อที่เป็นวงล้อ โดยมีการหล่อเย็นด้วยน้ำที่ผนังด้านในของตัววงล้อ และมีสายพานที่ทำจากเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) ทำหน้าที่ปิดด้านบนของร่องบากและถ่ายเทความร้อนจากโลหะในขณะที่ทำการหล่อ ซึ่งชิ้นงานที่ได้จากการหล่อจะมีลักษณะเป็นโลหะแผ่นบาง (Strip) ดังแสดงภาพจำลองของกระบวนการในรูปที่ 3.1 สำหรับกระบวนการผลิตโดยวิธีนี้นั้น โลหะหลอมเหลวจะถูกป้อนเข้าไปในแบบหล่อที่เป็นร่องบากอยู่ภายในวงล้อและมีสายพานเหล็กปิดอยู่ด้านบน โดยผ่านระบบท่อที่เป็นฉนวนความร้อน (Thermally insulated nozzle system) เมื่อโลหะหลอมเหลวสัมผัสกับแบบหล่อที่มีน้ำหล่อเย็น หรือสายพาน โลหะหลอมเหลวจะเกิดการแข็งตัวเป็นเปลือกของแข็งที่ผิวด้านนอกในขณะที่เดียวกันวงล้อจะหมุนไปเรื่อยๆ และยังคงมีการดึงเอาความร้อนออกจากโลหะหลอมเหลวอยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งโลหะหลอมเหลวแข็งตัวกลายเป็นของแข็งหมด จากนั้นโลหะแผ่นบางที่ได้จะถูกดึงออกไปเพื่อเข้าสู่กระบวนการรีดเพื่อลดขนาดขั้นสุดท้ายต่อไป ส่วนแบบหล่อที่อยู่ในวงล้อก็จะหมุนกลับมายังตำแหน่งเดิมและดำเนินการหล่อแบบต่อเนื่องต่อไป ซึ่งกระบวนการผลิตด้วยวิธีนี้จะเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากเริ่มการผลิตไประยะเวลาหนึ่ง





Cross-section of the wheel

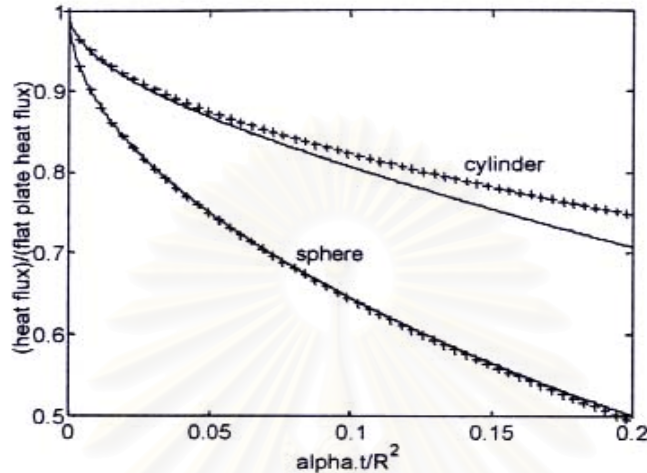
รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานและวงล้อที่ใช้หล่อ

สำหรับการนำสมการการถ่ายเทความร้อนมาประยุกต์ใช้กับการคำนวณการหล่อแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องหล่อประเภทวงล้อ/สายพานนั้น เนื่องจากแบบหล่อมักมีลักษณะเป็นวงล้อ การเขียนสมการในระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical coordinate) จะมีความเหมาะสมที่สุด ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} v_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = k \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.1)$$

แต่เนื่องจากวงล้อที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับความหนาของโลหะแผ่นบางที่ทำการผลิต ดังนั้นการที่จะทำการสมมติให้กระบวนการผลิตดำเนินไปในลักษณะของแท่งงานหล่อที่เป็นแผ่นแบน (Flat plate) หรือการใช้สมการในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน โดยที่ไม่มีผลของความโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อลดความยุ่งยากในขั้นตอนของการคำนวณนั้นก็น่าที่จะสามารถทำได้ นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันได้จากงานวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของความโค้งต่อการนำความร้อนในแนวรัศมี (Radial conduction) ในการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะไม่คงตัว [9] ซึ่งสรุปได้ว่าผลการคำนวณฟลักซ์ความร้อนที่ผิวในลักษณะของโลหะแผ่นแบบกึ่งอนันต์ (Semi-infinite flat plate) ที่ทำการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม เมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่มีการรวมเอาผลกระทบของความโค้งของพื้นผิวเข้ามาคิดด้วยนั้น ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยระเบียบ

วิธีผลต่างสี่เหลี่ยมของโลหะแผ่นแบนจะมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่มีการคิดผลกระทบของความโค้ง เมื่อค่า  $\alpha t/R^2 \rightarrow 0$  ดังแสดงในรูปที่ 3.2

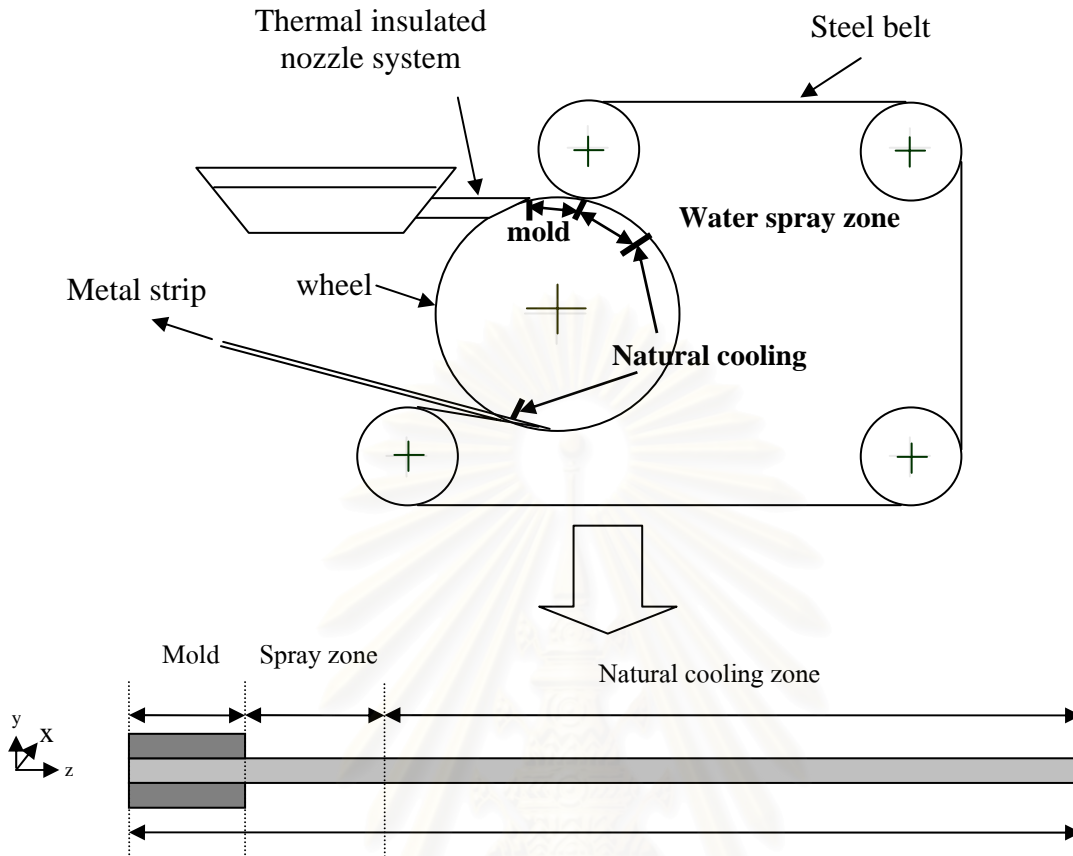


รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบผลจากการคำนวณ โดยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (เส้นทึบ) และ ค่าที่คำนวณจากผลเฉลยแม่นยำตรง (เส้นประ) สำหรับผลกระทบของความโค้ง (Curvature effects) [9]

จากข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานที่จะทำการศึกษา มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.99 m, ค่า  $\alpha$  ของเหล็กมีค่าเท่ากับ  $6.37 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , เวลาทั้งหมดที่โลหะแผ่นบางสัมผัสกับวงล้อเท่ากับ 35 sec เมื่อนำมาคำนวณหาค่า  $\alpha t/R^2$  สำหรับเครื่องจักรที่ใช้ในหล่อสำหรับการคำนวณในงานวิจัยนี้จะได้

$$\begin{aligned} \alpha t/R^2 &= (6.37 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1})(35 \text{ s})/(0.495 \text{ m})^2 \\ &= 9.099 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.2 ค่านี้ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดในการตั้งสมการการถ่ายเทความร้อน โดยใช้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนแทนการตั้งสมการในระบบพิกัดทรงกระบอกนั้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงกระบวนการที่มีการประยุกต์ใช้ในการคำนวณ

ดังนั้นสมการพื้นฐานแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในกระบวนการสามารถพิจารณาให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T - v \rho C_p \frac{\partial T}{\partial z} \tag{3.2}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial z} \tag{3.3}$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของโลหะ

$C_p$  คือ ค่าความจุความร้อน

$k$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน



$T$  คือ อุณหภูมิ

$v$  คือ ความเร็วในการหล่อ

$z$  คือ ทิศทางตามแนวการหล่อ

ในการคำนวณจะทำการคิดการถ่ายเทความร้อนในมิติต่างๆ ของแท่งงานหล่อทั้งในด้านความกว้าง, ด้านความหนา และด้านความยาวตามทิศทางการหล่อ ซึ่งสมมติให้เป็นแกน  $x$ , แกน  $y$  และแกน  $z$  ตามลำดับ เพราะว่าโดยทั่วไปแล้วความเร็วที่ใช้ในการหล่อสำหรับกระบวนการหล่อต่อเนื่องของโลหะนอกกลุ่มเหล็ก เช่น อะลูมิเนียม และทองแดงนั้นจะค่อนข้างช้า และเนื่องจากอะลูมิเนียมและทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการนำความร้อนในทิศทางต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทิศทางการหล่อจึงมีนัยสำคัญและไม่สามารถที่ตัดออกไปจากการคำนวณได้ ซึ่งจะแตกต่างจากกรณีของกระบวนการหล่อต่อเนื่องของเหล็กกล้าที่พจน์การถ่ายเทความร้อนในแนวแกน  $z$  หรือทิศทางการหล่อสามารถตัดออกไปจากการคำนวณได้ และเนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสามมิติสำหรับงานวิจัยนี้ พิกัดของแท่งงานหล่อในการคำนวณจะมีลักษณะของการเคลื่อนที่ (Moving coordinate) ที่มีความเร็วสัมพันธ์กับความเร็วที่ใช้ในการหล่อ จึงเปรียบเสมือนว่ามีการเคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กับความเร็วในการหล่อ ดังนั้นจึงสามารถที่จะทำการตัดพจน์การเคลื่อนที่นี้ออกไปได้ แต่ยังคงมีผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของแท่งงานหล่อดังได้อธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป ซึ่งจะได้อธิบายการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับกระบวนการหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน ดังรูปสมการถ่ายเทความร้อนสามมิติที่อยู่ในสถานะไม่คงตัว (Three-dimensional transient heat transfer equation) ดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

ในการแก้สมการที่ 3.4 ซึ่งอยู่ในรูปของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) โดยสำหรับเงื่อนไขเริ่มต้น ที่เวลา  $t = 0$  กำหนดให้อุณหภูมิของชั้นของน้ำโลหะที่บริเวณเมนิสคัส มีค่าเท่ากับอุณหภูมิเท ( $T_p$ )

$$t = 0, 0 < x < X, 0 < y < Y, 0 < z < Z, T(x, y, z) = T_p \quad (3.5)$$

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณแกนสมมาตร ถือว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อน



$$x = X / 2, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (3.6)$$

$$y = Y / 2, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.7)$$

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวด้านนอก กำหนดโดยสมการดังนี้

$$x = 0, -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = q_0 \quad (3.8)$$

$$y = 0, -k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} = q_0 \quad (3.9)$$

$$z = 0, -k \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad (3.10)$$

$$z = Z, -k \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=Z} = 0 \quad (3.11)$$

เมื่อ  $q_0$  คือ ปริมาณความร้อนที่ผิว ซึ่งในการคำนวณจะใช้เงื่อนไขขอบเขตที่อยู่ในรูปของสมการของนิวตัน (Newton's law of cooling) โดยที่  $q_0 = h\Delta T$  ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละส่วนของกระบวนการ

### 3.2 เทคนิคสำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสามมิติที่อยู่ในสถานะไม่คงตัว

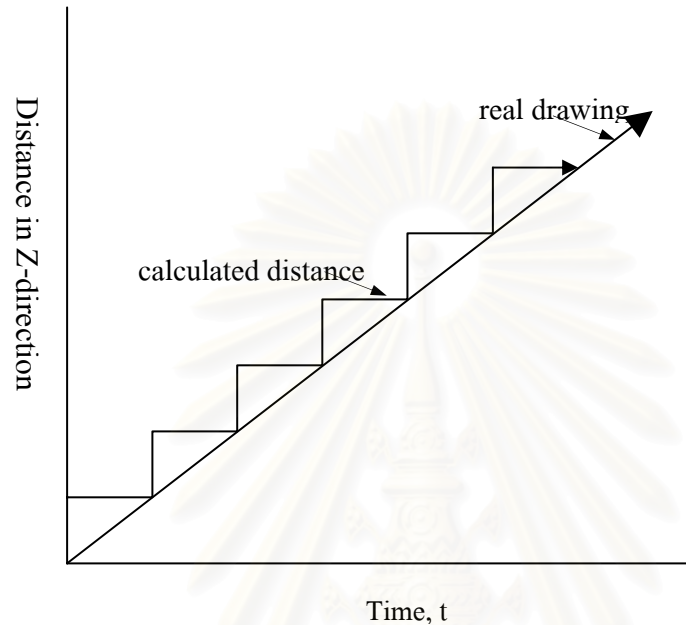
สำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนสามมิติในสถานะไม่คงตัวที่ขึ้นอยู่กับเวลา จะทำการคำนวณโดยพิจารณาว่าพลังงานหล่อมีการเคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางการหล่อระยะสั้นๆ ระยะเวลาหนึ่งแล้วหยุดอยู่กับที่ชั่วขณะหนึ่ง จากนั้นจะทำการคำนวณหาอุณหภูมิของแต่ละเอลิเมนต์ในแนวแกน  $x$ , แนวแกน  $y$  และแนวแกน  $z$  โดยใช้ช่วงเวลาในการคำนวณที่มีค่าเท่ากับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ไปของพลังงานหล่อในแนวแกน  $z$  ด้วยความเร็วที่สัมพันธ์กันกับความเร็วในการหล่อดังแสดงได้ตามสมการข้างล่างดังนี้

$$z = vt \quad (3.12)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$dz = vdt \quad (3.13)$$

โดยที่  $v$  คือ ความเร็วในการหล่อ



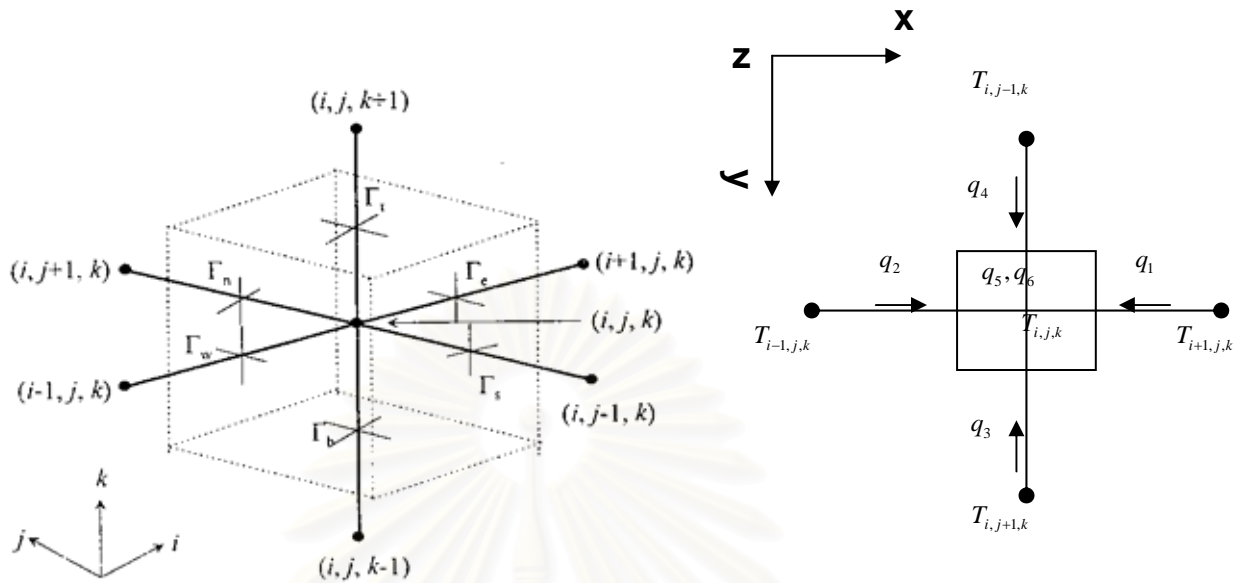
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนจริงของแท่งงานหล่อกับการเคลื่อนที่ที่มีการประยุกต์ใช้ในการคำนวณ

จากนั้นแท่งงานหล่อจะมีการเคลื่อนที่ต่อไปในทิศทางการหล่อและทำการคำนวณเวลาซ้ำเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าจะสิ้นสุดการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าการคำนวณจะมีความใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่จริงของแท่งงานหล่อเมื่อระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของแท่งงานหล่อและช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละช่วงมีระยะสั้นๆ ซึ่งจากวิธีการข้างต้นนี้ทำให้สามารถที่จะทำการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสามมิติที่อยู่ภายใต้สภาวะไม่คงตัวนี้ได้

### 3.3 การดูแลความร้อนในสามมิติ

จากสมการพื้นฐานที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณสำหรับกระบวนการหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน ซึ่งอยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้คือ

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.5 แสดงเอลิเมนต์ในการคำนวณสำหรับการถ่ายความร้อนในสามมิติด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง

ในการคำนวณจะทำการแบ่งย่อยแบ่งงานหล่อออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยกำหนดให้เอลิเมนต์ที่จะทำการดูความร้อนในสามมิติ มีระยะในแนวแกน  $x$  เท่ากับ  $\Delta x$ , ระยะในแนวแกน  $y$  เท่ากับ  $\Delta y$  และระยะในแนวแกน  $z$  เท่ากับ  $\Delta z$  ซึ่งภายในเอลิเมนต์นี้จะมีอุณหภูมิ สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อน (Thermo-physical property) ที่เท่ากันทุกบริเวณ ในการดูความร้อนจะทำการพิจารณาปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าเอลิเมนต์และออกจากเอลิเมนต์ในแต่ละทิศทางทั้งในแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  จะได้ปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าและออกจากเอลิเมนต์ดังแสดงในสมการข้างล่าง

$$q_1 = k \frac{(T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k})}{\Delta x} (\Delta y \Delta z) \quad q_2 = k \frac{(T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k})}{\Delta x} (\Delta y \Delta z)$$

$$q_3 = k \frac{(T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k})}{\Delta y} (\Delta x \Delta z) \quad q_4 = k \frac{(T_{i,j-1,k} - T_{i,j,k})}{\Delta y} (\Delta x \Delta z)$$

$$q_5 = k \frac{(T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k})}{\Delta z} (\Delta x \Delta y) \quad q_6 = k \frac{(T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k})}{\Delta z} (\Delta x \Delta y)$$

จะได้สมการถ่ายเทความร้อนดังนี้ คือ

$$\rho C_p (\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\Delta T}{\Delta t} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (3.15)$$

และกำหนดให้  $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$  ,  $\Delta T = T_{i,j,k}^{t+\Delta t} - T_{i,j,k}^t$

ดังนั้นจึงสามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของ

$$T_{i,j,k}^{t+\Delta t} = \left( 1 - \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} - \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} - \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} - \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} - \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} - \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} \right) T_{i,j,k}^t \quad (3.16)$$

$$+ \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} T_{i+1,j,k}^t + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} T_{i-1,j,k}^t + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} T_{i,j+1,k}^t + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta y)^2} T_{i,j-1,k}^t + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} T_{i,j,k+1}^t + \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2} T_{i,j,k-1}^t$$

จากการคูณความรู้อเราจะได้สมการถ่ายเทความร้อนที่จะสามารถคำนวณหาอุณหภูมิที่เวลาใดๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่อยู่ ในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียนที่มีมิติ x, y และ z ได้ถ้าทราบอุณหภูมิข้างเคียงของ เอลิเมนต์นั้นในช่วงเวลาการคำนวณก่อนหน้านั้น และค่าสมบัติทางความร้อนต่างๆ ของโลหะที่จะใช้ในการคำนวณ

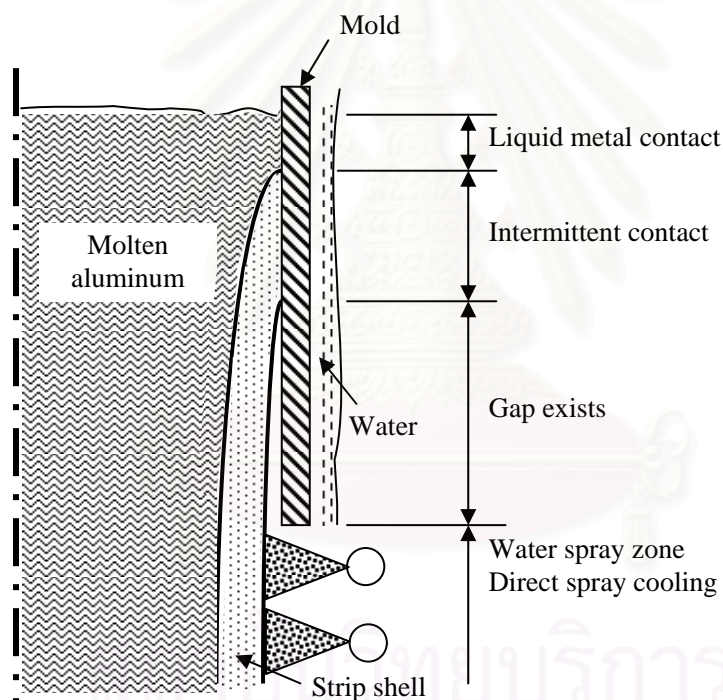
### 3.4 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการหล่อแบบต่อเนื่องประเภท วงล้อ/สายพาน

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้ จะทำการ กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นเป็นอุณหภูมิเทที่ใช้ในการผลิตจริง ส่วนเงื่อนไขขอบเขตจะทำการประยุกต์ใช้ค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิว (Interface heat transfer coefficient: h) เพื่อใช้ในการ คำนวณหาปริมาณความร้อนที่ผิวที่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นบริเวณระหว่างผิวด้านนอกของแท่งงาน หล่อกับแบบหล่อ บริเวณที่มีการสเปรย์ด้วยน้ำ และบริเวณที่มีการเย็นตัวในอากาศ ซึ่งในการคำนวณจะ กำหนดให้มีบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนหลักๆ ดังต่อไปนี้ คือ บริเวณแบบหล่อ, บริเวณที่มีการสเปรย์ ด้วยน้ำ และบริเวณที่มีการเย็นตัวในอากาศ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวที่ใช้ใน การคำนวณเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้ จะกำหนดให้มีค่าที่แตกต่างกันไป ซึ่งจะแสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแท่งงานหล่อกับบริเวณที่มี

การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อที่จะทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในกระบวนการผลิตต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งงานหล่อ และพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียม จะทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่จะใช้ในการศึกษาโดยแบ่งออกเป็นกรณีต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 3.4.1 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 1

ในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งงานหล่อด้วยการสเปรย์น้ำโดยตรงไปยังแท่งงานหล่อ ภายหลังจากแท่งงานหล่อก็มีการเคลื่อนที่ออกจากแบบหล่อ เพื่อที่จะจำลองรูปแบบการศึกษาที่ใกล้เคียงกับการยื่นตัวในลักษณะของการหล่อแบบไดเรกชิลล์และการหล่อแบบลูกรีดคู่ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6



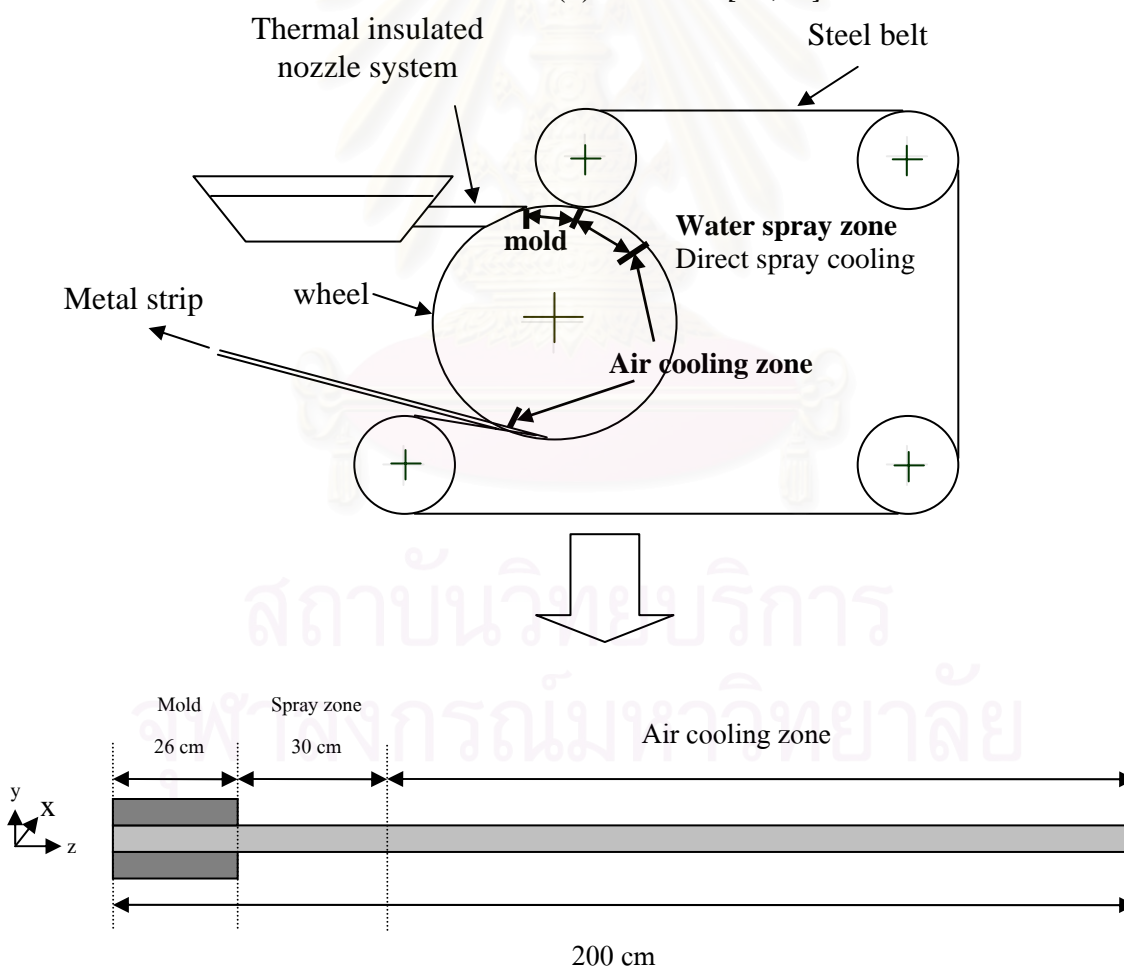
รูปที่ 3.6 อธิบายการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 1

โดยมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3.1 และบริเวณการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการหล่อต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 1

Location	Case 1a high $H_m$	Case 1b low $H_m$
Mold	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $T \geq T_1 ; H_m = 1673.6$ $T_s \leq T < T_1 ; H_m = 1046$ $T < T_s ; H_m = 836.8$	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $H_m = 418.4$
Spray zone	$q = h(T - T_w)$ $h = 20920$	$q = h(T - T_w)$ $h = 20920$
Air cooling zone	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 418.4$	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 418.4$

\*Effective heat transfer coefficient (h):  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  [10,11]

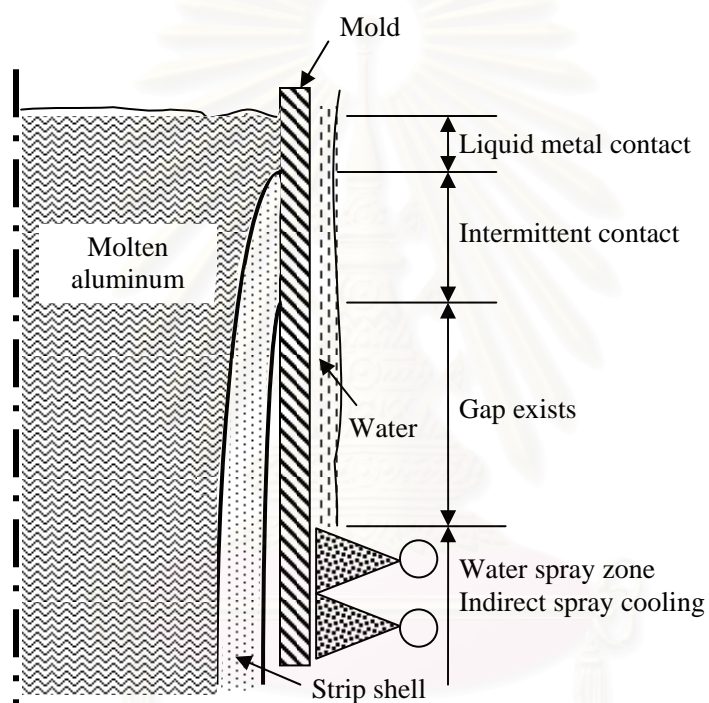


รูปที่ 3.7 แสดงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 1



### 3.4.2 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 2

ในกรณีสำหรับเครื่องหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานที่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งงานหล่อซึ่งไม่ได้มีการสเปรย์น้ำโดยตรงไปที่แท่งงานหล่อแต่จะสเปรย์น้ำเพื่อหล่อเย็นให้กับผิวด้านนอกของแบบหล่อภายหลังจากแท่งงานหล่อเคลื่อนที่ออกจากแบบหล่อ ซึ่งใกล้เคียงกับการทำงานในกระบวนการผลิตจริงมากกว่ากรณีก่อนหน้านี้ ซึ่งเครื่องหล่อประเภทนี้จะทำการหล่อเย็นด้วยน้ำให้กับผิวด้านนอกของแบบหล่อ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.8



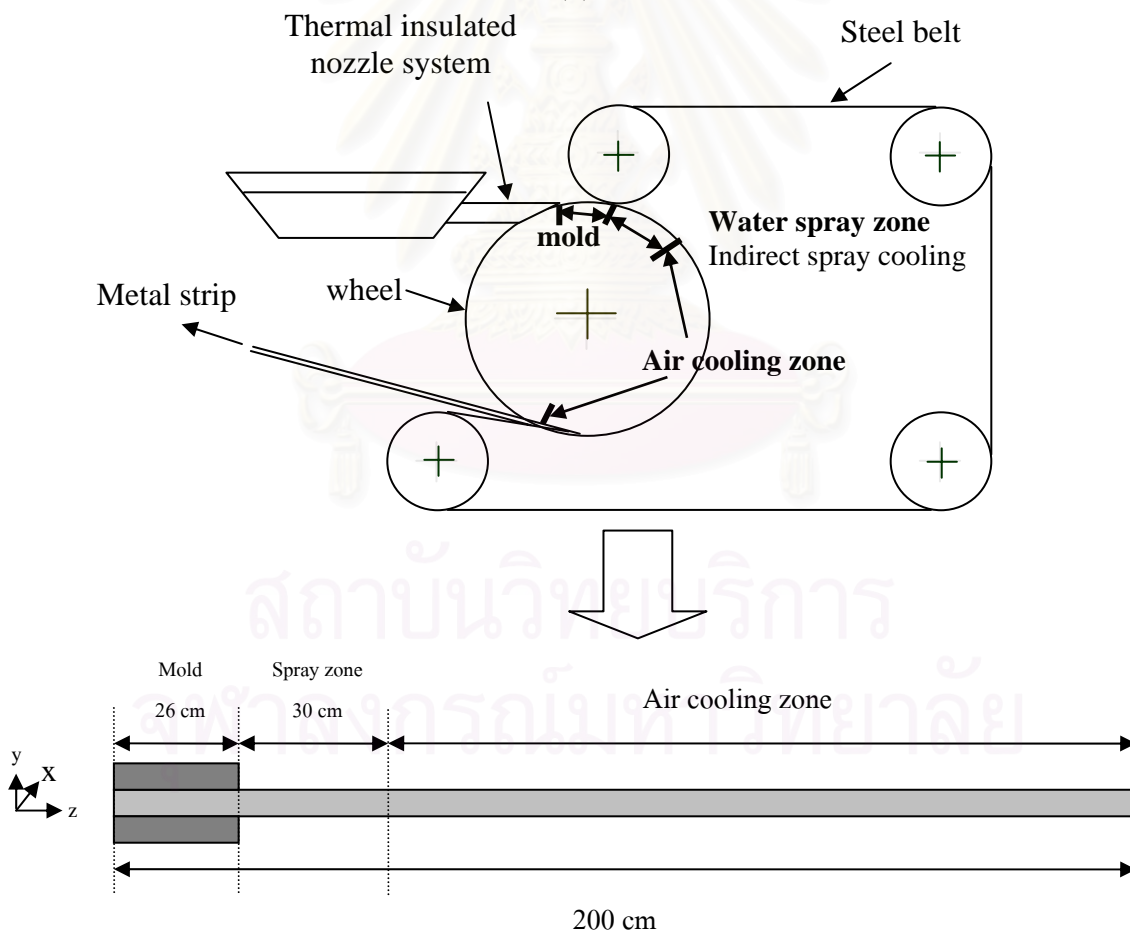
รูปที่ 3.8 อธิบายการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 2

โดยมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3.2 และบริเวณการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการหล่อต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 2

Location	Case 2a high $H_m$	Case 2b low $H_m$
Mold	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $T \geq T_1 ; H_m = 1673.6$ $T_s \leq T < T_1 ; H_m = 1046$ $T < T_s ; H_m = 836.8$	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $H_m = 418.4$
Spray zone	$q = h(T - T_w)$ $h = 836.8$	$q = h(T - T_w)$ $h = 836.8$
Air cooling zone	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 209.2$	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 209.2$

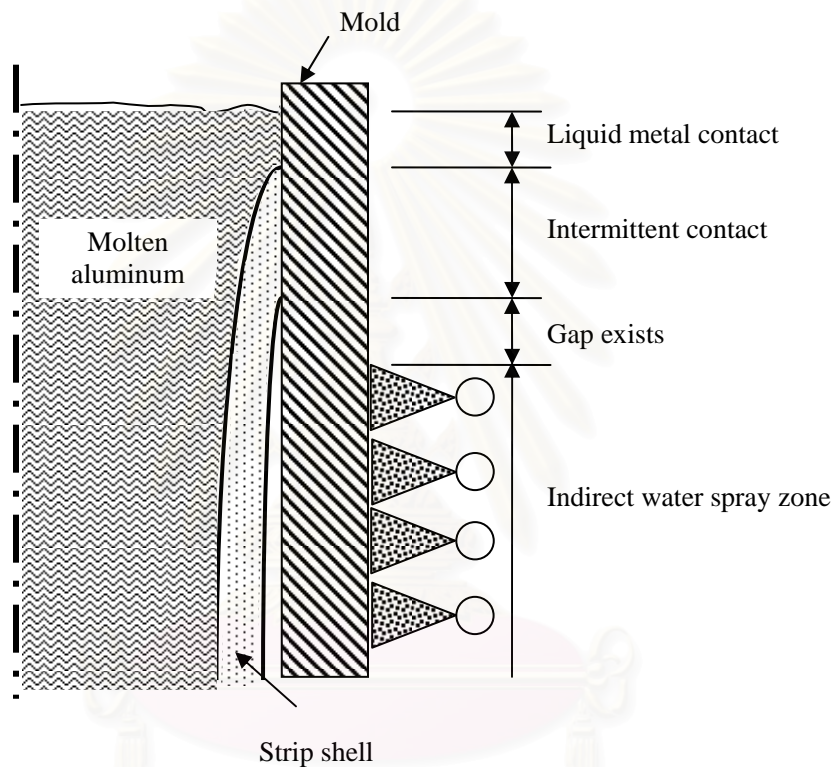
\*Effective heat transfer coefficient (h):  $Wm^{-2}K^{-1}$  [10,11]



รูปที่ 3.9 แสดงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 2

### 3.4.3 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 3

ในกรณีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานจริงในกระบวนการผลิตของเครื่องหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน และได้มีการนำข้อมูลเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตจริงมาใช้ในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงจากกระบวนการผลิตเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.10



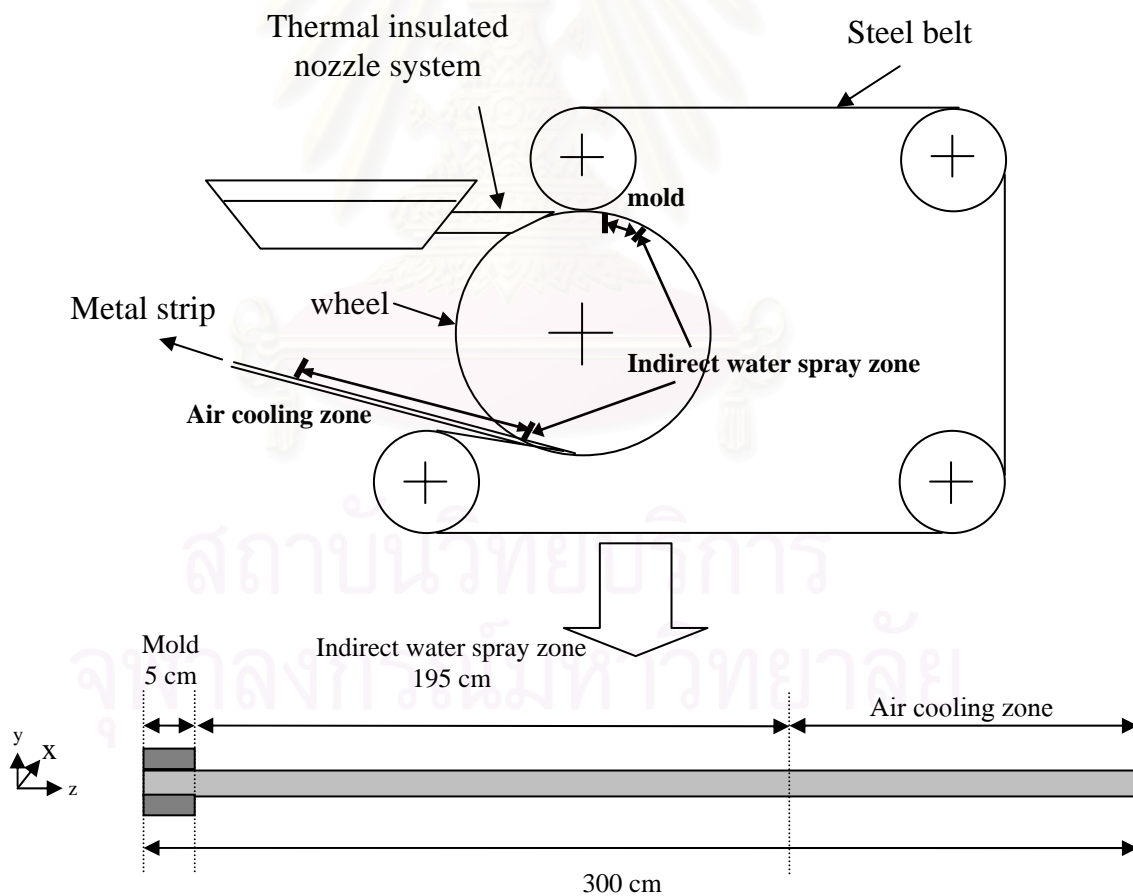
รูปที่ 3.10 อธิบายการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 3

โดยมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3.3 และบริเวณการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการหล่อต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 3

Location	Case 3a high $H_m$	Case 3b high $H_m$ , low $H_s$	Case 3c low $H_m$ , low $H_s$
Mold	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $T \geq T_1$ ; $H_m = 1673.6$ $T_s \leq T < T_1$ ; $H_m = 1046$ $T < T_s$ ; $H_m = 836.8$	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $T \geq T_1$ ; $H_m = 1673.6$ $T_s \leq T < T_1$ ; $H_m = 1046$ $T < T_s$ ; $H_m = 836.8$	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $H_m = 418.4$
Spray zone	$q = h(T - T_w)$ $h = 836.8$	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 209.2$	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 209.2$
Air cooling zone	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 209.2$	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 41.84$	$q = h(T - T_{\text{air}})$ $h = 209.2$

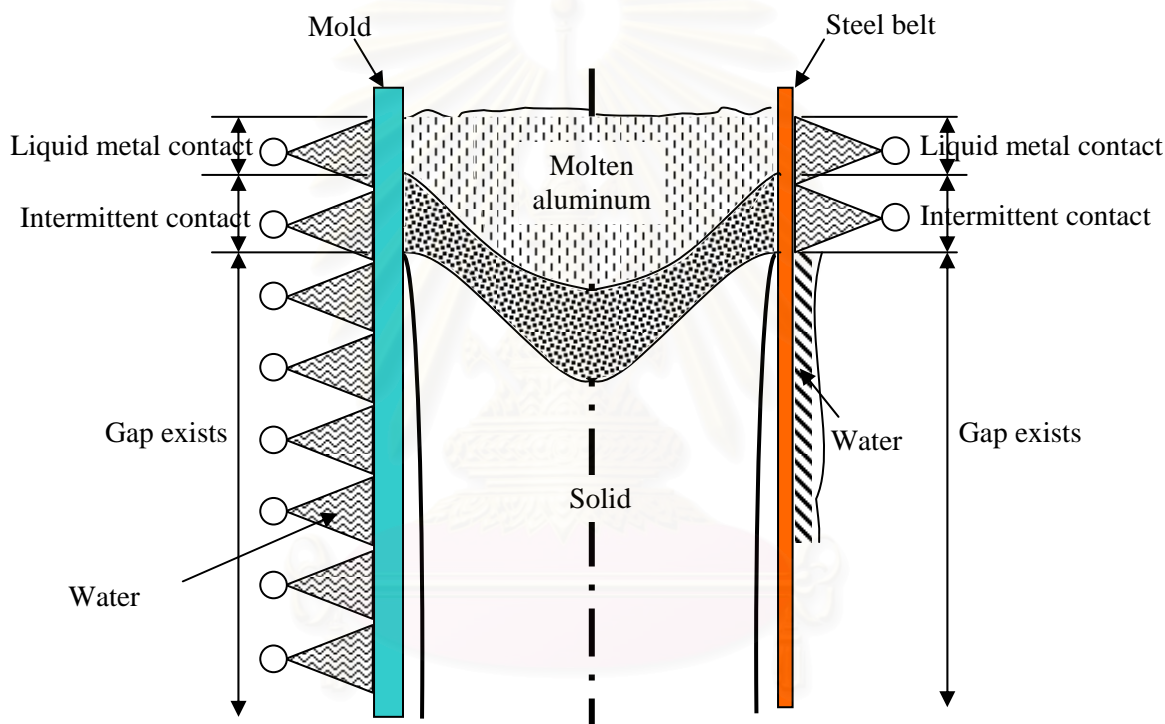
\*Effective heat transfer coefficient ( $h$ ):  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  [10,11]



รูปที่ 3.11 แสดงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 3

### 3.4.4 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 4

ในกรณีที่มีความไม่สมมาตรของการถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งงานหล่อของเครื่องหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน โดยในความเป็นจริงโลหะอะลูมิเนียมที่ทำการหล่อด้วยเครื่องหล่อประเภทนี้จะถูกถ่ายเทความร้อนออกไปยังแบบหล่อที่มีความแตกต่างกันอยู่ 2 ด้าน คือ ด้านที่เป็นวงล้อ และด้านที่เป็นสายพาน พร้อมทั้งนำข้อมูลและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตจริงมาใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



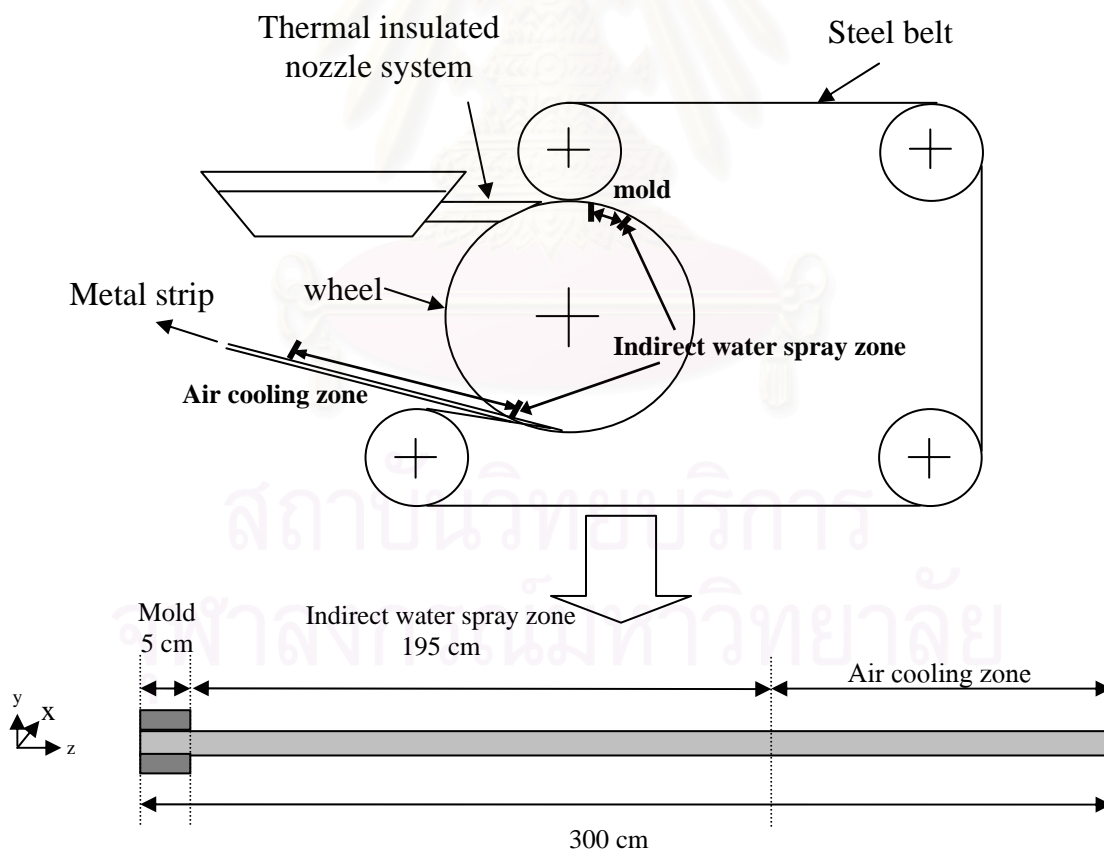
รูปที่ 3.12 อธิบายการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 4

โดยมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3.4 และบริเวณการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการหล่อต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 4

Location	Case 4	
	Wheel side high $H_m$	Belt side low $H_m$
Mold	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $T \geq T_1$ ; $H_m = 1673.6$ $T_s \leq T < T_1$ ; $H_m = 1046$ $T < T_s$ ; $H_m = 836.8$	$q_{\text{mold}} = H_m(T - T_w)$ $H_m = 418.4$
Spray zone	$q = h(T - T_w)$ $h = 209.2$	$q = h(T - T_w)$ $h = 209.2$
Air cooling zone	$q = h(T - T_w)$ $h = 41.84$	$q = h(T - T_w)$ $h = 41.84$

\*Effective heat transfer coefficient ( $h$ ):  $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  [10,11]



รูปที่ 3.13 แสดงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณสำหรับเงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 4



### 3.5 สมบัติทางความร้อนที่ใช้ในการคำนวณ

ค่าสมบัติทางความร้อนต่างๆ ของโลหะอะลูมิเนียมที่ใช้ในการคำนวณ [12] ได้แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติทางความร้อนที่ใช้ในการคำนวณ

Properties	Values
Thermal conductivity (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	110, T ≥ T <sub>i</sub> ; 170, T <sub>s</sub> < T < T <sub>i</sub> ; 234, T ≤ T <sub>s</sub>
Specific heat (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	900
Density (kg m <sup>-3</sup> )	2390, T ≥ T <sub>i</sub> ; 2705, T < T <sub>i</sub>
Temperature (°C)	Liquidus T <sub>l</sub> 660, Solidus T <sub>s</sub> 659
Latent heat (kJ kg <sup>-1</sup> )	398

### 3.6 การคิดความร้อนแฝงจากการแข็งตัว

ในงานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีความจุความร้อนเทียบเท่า (Equivalent specific heat method) ร่วมกับระเบียบวิธีการกู้คืนอุณหภูมิ (Temperature recovery method) มาแก้ปัญหาในการคำนวณค่าความร้อนแฝงขณะเกิดการแข็งตัวในช่วงระหว่างที่มีการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวไปเป็นของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมเพื่อช่วยให้การคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อคิดค่าความร้อนแฝงที่เกี่ยวข้องสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3.17)$$

$$\rho \left( C - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (3.18)$$

จากสมการข้างต้นกำหนดให้

$$C_E = C - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \quad (3.19)$$

สำหรับการคำนวณในงานวิจัยนี้จะสมมติให้การคายความร้อนแฝงในช่วงขณะที่มีการแข็งตัวจากโลหะหลอมเหลวไปเป็นของแข็งตลอดช่วงอุณหภูมิวิกฤต และอุณหภูมิโซลิดัส มีการกระจายตัวในรูปแบบเชิงเส้นตรงดังสมการข้างล่าง

$$-L \frac{\partial f_s}{\partial T} = \frac{\Delta H}{T_L - T_S} \quad (3.20)$$

ดังนั้นจะได้

$$C_E = C + \frac{\Delta H}{T_L - T_S} \quad (3.21)$$

สำหรับขั้นตอนของการคำนวณจะเริ่มต้นด้วยการคำนวณโดยไม่คิดค่าความร้อนแฝงซึ่งจะใช้สมการดังนี้ คือ

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (3.22)$$

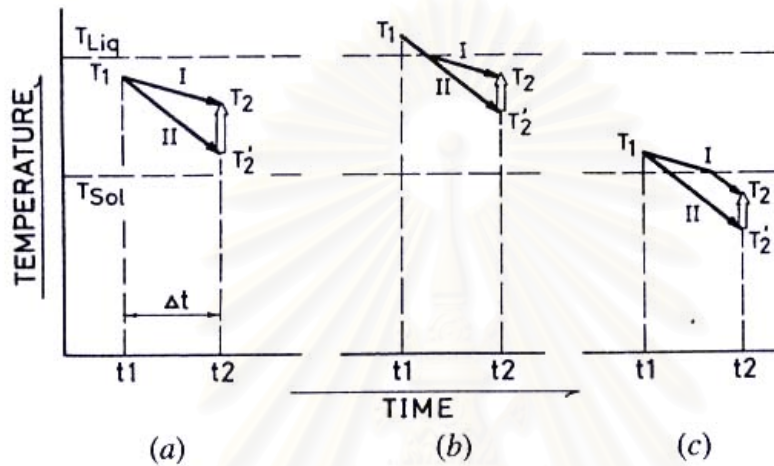
และถ้าหากพบว่าภายหลังจากการคำนวณในแต่ละช่วงเวลาถัดไปมีอุณหภูมิลดต่ำลงไปอยู่ในช่วงของการแข็งตัวของโลหะซึ่งจะมีการคายความร้อนแฝงออกมา จะมีการกู้อุณหภูมิกลับโดยทำการชดเชยความร้อนอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากการคายความร้อนในขณะที่แข็งตัวของโลหะโดยจะใช้สมการที่ 3.17 ในการคำนวณ ซึ่งจะทำการชดเชยความร้อนไปจนกระทั่งการแข็งตัวสิ้นสุดลงที่  $f_s = 1.0$  โดยการคายความร้อนแฝง ( $\Delta Q_L$ ) จะสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของแข็ง (Solid fraction :  $\Delta f_s$ ) ในช่วงเวลา  $\Delta t$  โดย

$$\Delta Q_L = \rho C_v V \Delta T = \rho Q_L V \Delta f_s \quad (3.23)$$

โดยที่  $f_s = \sum \Delta f_s$

การคำนวณจะพิจารณาเป็น 2 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งจะสามารถแสดงปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาให้อยู่ในรูปของสมการด้านล่าง โดยจะยกตัวอย่างในกรณี (a) มาแสดงการคิดดังนี้ สำหรับขั้นตอนที่ 1

$$Q_{step1} = \int_{T_1}^{T_2} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dt = \int_{T_1}^{T_2} \rho C dT \quad (3.24)$$



รูปที่ 3.14 แสดงระเบียบวิธีการกึ่งอินอุณหภูมิตั้งแรก [4]

สำหรับขั้นตอนที่ 2

$$Q_{step2} = \int_{T_1}^{T_2} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dt + \Delta Q_s = \int_{T_1}^{T_2} \rho C dT - \int_{T_1}^{T_2} \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} dT \quad (3.25)$$

กำหนดให้ความร้อนที่ปล่อยออกมาในขั้นตอนที่ 1 เท่ากับขั้นตอนที่ 2 จะได้

$$\int_{T_1}^{T_2} \rho C dT = \int_{T_1}^{T_2} \rho C dT - \int_{T_1}^{T_2} \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T} dT \quad (3.26)$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\int_{T_1}^{T_2} \rho C dT = \int_{T_1}^{T_2} \rho \left( C - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) dT \quad (3.27)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \rho C dT = \int_{T_1}^{T_2} \rho C_E dT \quad (3.28)$$

$$\rho C(T_2' - T_1) = \rho C_E(T_2 - T_1) \quad (3.29)$$

$$T_2 = T_1 + \frac{\rho_{T_1} C_{T_1}}{\rho_{T_2} C_E} \times (T_2' - T_1) \quad (3.30)$$

จากสมการที่ 3.30 จะทำให้อุณหภูมิที่คำนวณได้ถูกปรับแก้ให้มีอุณหภูมิที่ถูกต้องด้วยการคิดค่าความร้อนแฝงของการแข็งตัวของโลหะที่ปล่อยออกมาขณะอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวมาเป็นของแข็งมาทำการพิจารณาในการคำนวณด้วย

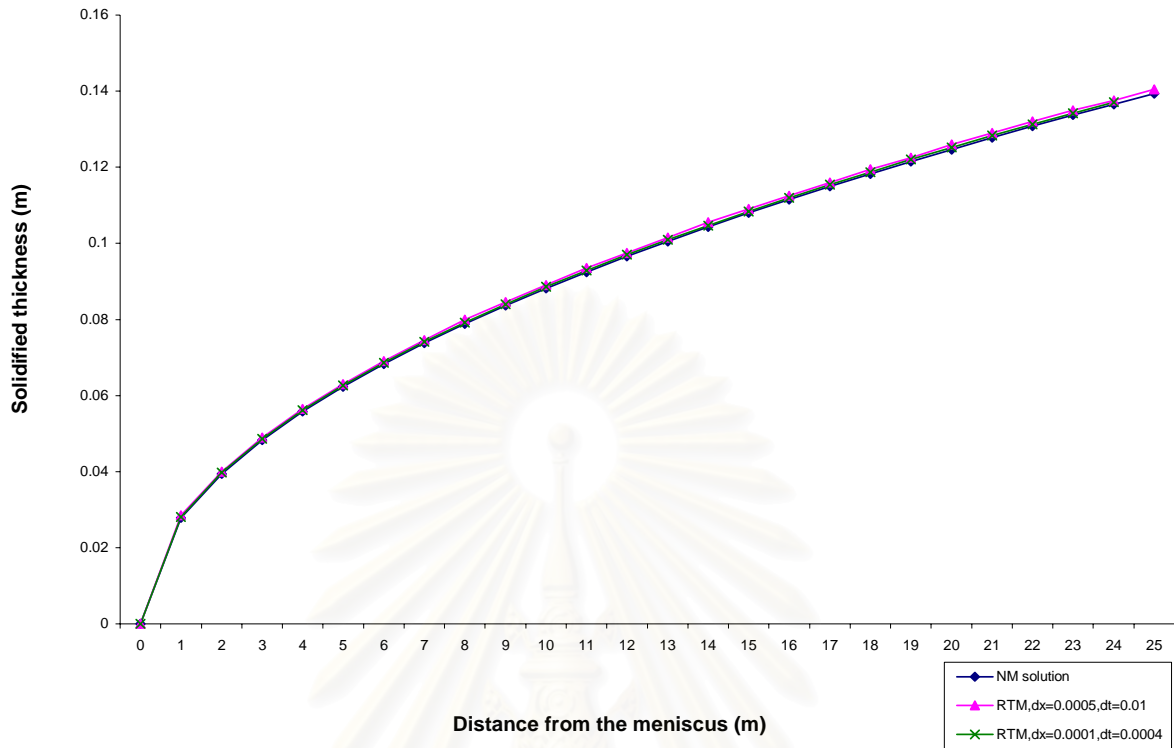
### 3.7 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณของโปรแกรมนี้ เบื้องต้นได้มีการนำผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติที่คำนวณด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องไปทำการเปรียบเทียบกับผลเฉลยของนอยแมนน์ (Neumann's solution) ซึ่งเป็นผลเฉลยแม่นยำตรงของการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติ [13] จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 ซึ่งค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบผลในเบื้องต้นได้นำเอาค่าตัวแปรซึ่งเป็นสมบัติของเหล็กดังแสดงในตารางที่ 3.6 มาใช้ในการคำนวณ

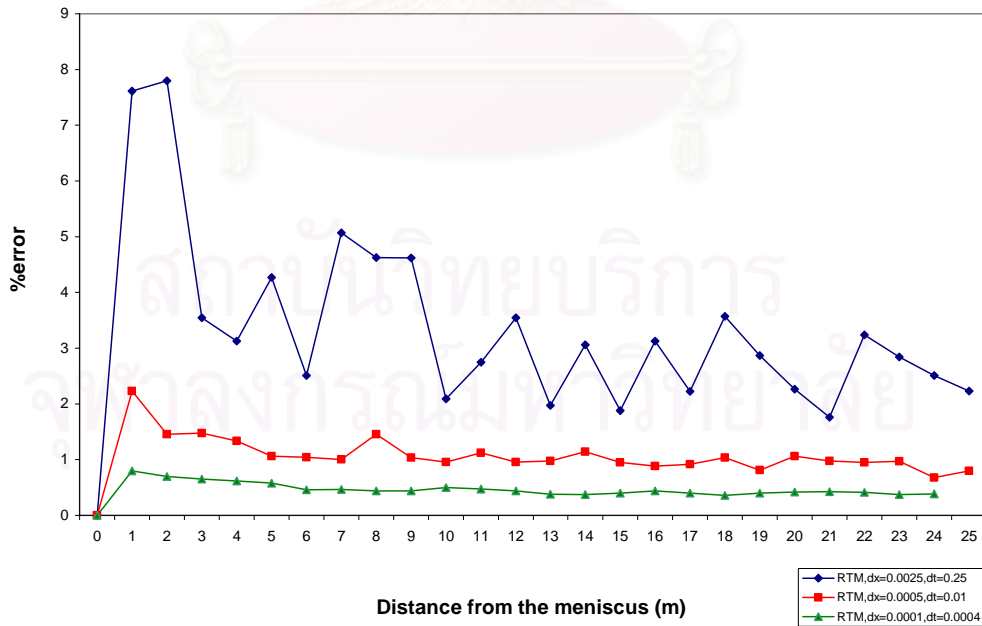
ตารางที่ 3.6 แสดงสมบัติของเหล็กและเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณ [13]

Thermal conductivity	$k = 33 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Density	$\rho = 7400 \text{ kg m}^{-3}$
Specific heat	$C_p = 700 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Latent heat	$\Delta H = 260 \text{ kJ kg}^{-1}$
Temperature	$T_1 = T_s = 1536 \text{ }^\circ\text{C}$

อีกทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้มีประสิทธ์ขึ้นมาก่อนหน้านี้ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของตัวโปรแกรมโดยการนำไปคำนวณในการจำลองการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติของการหล่อแบบต่อเนื่องแบบแท่งแบนที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน 0.1% C ขนาดความหนา 250 มิลลิเมตร โดยมีอุณหภูมิในการเท  $1530 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่ความเร็วในการหล่อเท่ากับ 0.65 เมตร/นาทื เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้ในรูปที่ 3.17 ซึ่งแสดงการเย็นตัวของตำแหน่งต่างๆ ในชิ้นงานกับรูปที่ 3.18 ซึ่งแสดงผลการทดลองจากงานวิจัยที่นำมา

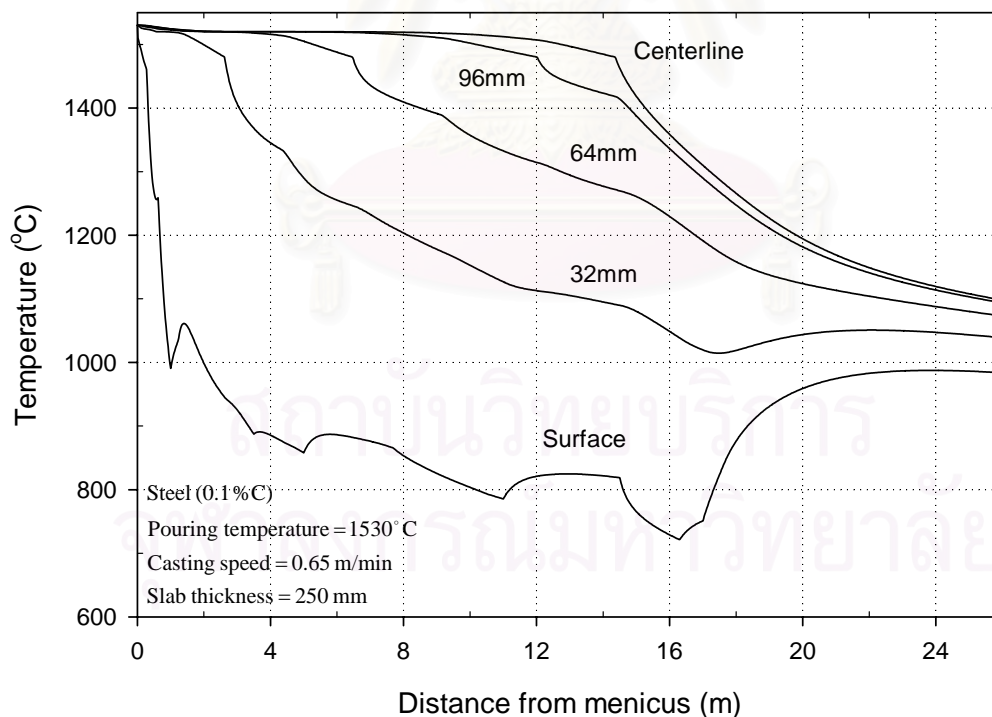


รูปที่ 3.15 แสดงผลการคำนวณของโปรแกรมการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติเปรียบเทียบกับผลเฉลย



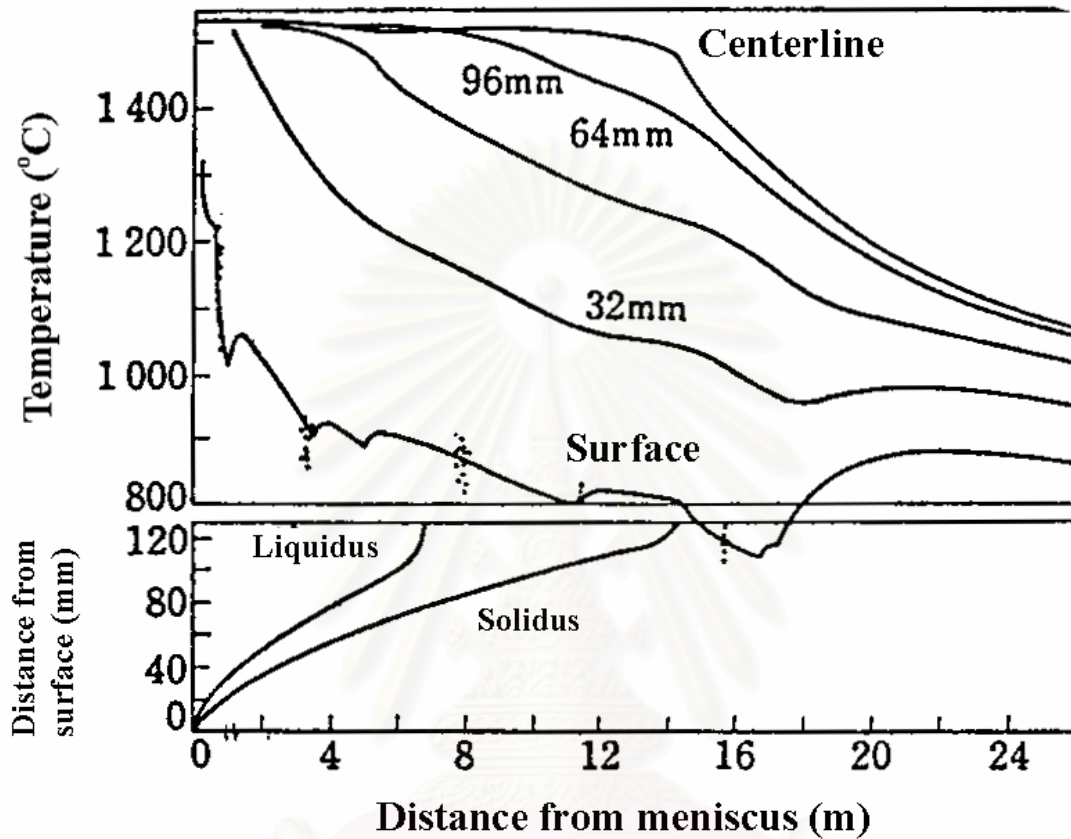
รูปที่ 3.16 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่ความละเอียดของระยะมิติ ( $\Delta x$ ) และช่วงเวลา ( $\Delta t$ ) ที่ต่างๆ กัน

อ้างอิงที่มีการทดลองยืนยัน พบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก [6,12] โดยอุณหภูมิที่ผิวที่คำนวณได้อยู่ในช่วงที่วัดได้จริงจากการผลิตจริงในโรงงาน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมาสามารถใช้งานจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในการจำลองการหล่อแบบต่อเนื่องที่คิดการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติได้ และเนื่องจากวิธีการคิดการถ่ายเทความร้อนในสองมิติและสามมิติมีหลักการในการประดิษฐ์เหมือนกันคือใช้สมการพื้นฐานในการคำนวณเหมือนกันกับการคิดในหนึ่งมิติ และมีระเบียบวิธีคิดในการคำนวณเหมือนกันจึงสามารถเทียบความน่าเชื่อถือได้แบบเดียวกัน ดังนั้นจึงได้นำโปรแกรมการคิดการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติซึ่งใช้ในการคำนวณสำหรับการหล่อต่อเนื่องแบบแท่งแบนของเหล็กมาพัฒนาต่อเนื่องเป็นโปรแกรมคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสามมิติซึ่งจะประยุกต์ใช้ในการคำนวณสำหรับกระบวนการหล่อต่อเนื่องของโลหะอะลูมิเนียมที่จะใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ และในขณะเดียวกันเมื่อต้องการนำโปรแกรมคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสามมิติที่ได้ มาลดรูปสมการสำหรับการทำการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติก็จะให้ผลที่ดีดังเช่นผลการเปรียบเทียบที่แสดงข้างต้น



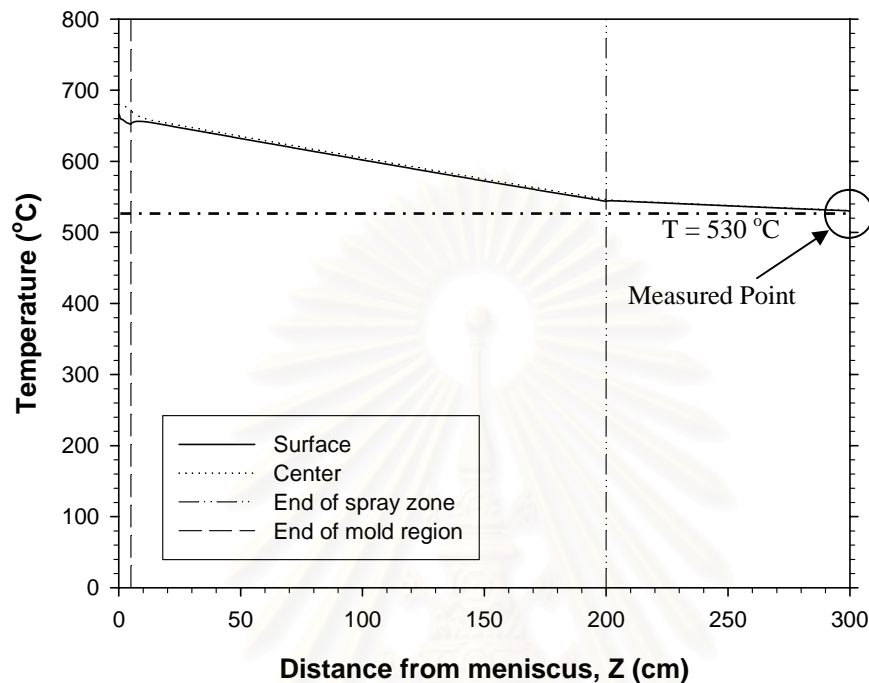
รูปที่ 3.17 แสดงการเขียนตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ในชิ้นงานที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม [6]





รูปที่ 3.18 แสดงผลการคำนวณจากงานวิจัยที่มีการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

นอกจากนี้ยังได้มีการนำโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสามมิติดังกล่าวมาทำการคำนวณ โดยใช้ข้อมูลและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตจริงจากโรงงานเพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับอุณหภูมิที่ผิวของแท่งงานหล่ออะลูมิเนียมที่วัดได้จริงจากการผลิตจริงในโรงงาน ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการผลิตจริงในโรงงาน จะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกันมาก รูปที่ 3.19 ซึ่งยืนยันได้ว่าโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในสามมิติที่อยู่ในสถานะไม่คงตัวสำหรับกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภททวงล้อ/สายพานของโลหะอะลูมิเนียมนั้นมีความน่าเชื่อถือ และสามารถใช้ในการคำนวณเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการได้จริง และมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี

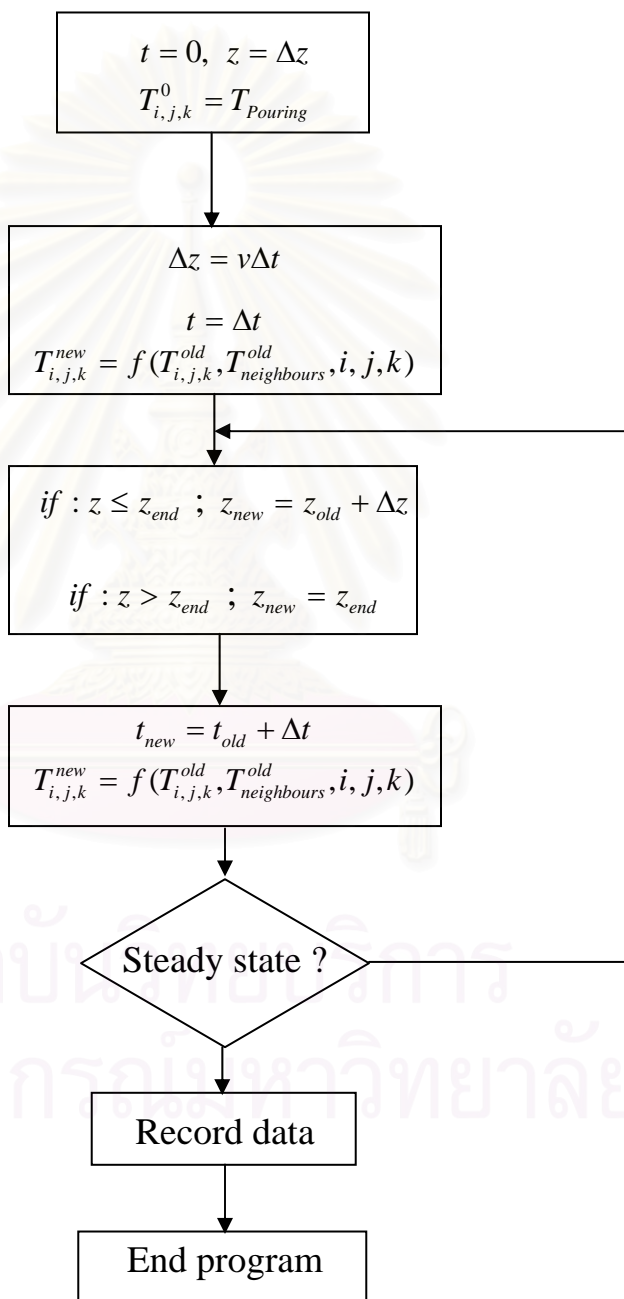


รูปที่ 3.19 แสดงผลการคำนวณจากโปรแกรมที่ใช้ข้อมูลในการผลิตจริงเพื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวที่วัดได้จริงจากโรงงาน

### 3.8 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรม

สำหรับ โปรแกรมการถ่ายเทความร้อนสามมิติในสภาวะไม่คงตัวที่ใช้ในการคำนวณสำหรับงานวิจัยนี้จะมีขั้นตอนหลักๆ ในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.20 โดยในตอนเริ่มต้นของการหล่อจะกำหนดให้มีโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเทไหลเข้าไปในแบบหล่อที่ระยะค่า  $z$  ค่าหนึ่งเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น จากนั้นจะทำการคำนวณการถ่ายเทความร้อนด้วยการคูณความร้อนในสามมิติเป็นระยะเวลาช่วงหนึ่งที่เทียบเท่ากับระยะเวลาที่โลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวเคลื่อนที่เข้าไปในแบบหล่อที่ระยะดังกล่าวด้วยความเร็วที่เท่ากับความเร็วในการหล่อ และหลังจากนั้น โลหะอะลูมิเนียมก็จะมี การเคลื่อนที่ต่อไปอีกที่ระยะ  $z$  ระยะหนึ่งแล้วก็จะทำการคำนวณด้วยการคูณความร้อนในสามมิติอีกครั้งในช่วงเวลาที่เทียบเท่ากับระยะที่มีการเคลื่อนที่ของแท่งงานหล่อที่ถูกดึงออกไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วในการหล่อตลอดความยาวในระยะ  $z$  ที่ถูกดึงออกมาก่อนหน้านี้ โดยแท่งงานหล่อจะถูกดึงออกไปจนมีความยาวที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนด้วยการคูณความร้อนซ้ำๆ เช่นเดียวกัน

กับขั้นตอนก่อนหน้านี้ไปเรื่อยๆ โดยกระบวนการผลิตจะเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากเริ่มทำการผลิตไประยะเวลาหนึ่ง ซึ่งในกรณีนี้จะถือว่าที่สภาวะดังกล่าวความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นงานที่ตำแหน่งเดียวกันมีความแตกต่างกันน้อยมากจนสมมติได้ว่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สภาวะคงตัว จากนั้นจะทำการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิที่คำนวณได้ และจบการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 3.20 ลำดับขั้นตอนหลักๆ ในการคำนวณของโปรแกรมการถ่ายเทความร้อนสามมิติในสภาวะไม่คงตัว

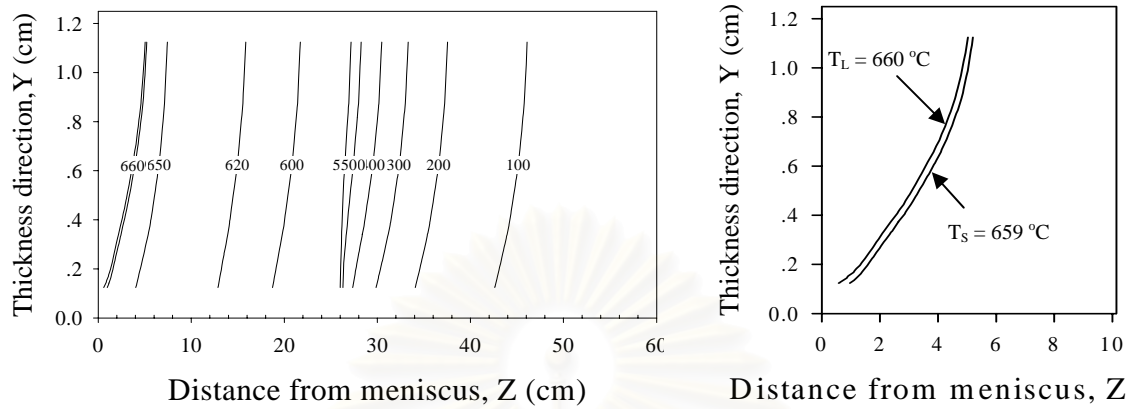
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

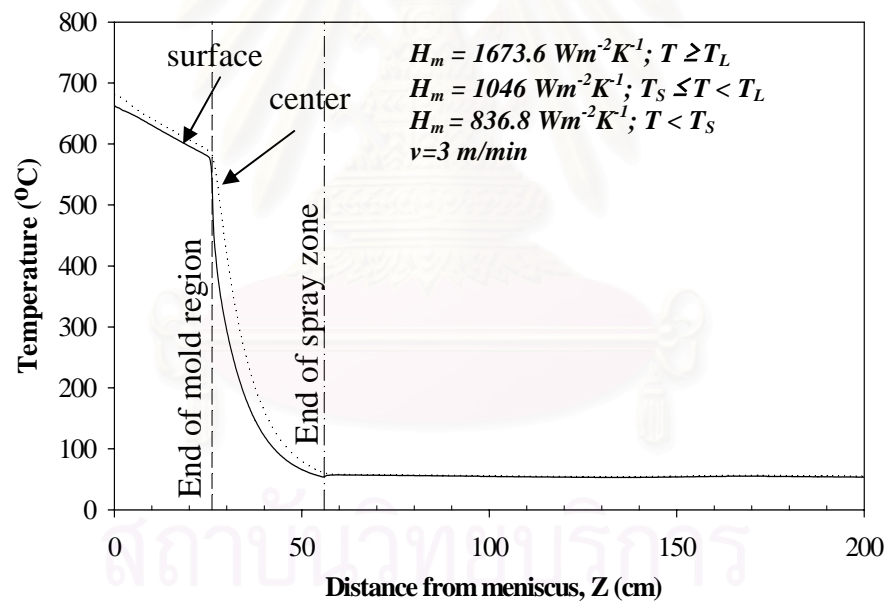
#### 4.1 แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 1

ในกรณีสำหรับเครื่องหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานที่มีการถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งงานหล่อด้วยการสเปรย์น้ำโดยตรงไปยังแท่งงานหล่อภายหลังจากแท่งงานหล่อมีการเคลื่อนที่ออกจากแบบหล่อเพื่อที่จะจำลองรูปแบบการศึกษาในกรณีที่มีการยื่นตัวในลักษณะของการหล่อแบบไดเรคชิลล์และการหล่อแบบลูกรีดคู่

ในการคำนวณเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียมในกรณีนี้จะใช้ข้อมูลคุณสมบัติทางความร้อนที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 และเงื่อนไขขอบเขตในตารางที่ 3.1 มาทำการคำนวณในแบบจำลอง ซึ่งแท่งงานหล่ออะลูมิเนียมแผ่นแบนมีรูปร่างหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด  $25 \times 250$  มม. โดยการจำลองในกรณีนี้จะศึกษาการยื่นตัวของกระบวนการหล่อต่อเนื่องแบบวงล้อ/สายพานในลักษณะที่มีการยื่นตัวเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของงานหล่อภายหลังจากการเคลื่อนที่ออกจากบริเวณที่เป็นแบบหล่อจะมีการสเปรย์ด้วยน้ำเช่นในกรณีของการหล่อแบบไดเรคชิลล์และการหล่อแบบลูกรีดคู่ ในการคำนวณจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาทั้งในกรณีที่มีการเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายเทความร้อนที่ดีและไม่ดีในแบบหล่อเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวสัมผัสระหว่างแท่งงานหล่อและแบบหล่อ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแบบหล่อแทนการเปลี่ยนแปลงของสภาวะดังกล่าวดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหล่อซึ่งในการคำนวณกำหนดให้มีความเร็วในการหล่อที่ 3 เมตรต่ออนาทีและ 6 เมตรต่ออนาที โดยใช้อุณหภูมิที่ 680 องศาเซลเซียสในการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการสเปรย์เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของอากาศที่งานหล่อมีการยื่นตัวในช่วงสุดท้ายเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการคำนวณที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (a) จะแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อ (Y-Z plane) ณ ตำแหน่งกึ่งกลางตามด้านกว้างของแท่งงานหล่อ ซึ่งในภาพขวามือจะเห็นได้ว่าความลึกของบ่อน้ำโลหะอะลูมิเนียมมีความลึกที่ตำแหน่งใจกลางเพียง 5.5 เซนติเมตร และในรูปที่ 4.1 (b) แสดงอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง ซึ่งมีความแตกต่างกันไม่มากนักเนื่องจากอะลูมิเนียมมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ดีและรูปร่างของแท่งงานหล่อมีความหนาไม่มาก ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดี จะเห็นได้ว่าแท่งงานหล่อมีการแข็งตัวสิ้นสุดตั้งแต่อยู่ในแบบหล่อ และอุณหภูมิมักจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อแท่งงานหล่ออยู่ในบริเวณที่มีการสเปรย์ด้วยน้ำ และเมื่อออกจากบริเวณนี้อุณหภูมิจะมีการลดลงเพียงเล็กน้อย

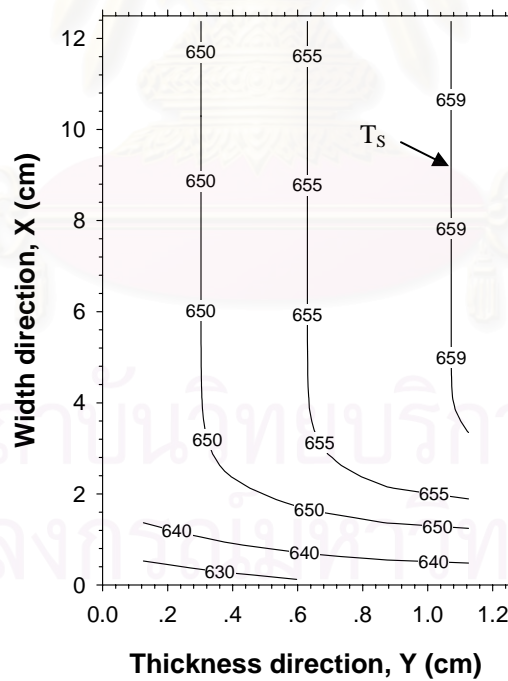
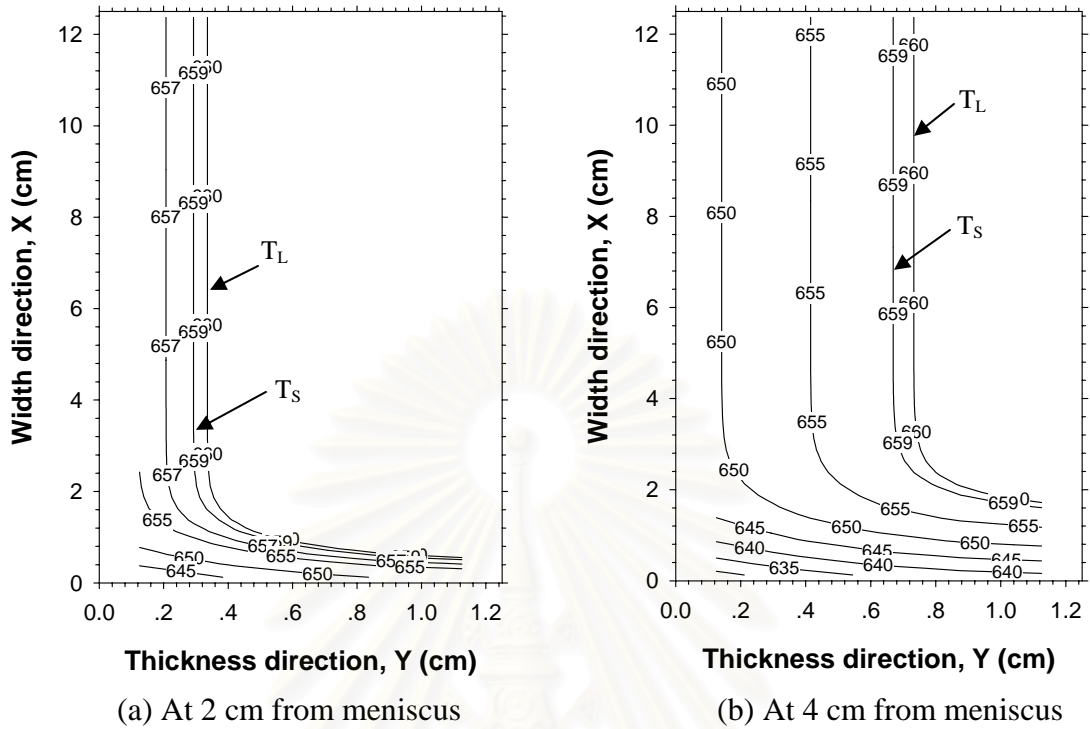


(a)



(b)

รูปที่ 4.1 (a) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อ และความลึกของบ่อน้ำโลหะซึ่งแสดงให้เห็นโดยอุณหภูมิผิวตัว อุณหภูมิโซลิดัส และ (b) แสดงอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง ด้วยความเร็วในการหล่อ 3 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิเทที่ 680 องศาเซลเซียส ของกรณี 1a ในตารางที่ 3.1



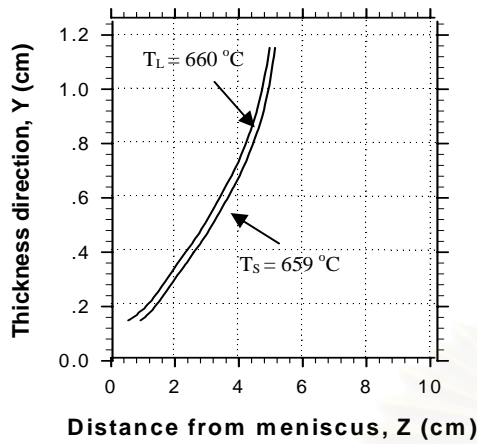
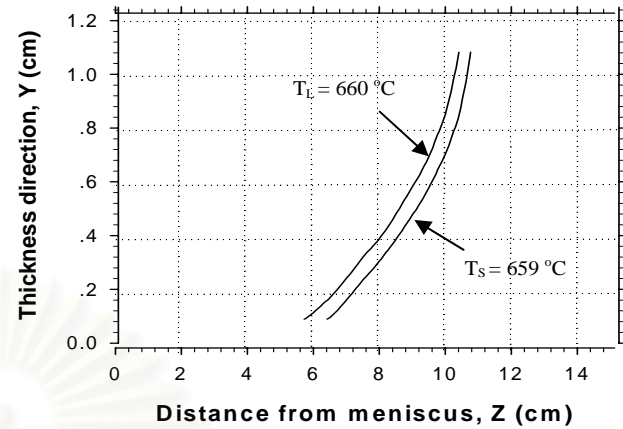
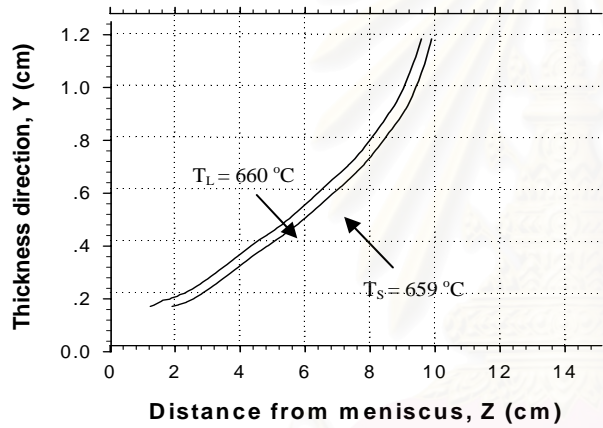
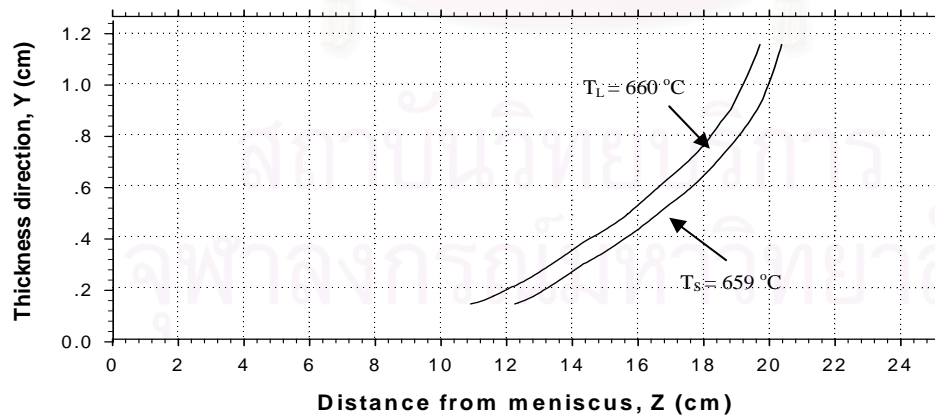
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางของกรณี 1a ในตารางที่ 3.1 ที่มีความเร็วในการหล่อ 3 เมตรต่อนาที



รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางของแท่งงานหล่ออะลูมิเนียม โดยสามารถแสดงขนาดและรูปร่างของบ่อน้ำโลหะที่ระยะต่างๆ ซึ่งอ่านค่าได้โดยตรงจากอุณหภูมิโซลิดัสโดยบริเวณที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิลิกวิคัสหรือบริเวณที่ว่างสีขาวทางขวามือโลหะอะลูมิเนียมยังคงเป็นโลหะหลอมเหลวอยู่ และบริเวณที่อยู่ระหว่างอุณหภูมิลิกวิคัสกับโซลิดัสโลหะอะลูมิเนียมจะอยู่ในช่วงของการแข็งตัว

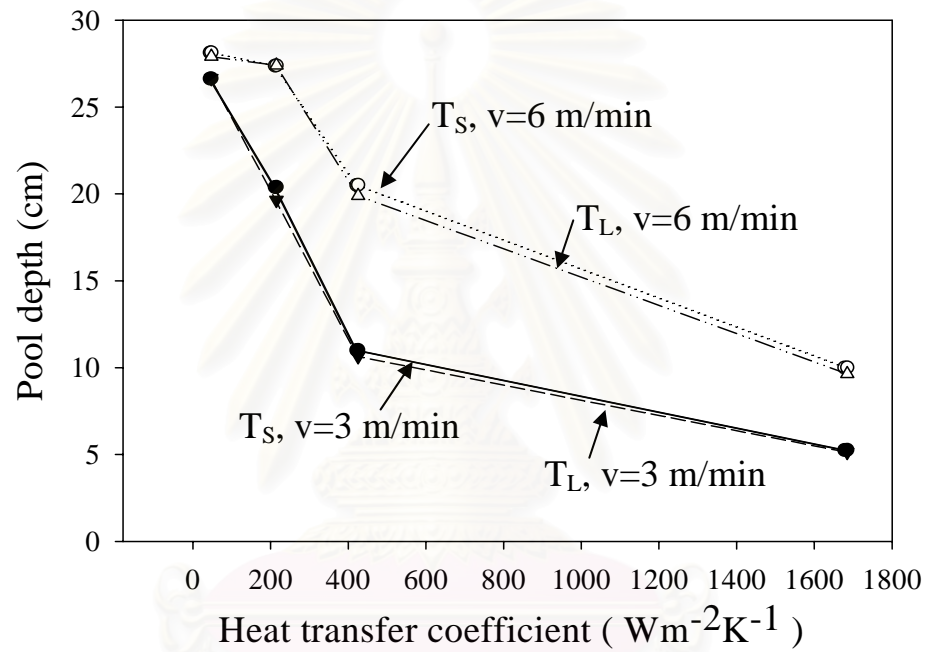
รูปที่ 4.3 แสดงผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวในแบบหล่อและความเร็วในการหล่อที่มีผลต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะโดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังในตารางที่ 3.1 จากรูปที่ 4.3 (a) และรูปที่ 4.3 (b) จะเห็นได้ว่าการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดีระหว่างผิวสัมผัสของแท่งงานหล่อกับแบบหล่อหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสต่ำจะทำให้ความลึกของบ่อน้ำโลหะมีระยะลึกขึ้นหรือมีการเย็นตัวสิ้นสุดที่ระยะลึกขึ้นจากกรณี 1a ที่มีความลึกของบ่อน้ำโลหะประมาณ 5.5 เซนติเมตรเป็นประมาณ 11 เซนติเมตรในกรณี 1b อีกทั้งตำแหน่งที่เริ่มแข็งตัวก็มีระยะต่ำลงจากเมนิสคัสโดยเริ่มแข็งตัวที่ระยะประมาณ 5-6 เซนติเมตรจากเมนิสคัส และจากรูปที่ 4.3 (a) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3 (c) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเร็วในการหล่อจะทำให้บ่อน้ำโลหะมีความลึกเพิ่มขึ้นจากประมาณ 5.5 เซนติเมตรเป็นประมาณ 10 เซนติเมตร โดยที่ระยะเริ่มต้นของการแข็งตัวยังคงอยู่ใกล้กับตำแหน่งเมนิสคัส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วจะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการหล่อยังส่งผลกระทบต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะน้อยกว่าการที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสมีค่าต่ำ ส่วนกรณีในรูปที่ 4.3 (d) เมื่อการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดีระหว่างผิวสัมผัสของงานหล่อกับแบบหล่อ อีกทั้งการใช้ความเร็วในการหล่อที่สูง โดยผลกระทบจากทั้งสองปัจจัยนี้จะทำให้ตำแหน่งเริ่มต้นของการแข็งตัวต่ำลงถึงประมาณ 10-11 เซนติเมตรและทำให้บ่อน้ำโลหะมีความลึกถึงประมาณ 20.5 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังสามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างงานหล่อกับแบบหล่อ และความเร็วที่ใช้ในการหล่อที่ส่งผลกระทบต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

รูปที่ 4.6 แสดงผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสในแบบหล่อ และความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อในตำแหน่งกึ่งกลางตามด้านกว้าง จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากผิวและใจกลางของงานหล่อจะมีความแตกต่างกันมากในบริเวณที่มีการสเปิร์ซด้วยน้ำซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนออกจากผิวของงานหล่อในอัตราที่สูงจึงทำให้อุณหภูมิต่างกันมาก และผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสในบริเวณแบบหล่อไม่ส่งผลกระทบต่อความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของงานหล่อ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเพิ่มขึ้นของความเร็วที่ใช้ในการหล่อซึ่งจะส่งผลกระทบมากกว่า อีกทั้งภายหลังจากที่งานหล่อออกจากบริเวณที่มี

(a) Case 1a,  $v = 3$  m/min(b) Case 1b,  $v = 3$  m/min(c) Case 1a,  $v = 6$  m/min(d) Case 1b,  $v = 6$  m/min

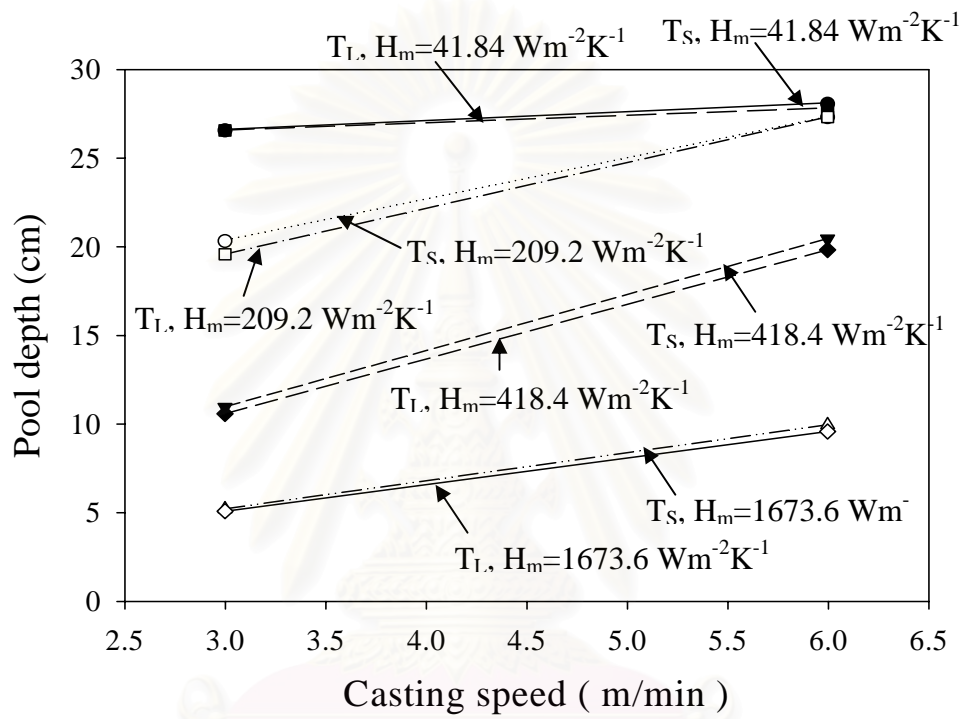
รูปที่ 4.3 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเย็นตัวในแบบหล่อและความเร็วในการหล่อที่มีต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตในตารางที่ 3.1

การเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการสเปรย์น้ำยังทำให้มีการร้อนขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวของงานหล่อหลังจากที่เข้าสู่บริเวณที่มีการเย็นตัวในอากาศอีกด้วย

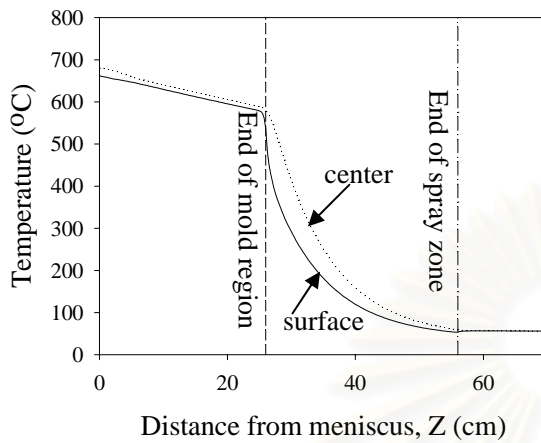


รูปที่ 4.4 ผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสในแบบหล่อต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะ

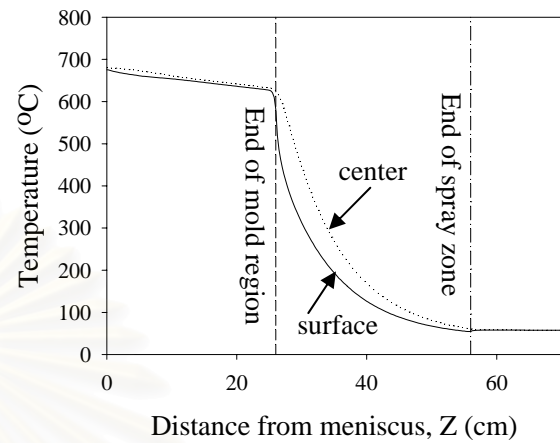
สงวนลิขสิทธิ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



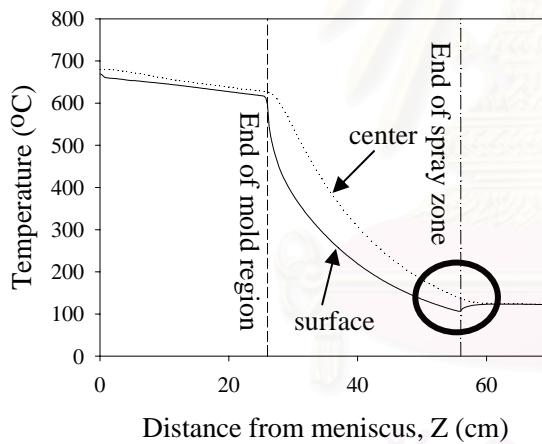
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะ



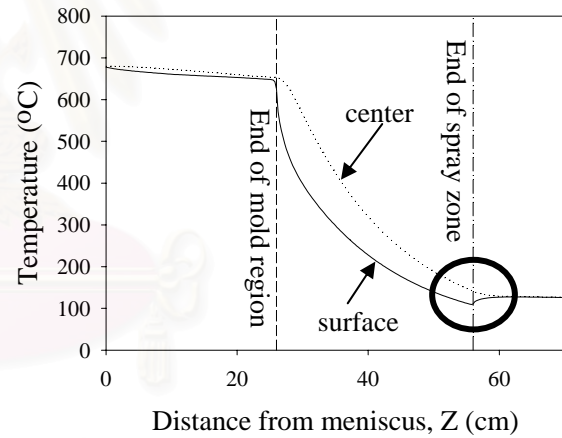
(a)  $v = 3 \text{ m/min}$ ,  $H_m = 1673.6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ;  $T \geq T_L$   
 $H_m = 1046 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ;  $T_S \leq T < T_L$   
 $H_m = 836.8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ;  $T < T_S$



(b)  $v = 3 \text{ m/min}$ ,  $H_m = 418.4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$



(c)  $v = 6 \text{ m/min}$ ,  $H_m = 1673.6 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ;  $T \geq T_L$   
 $H_m = 1046 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ;  $T_S \leq T < T_L$   
 $H_m = 836.8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ;  $T < T_S$



(d)  $v = 6 \text{ m/min}$ ,  $H_m = 418.4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$

รูปที่ 4.6 ผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสในแบบหล่อและความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่อ อุณหภูมิที่ผิวและใจกลางแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง

## 4.2 แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 2

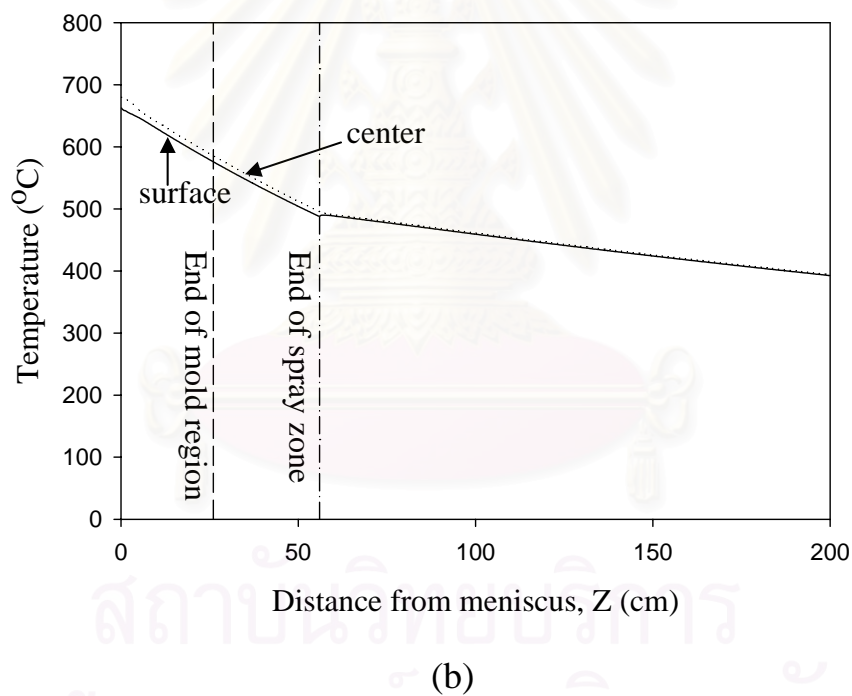
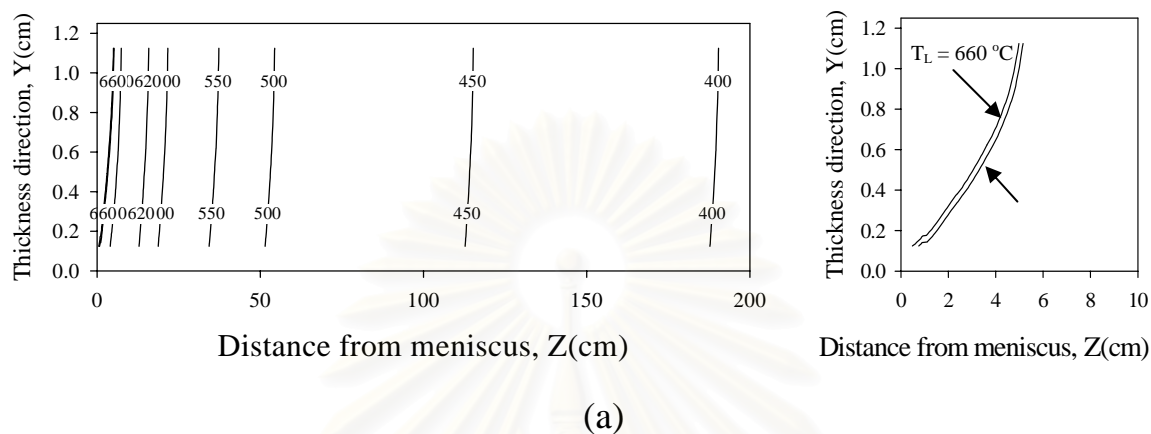
ในกรณีสำหรับเครื่องหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานที่บริเวณการถ่ายเทความร้อนด้วยการสเปรย์จะไม่ได้มีการสเปรย์น้ำโดยตรงไปที่แท่งงานหล่อแต่จะสเปรย์น้ำเพื่อหล่อเย็นให้กับผิวด้านนอกของแบบหล่อซึ่งเป็นวงล้อและสายพาน ซึ่งจะเป็นการจำลองกรณีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานในกระบวนการผลิตจริงมากกว่ากรณีก่อนหน้านี้

โดยการจำลองรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการผลิตในกรณีนี้จะใช้ข้อมูลสมบัติความร้อนที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 และขอบเขตเงื่อนไขในตารางที่ 3.2 มาทำการคำนวณ แท่งงานหล่ออะลูมิเนียมแผ่นแบนมีรูปร่างหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด  $25 \times 250$  มม. เช่นเดียวกับในกรณีก่อนหน้านี้ และกำหนดความเร็วในการหล่อเท่ากับ 3 เมตรต่อนาที และ 6 เมตรต่อนาที มีอุณหภูมิเท 680 องศาเซลเซียสในการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการสเปรย์เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของอากาศที่งานหล่อมักมีการเย็นตัวในช่วงสุดท้ายเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนในบริเวณแบบหล่อกับความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและพฤติกรรมการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียม ซึ่งในกรณีนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่มีการสเปรย์ต่ำกว่ากรณีที่มีการสเปรย์ด้วยน้ำไปยังแท่งงานหล่อโดยตรง โดยจะเห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิและความลึกของบ่อน้ำโลหะได้จากรูปที่ 4.7 (a) โดยบ่อน้ำโลหะจะมีความลึกประมาณ 5.5 เซนติเมตร ซึ่งมีระยะที่ใกล้เคียงกับกรณีในหัวข้อที่ 4.1 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างแบบหล่อกับงานหล่อและมีความเร็วในการหล่อเท่ากันเนื่องจากการแข็งตัวสิ้นสุดตั้งแต่วะหว่างที่งานหล่ออยู่ในแบบหล่อ ฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสที่ต่ำลงในบริเวณที่มีการเย็นตัวด้วยการสเปรย์ในกรณีนี้จึงไม่ส่งผลกระทบต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะแต่จะส่งผลกระทบต่อกระจายตัวของอุณหภูมิในบริเวณที่มีการสเปรย์ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการลดลงของอุณหภูมิในบริเวณนี้มีไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีในหัวข้อ 4.1 และจะเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.7 (b) ที่แสดงอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้าง ซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิไม่มากนัก และการลดลงของอุณหภูมิมืออัตราที่ไม่สูงทำให้สังเกตได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของงานหล่อในตำแหน่งที่ออกจากบริเวณที่มีการสเปรย์และบริเวณที่มีการเย็นตัวในอากาศยังคงมีอุณหภูมิที่สูงประมาณ 500 องศาเซลเซียส และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

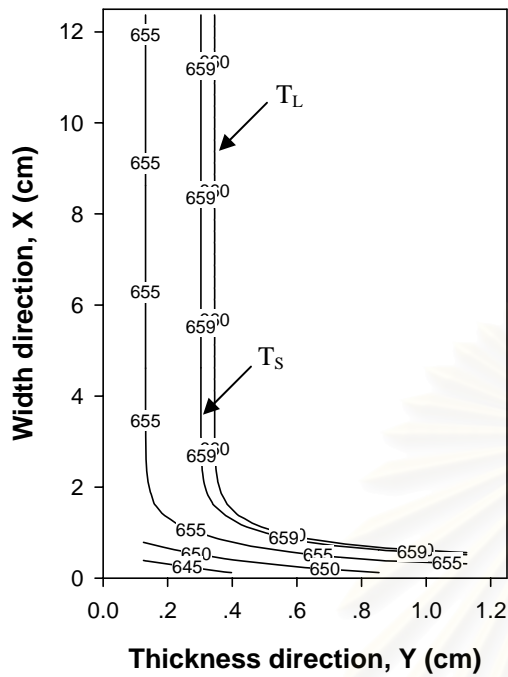
รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางของแท่งงานหล่ออะลูมิเนียมโดยแสดงขนาดและรูปร่างของบ่อน้ำโลหะที่ระยะต่างๆ จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิและขนาดของบ่อน้ำโลหะซึ่งอ่านค่าได้โดยตรงจากอุณหภูมิโวลิตัสนั้นมีความใกล้เคียงกับกรณีในหัวข้อ 4.1 เนื่องจากการแข็งตัว



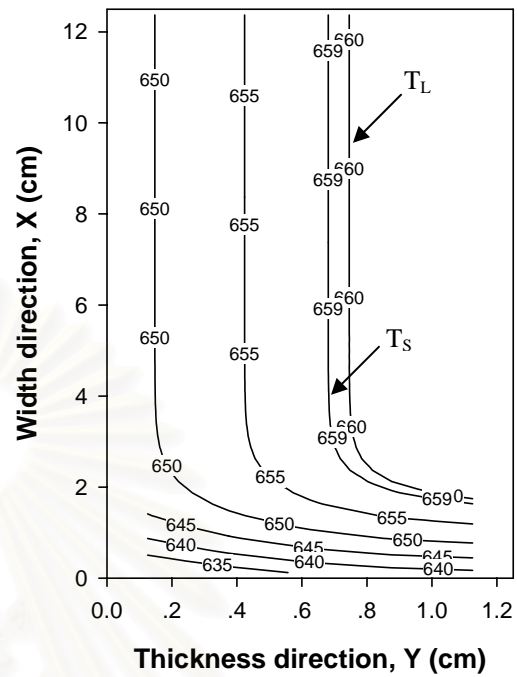
สิ้นสุดตั้งแต่แท่งงานหล่ออยู่ในแบบหล่อ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างแบบหล่อกับแท่งงานหล่อเท่ากัน



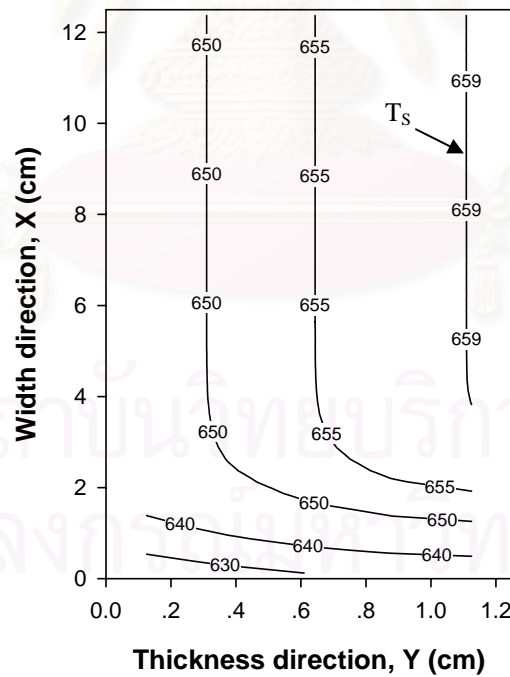
รูปที่ 4.7 ผลการคำนวณโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตในตารางที่ 3.2 ในกรณี 2a ซึ่งภาพ (a) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามระนาบในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อ และความลึกของบ่อน้ำโลหะซึ่งแสดงให้เห็นโดยอุณหภูมิผิววัด อุณหภูมิซิลิเดส และภาพ (b) แสดงอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง ด้วยความเร็วในการหล่อ 3 เมตรต่อนาที และอุณหภูมิเทที่ 680 องศาเซลเซียส



(a) At 2 cm from meniscus



(b) At 4 cm from meniscus

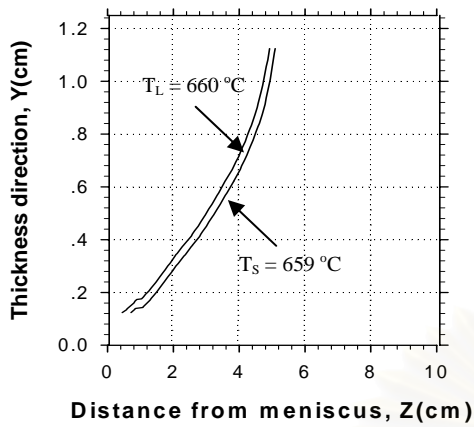
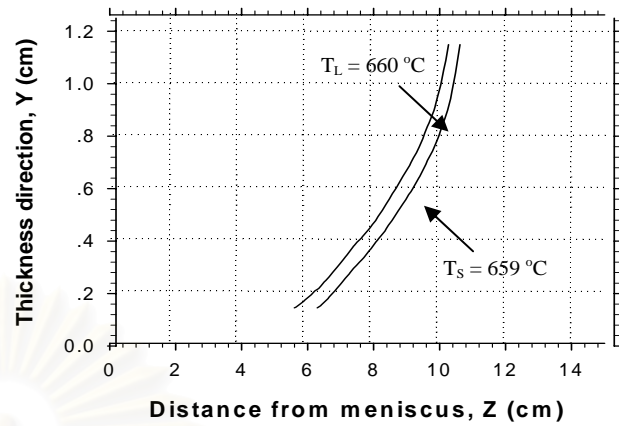
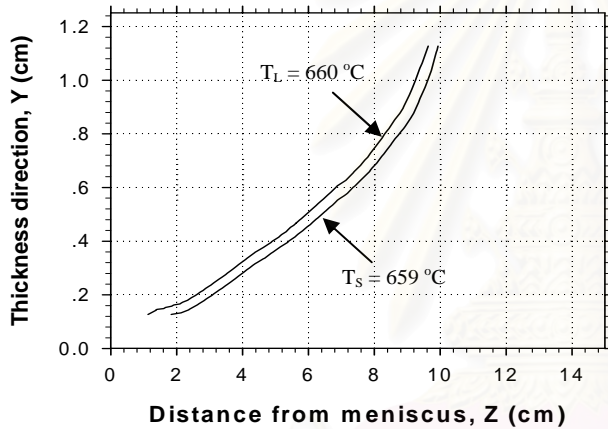
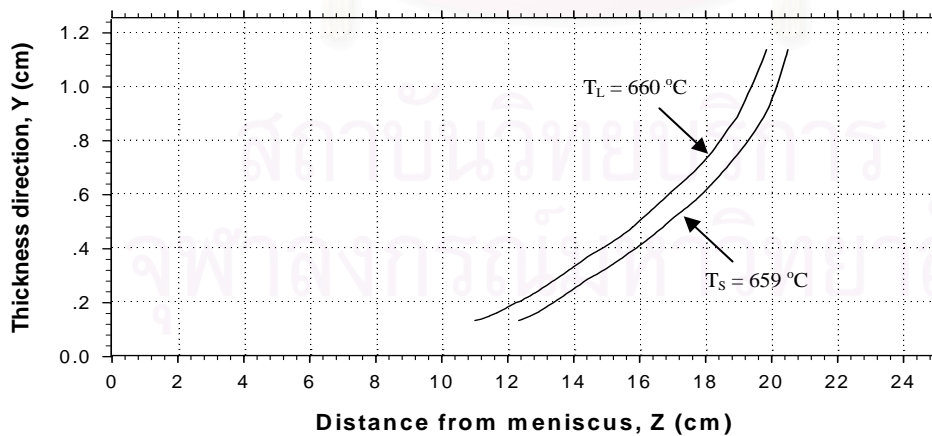


(c) At 5 cm from meniscus

รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางของกรณี 2a ในตารางที่ 3.2 ที่มีความเร็วในการหล่อ 3 เมตรต่อนาที

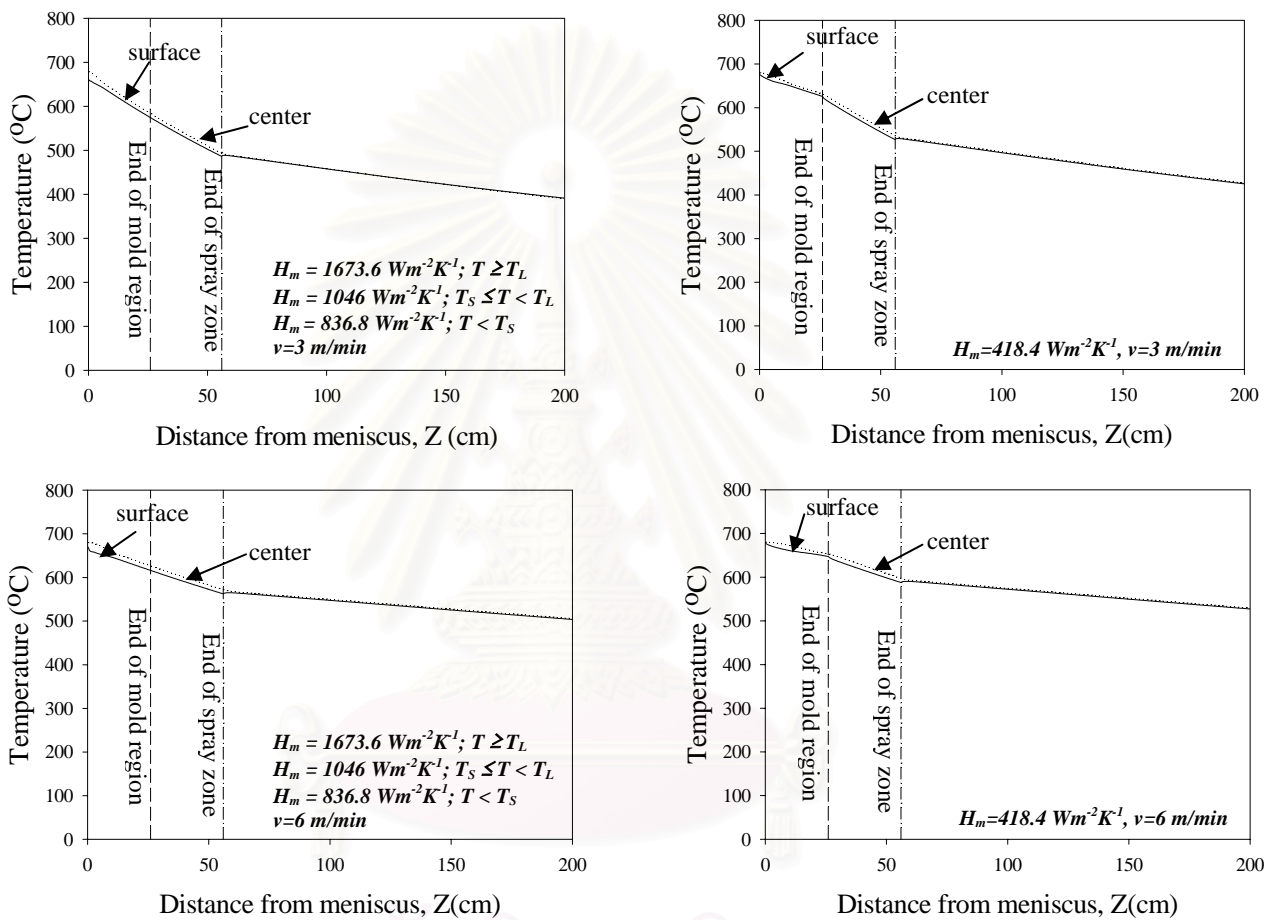
รูปที่ 4.9 แสดงผลกระทบของสภาวะการเย็นตัวในแบบหล่อและความเร็วในการหล่อที่มีต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะของแบบจำลองที่ใช้ศึกษาในหัวข้อนี้ซึ่งได้ทำการลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่มีการสเปร์ย์ลง จะเห็นได้จากรูปที่ 4.9 (a) และรูปที่ 4.9 (b) ว่าเมื่อการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดีระหว่างผิวสัมผัสของแท่งงานหล่อกับแบบหล่อหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสต่ำจะทำให้ความลึกของบ่อน้ำโลหะมีระยะลึกขึ้นหรือมีการเย็นตัวสิ้นสุดที่ระยะลึกขึ้นซึ่งสามารถสรุปได้เช่นเดียวกับในกรณีแบบจำลองในหัวข้อ 4.1 จากการที่ความลึกของบ่อน้ำโลหะในกรณี 2a ที่มีความลึกประมาณ 5.5 เซนติเมตรเป็นประมาณ 11 เซนติเมตรในกรณี 2b อีกทั้งตำแหน่งที่เริ่มแข็งตัวก็มีระยะต่ำลงจากเมนิสคัสโดยเริ่มแข็งตัวที่ระยะประมาณ 5-6 เซนติเมตรจากเมนิสคัส และในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มความเร็วในการหล่อจาก 3 เมตรต่อนาทีดังแสดงในรูปที่ 4.9 (a) เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.9 (c) ที่มีความเร็วในการหล่อ 6 เมตรต่อนาทีจะเห็นได้ว่ามีผลทำให้บ่อน้ำโลหะมีความลึกเพิ่มขึ้นจากประมาณ 5.5 เซนติเมตรเป็นประมาณ 10 เซนติเมตร โดยที่ระยะเริ่มต้นของการแข็งตัวยังคงอยู่ใกล้กับเมนิสคัส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการหล่อยังส่งผลกระทบต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะน้อยกว่าการที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสมีค่าต่ำซึ่งให้ข้อสรุปเช่นเดียวกับแบบจำลองในหัวข้อ 4.1 ส่วนกรณีในรูปที่ 4.9(d) เมื่อการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดีระหว่างผิวสัมผัสของงานหล่อกับแบบหล่อรวมทั้งใช้ความเร็วในการหล่อที่สูง โดยผลกระทบจากทั้งสองปัจจัยนี้จะทำให้ตำแหน่งเริ่มต้นของการแข็งตัวต่ำลงถึงประมาณ 10-11 เซนติเมตรและทำให้บ่อน้ำโลหะมีความลึกถึงประมาณ 20.5 เซนติเมตร เนื่องจากการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียมทั้งในแบบจำลองในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 นี้มีการแข็งตัวสิ้นสุดตั้งแต่อยู่ในบริเวณแบบหล่อจึงทำให้การที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนในบริเวณที่มีการสเปร์ย์ที่ลดลงในหัวข้อที่ 4.2 ไม่ส่งผลกระทบต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะอะลูมิเนียมและการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งงานหล่อขณะอยู่ในแบบหล่อ

รูปที่ 4.10 แสดงผลกระทบของการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสในแบบหล่อ และความเร็วที่ใช้ในการหล่อต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางของด้านกว้างของแบบจำลองที่คำนวณในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและใจกลางของงานหล่อจะมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่การลดลงของอุณหภูมิตลอดช่วงของการเย็นตัวทั้งในบริเวณแบบหล่อ, บริเวณที่มีการสเปร์ย์ด้วยน้ำ และบริเวณที่มีการเย็นตัวในอากาศนั้นการกระจายตัวของอุณหภูมิมิแนวโน้มค่อยๆ ลดลง ซึ่งจะไม่ลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนกับแบบจำลองในหัวข้อ 4.1 ดังจะเห็นได้จากอุณหภูมิของงานหล่อเมื่อออกจากระยะที่มีการเย็นตัวในอากาศหรือที่ตำแหน่ง 2 เมตรจากเมนิสคัสจะมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 400-550 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วที่ใช้ในการหล่อที่สูงขึ้นจะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ระยะ 2 เมตรจากเมนิสคัสมากกว่า

(a) Case 2a,  $v = 3$  m/min(b) Case 2b,  $v = 3$  m/min(c) Case 2a,  $v = 6$  m/min(d) Case 2b,  $v = 6$  m/min

รูปที่ 4.9 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการเข็นตัวในแบบหล่อและความเร็วในการหล่อต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตในตารางที่ 3.2

การที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสในแบบหล่อลดลง โดยจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งออกจากเครื่องหล่อประเภทนี้มีอุณหภูมิที่สูงกว่า



รูปที่ 4.10 ผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสในแบบหล่อและความเร็วที่ใช้ในการหล่อ ต่ออุณหภูมิที่ผิวและใจกลางแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง

### 4.3 แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 3

ในกรณีนี้จะทำการนำข้อมูลต่างๆ ของกระบวนการผลิตที่ใช้ในการผลิตจริงมาใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับข้อมูลของอุณหภูมิที่ผิวของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งที่ออกจากเครื่องหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน ซึ่งได้จากการวัดจริงจากกระบวนการผลิตเพื่อหาสภาวะการทำงานและการถ่ายเทความร้อนของเครื่องหล่อที่ทำการผลิต ณ ปัจจุบันและใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวโปรแกรม

ในการคำนวณจะกำหนดให้มีความเร็วในการหล่อ 4 เมตรต่อนาที อุณหภูมิในการเท 680 องศาเซลเซียส อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นให้กับเครื่องหล่อและอุณหภูมิในการเย็นตัวในอากาศที่ 33 องศาเซลเซียส พื้นที่หน้าตัดของแท่งงานหล่อบรรจุขนาด  $27.5 \times 230$  มิลลิเมตร และระยะในการคำนวณมีความยาว 3 เมตร โดยจะทำการคำนวณเพื่อหาสภาวะการทำงานและการถ่ายเทความร้อนของเครื่องหล่อที่ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางตามด้านกว้างที่วัดได้จริงจากกระบวนการหลังจากที่แท่งงานหล่อเคลื่อนที่ออกจากเครื่องหล่อ หรือที่ระยะ 3 เมตรจากเมนิสคัสโดยอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าประมาณ 530 องศาเซลเซียส ดังนั้นเพื่อที่จะหาสภาวะดังกล่าวจึงได้ตั้งสมมติฐานในการคำนวณโดยใช้แบบจำลองออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

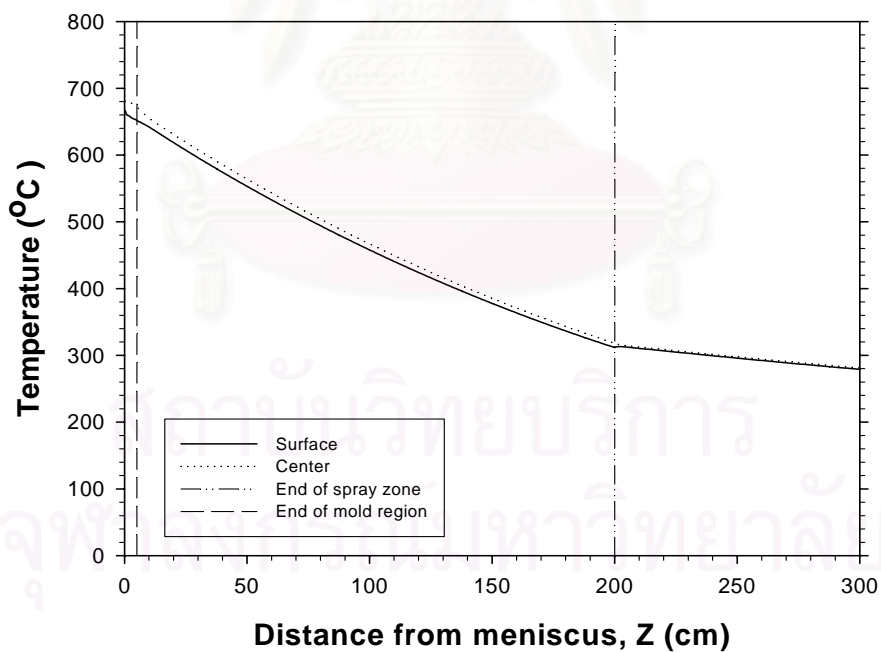
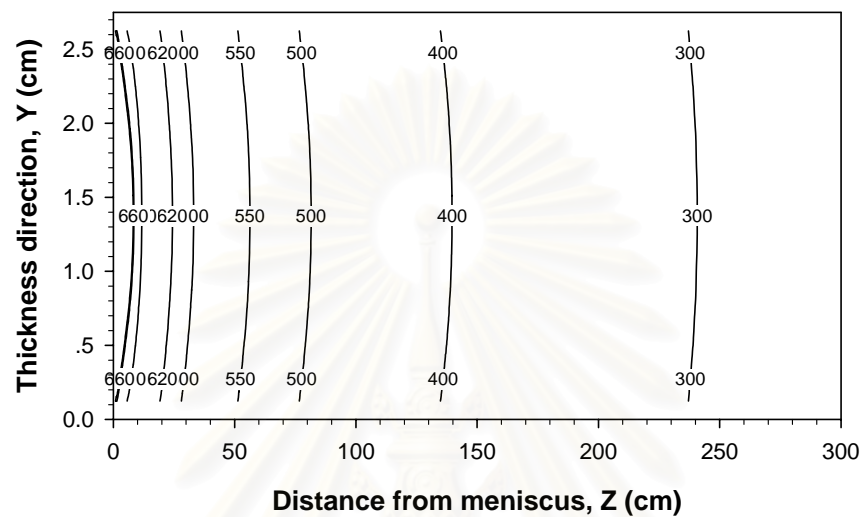
#### 4.3.1 แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณี 3a

กรณีที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสของแบบหล่อและแท่งงานหล่อมักมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีอีกทั้งในบริเวณที่มีการเย็นตัวด้วยการสเปรย์จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกันกับในกรณีของหัวข้อ 4.2 ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณสำหรับกรณีนี้จะแสดงในตารางที่ 4.3 ในกรณี 3a

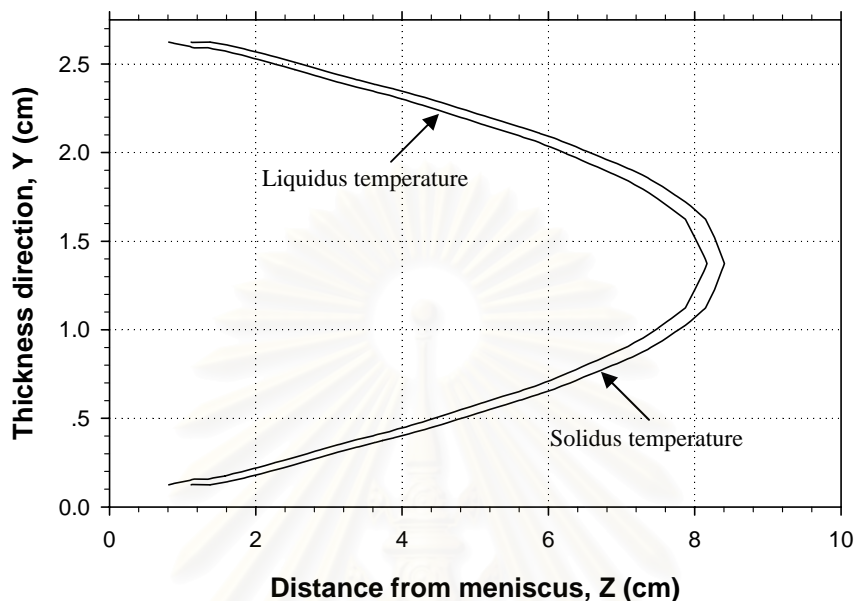
จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.11 จะแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบตามความหนาของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้าง และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของงานหล่อตลอดความยาวตามระนาบดังกล่าว จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจะลดลงค่อนข้างสูงในบริเวณที่เป็นแบบหล่อและบริเวณที่มีการสเปรย์ และอุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ในบริเวณที่มีการเย็นตัวในอากาศเมื่อแท่งงานหล่อเคลื่อนที่ออกจากเครื่องหล่อ จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำหรับกรณีนี้จะได้อุณหภูมิที่ผิวของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งที่ได้มีการวัดค่าจริงจากโรงงานเมื่อแท่งงานหล่อเคลื่อนที่ออกจากเครื่องหล่อที่ระยะ 3 เมตรจากเมนิสคัสประมาณ 280 องศาเซลเซียส โดยจากอุณหภูมิที่คำนวณได้นี้แสดงให้เห็นว่าเครื่องหล่อที่ใช้ในการผลิตจริงมีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่ผิวของแท่งงานหล่อเมื่อออกจากเครื่องหล่อสูงถึง 530 องศาเซลเซียส สาเหตุอาจจะเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างแบบหล่อกับแท่งงานหล่อมักมีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี ซึ่งอาจจะเกิดช่องว่าง (Air gap) ระหว่างแบบหล่อกับแท่งงานหล่อภายหลังจากที่แท่งงานหล่อมักมีการแข็งตัวของเปลือกของแข็งและทำให้งานหล่อมักเกิดการหดตัวและเกิด



ช่องว่างอากาศเกิดขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสดังกล่าวมีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี ดังนั้น อุณหภูมิที่ผิวของงานหล่อเมื่อออกจากเครื่องหล่อจึงยังคงมีอุณหภูมิที่สูง



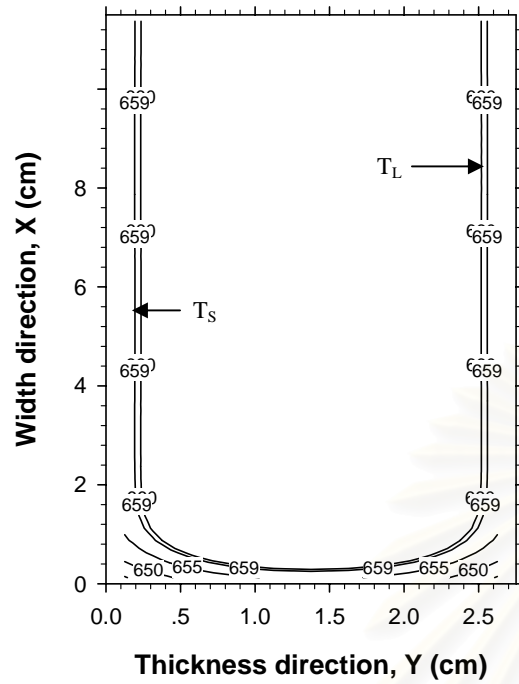
รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามระยะในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อ และอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง



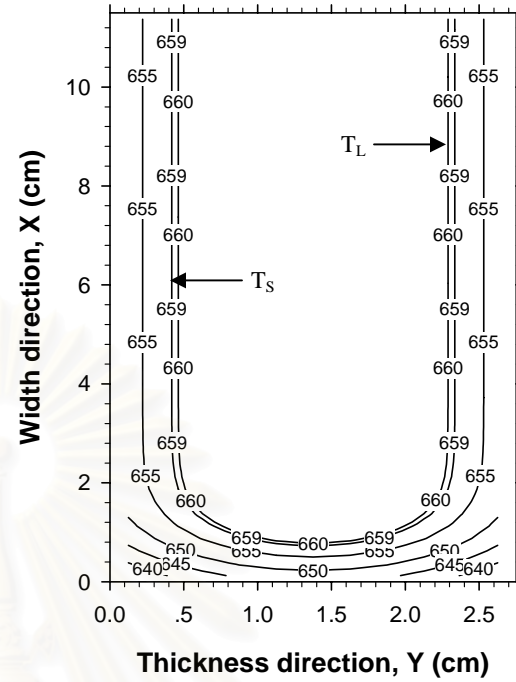
รูปที่ 4.12 รูปร่างและความลึกของบ่อน้ำโลหะ

สำหรับความลึกของบ่อน้ำโลหะที่คำนวณได้ในกรณีนี้จะมีค่าประมาณ 8.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของความลึกของบ่อน้ำโลหะที่ทางโรงงานได้มีการบันทึกไว้ประมาณ 120 เซนติเมตรนั้น จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันมาก จากการที่โลหะอะลูมิเนียมมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูง และรูปร่างของแท่งงานหล่อที่ทำการผลิตจริงมีขนาดที่บาง ควรจะต้องมีการถ่ายเทความร้อนที่ดี ดังนั้นจึงน่าจะเชื่อได้ว่าเมื่อทำการผลิตตามสภาวะเงื่อนไขดังกล่าวนี้จะได้บ่อน้ำโลหะที่มีความลึกประมาณ 8.5 เซนติเมตร

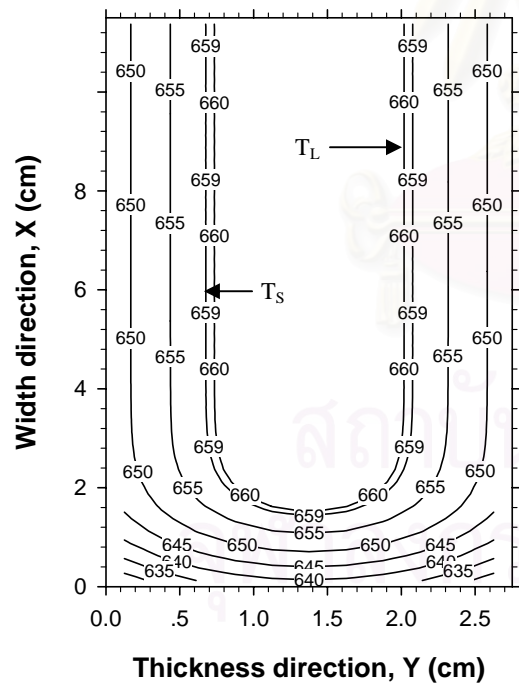
รูปที่ 4.13 แสดงขนาดและรูปร่างของบ่อน้ำโลหะที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่หน้าตัดของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งต่างๆ จากเมนิสคัส ซึ่งสามารถทราบตำแหน่งและความกว้างของบ่อน้ำโลหะที่ระยะต่างๆ ได้โดยสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากอุณหภูมิโซลิดัส



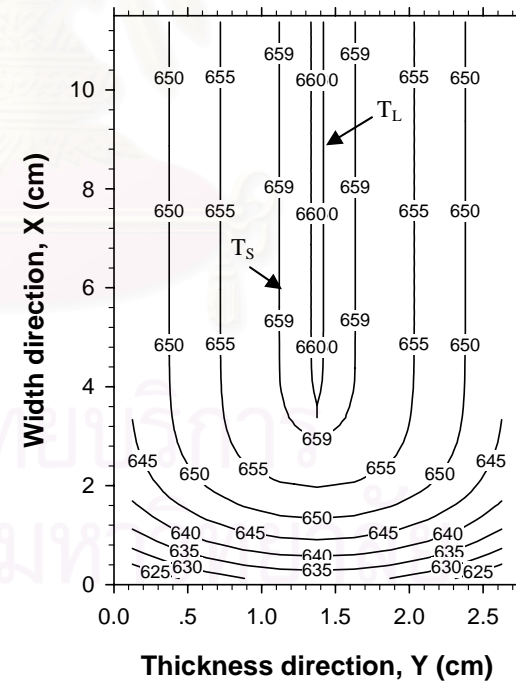
(a) At 2 cm from meniscus



(b) At 4 cm from meniscus



(c) At 6 cm from meniscus



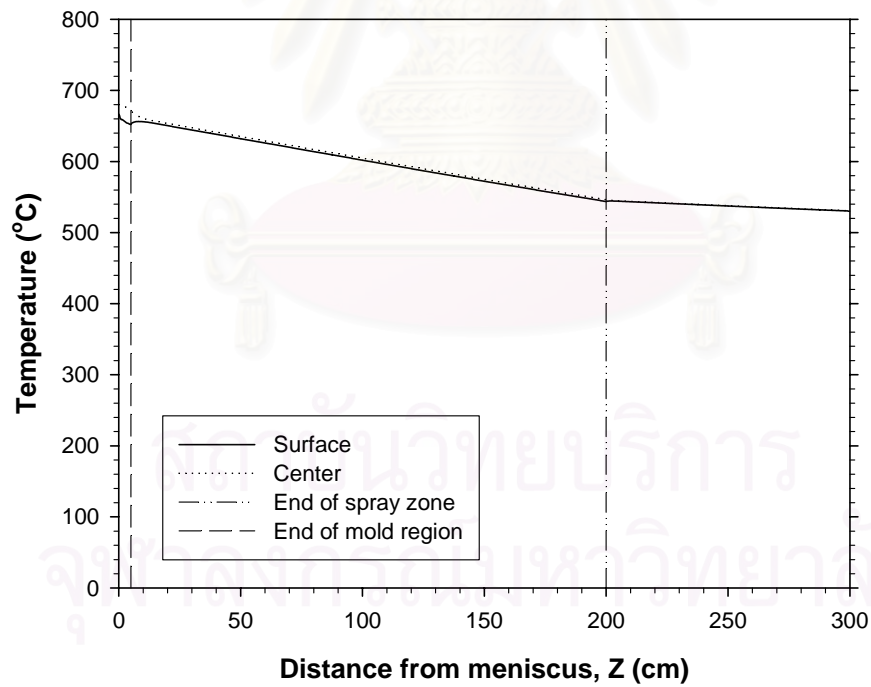
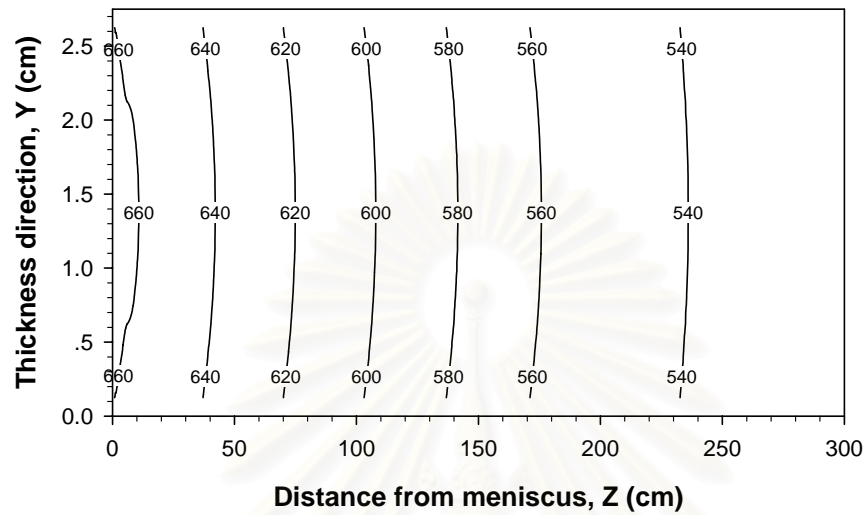
(d) At 8 cm from meniscus

รูปที่ 4.13 รูปร่างของบ่อน้ำโลหะการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางที่ระยะต่างๆ จากตำแหน่งเมนิสคัส

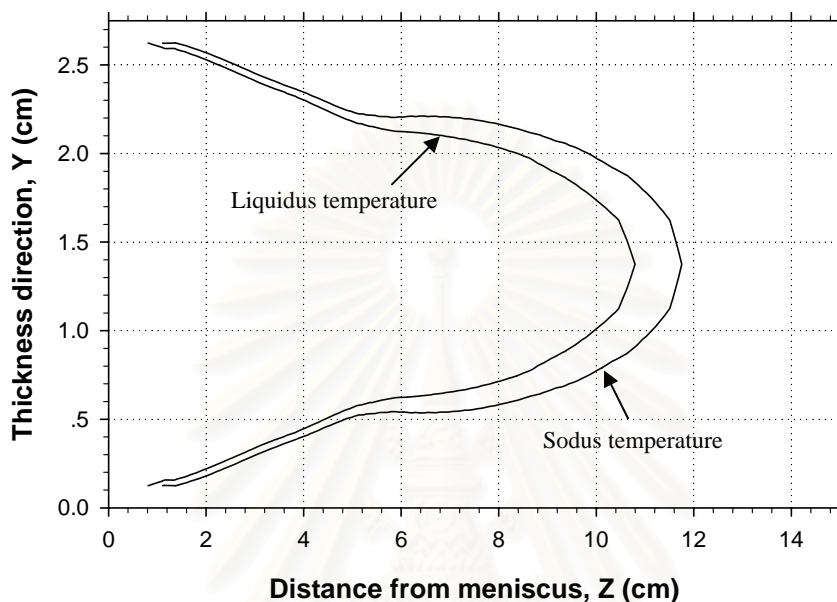
#### 4.3.2 แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณี 3b

กรณีนี้จะกำหนดให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสของแบบหล่อและแท่งงานหล่อมีการถ่ายเทความร้อนที่ดี แต่เมื่อภายหลังจากที่โลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวมีการแข็งตัวที่เปลือกเป็นชั้นบางๆ แล้ว จะให้สมมติฐานว่ามีช่องว่างระหว่างแบบหล่อและแท่งงานหล่อเกิดขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนเมื่อออกจากบริเวณที่มีการกำหนดให้เป็นระยะของการเย็นตัวในแบบหล่อหรือระยะ 5 เซนติเมตรจากเมนิสคัสเป็นไปได้ไม่ดี โดยจะเปรียบเสมือนว่ามีการเย็นตัวเช่นเดียวกับการเย็นตัวในอากาศ และในช่วงของบริเวณที่กำหนดเป็นระยะของการเย็นตัวในอากาศจะกำหนดให้มีการเย็นตัวที่ต่ำกว่าการเย็นตัวเนื่องจากการเกิดช่องว่างอากาศเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการสเปรย์ ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณสำหรับกรณีนี้จะแสดงในตารางที่ 3.3 ในกรณี 3b

จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบตามความหนาของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้าง และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางแท่งงานหล่อตลอดความยาวตามระนาบดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการลดลงของอุณหภูมิจะเป็นไปก่อนข้างเข้าไปในบริเวณที่มีการสเปรย์เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดสมมติฐานให้มีช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของแบบหล่อกับแท่งงานหล่อเกิดขึ้นภายหลังจากที่มีการแข็งตัวของเปลือกของแข็งของโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลว ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้เมื่องานหล่อเคลื่อนที่ออกจากเครื่องหล่อจะยังคงมีอุณหภูมิที่ผิวที่สูงอยู่ ดังจะเห็นได้จากอุณหภูมิที่ผิวของแท่งงานหล่อเมื่อเคลื่อนตัวออกจากเครื่องหล่อที่ระยะ 3 เมตรจากเมนิสคัสจะมีค่าประมาณ 530 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณในกรณีนี้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่ผิวของงานหล่อที่วัดได้จริงจากโรงงานที่ระยะตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะในการทำงานและการถ่ายเทความร้อนของเครื่องหล่อที่ทำการผลิตโดยใช้เงื่อนไขในการผลิตจริงดังกล่าว จะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสของแท่งงานหล่อกับแบบหล่อที่เป็นวงล้อและสายพานได้ไม่ดี โดยภายหลังจากที่มีการแข็งตัวที่เปลือกของแท่งงานหล่อเกิดขึ้น จะทำให้มีช่องว่างระหว่างบริเวณผิวสัมผัสของแท่งงานหล่อและแบบหล่อทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี ถึงแม้ว่าจะมีการสเปรย์ด้วยน้ำให้กับผิวด้านนอกของวงล้อและสายพานเพื่อที่จะช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณดังกล่าวมีอัตราสูงขึ้นแล้วก็ตาม ดังจะสามารถยืนยันได้จากผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากกระบวนการผลิต จากผลการคำนวณดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าโปรแกรมการถ่ายเทความร้อนในสามมิติสามารถใช้ในการศึกษาสภาวะการทำงานของกระบวนการผลิตด้วยการหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน โดยสามารถทำการศึกษาผลกระทบของการเย็นตัวในบริเวณต่างๆ ของเครื่องหล่อและความเร็วที่ใช้ในการหล่อที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและพฤติกรรมของแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียม และมีความน่าเชื่อถือในระดับดี



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามระยะในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อ และอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง

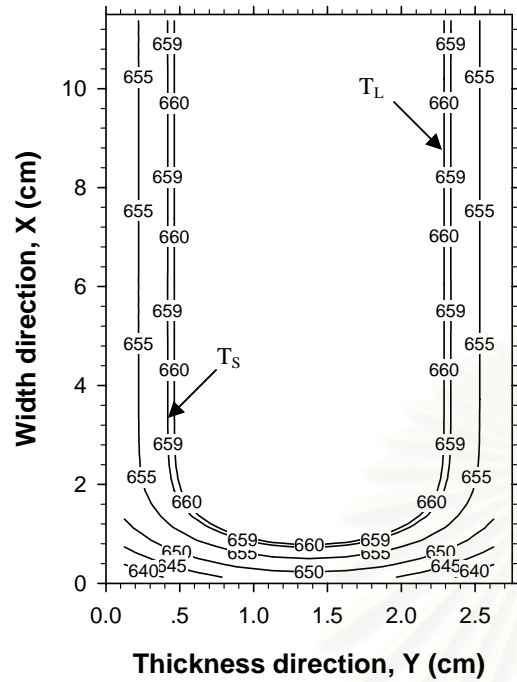


รูปที่ 4.15 รูปร่างและความลึกของบ่อน้ำโลหะ

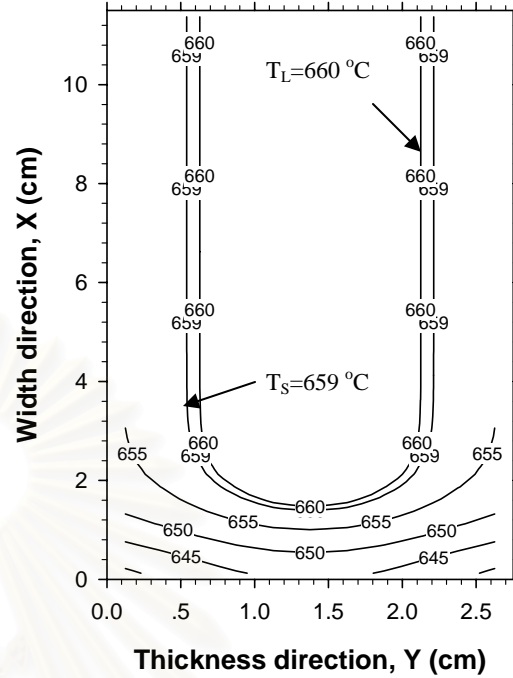
จากผลการคำนวณโดยใช้เงื่อนไขขอบเขตในกรณีนี้จะทำให้ได้ความลึกของบ่อน้ำโลหะประมาณ 12 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งบ่อน้ำโลหะจะมีความลึกมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีก่อนหน้านี้ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำลงเมื่อภายหลังจากที่แท่งงานหล่อออกจากบริเวณที่กำหนดเป็นระยะของแบบหล่อหรือระยะ 5 เซนติเมตรจากเมนิสคัสทำให้ตำแหน่งสิ้นสุดในการแข็งตัวมีระยะความยาวเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกรณีของความลึกของบ่อน้ำโลหะที่ทางโรงงานได้มีการบันทึกไว้ประมาณ 120 เซนติเมตรนั้น จากผลการคำนวณทั้งในสองกรณีข้างต้นสามารถยืนยันได้ว่าความลึกของบ่อน้ำโลหะที่ควรจะเป็นของแท่งงานหล่อที่มีขนาดรูปร่างของพื้นที่หน้าตัด  $27.5 \times 230$  มิลลิเมตร ควรจะมีระยะที่ได้ตามการคำนวณเนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมมีค่าการนำความร้อนที่สูง และแท่งงานหล่อที่ทำการผลิตมีขนาดที่บาง จึงทำให้มีความลึกของบ่อน้ำโลหะไม่เป็นไปตามที่ทางโรงงานได้มีการบันทึกไว้

จากรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงขนาดและรูปร่างของบ่อน้ำโลหะที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่หน้าตัดของแท่งงานหล่อที่ระยะต่างๆ จากเมนิสคัส ซึ่งจะสามารถทราบความกว้างและขนาดของบ่อน้ำโลหะที่ระยะต่างๆ ได้จากการอ่านค่าโดยตรงจากอุณหภูมิโซลิดัส

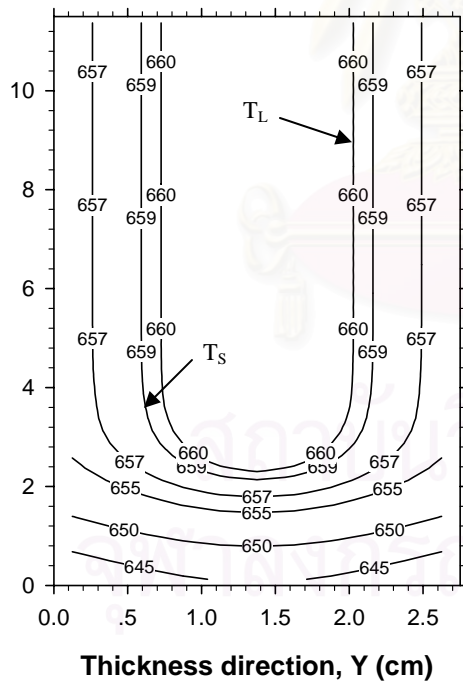




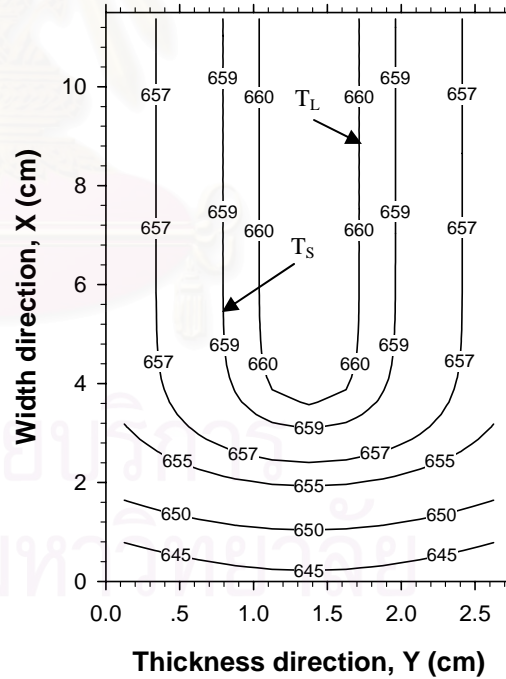
(a) At 4 cm from meniscus



(b) At 6 cm from meniscus



(c) At 8 cm from meniscus



(d) At 10 cm from meniscus

รูปที่ 4.16 รูปร่างของบ่อน้ำโลหะและการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางที่ระยะต่างๆ จากตำแหน่งเมนิสคัส

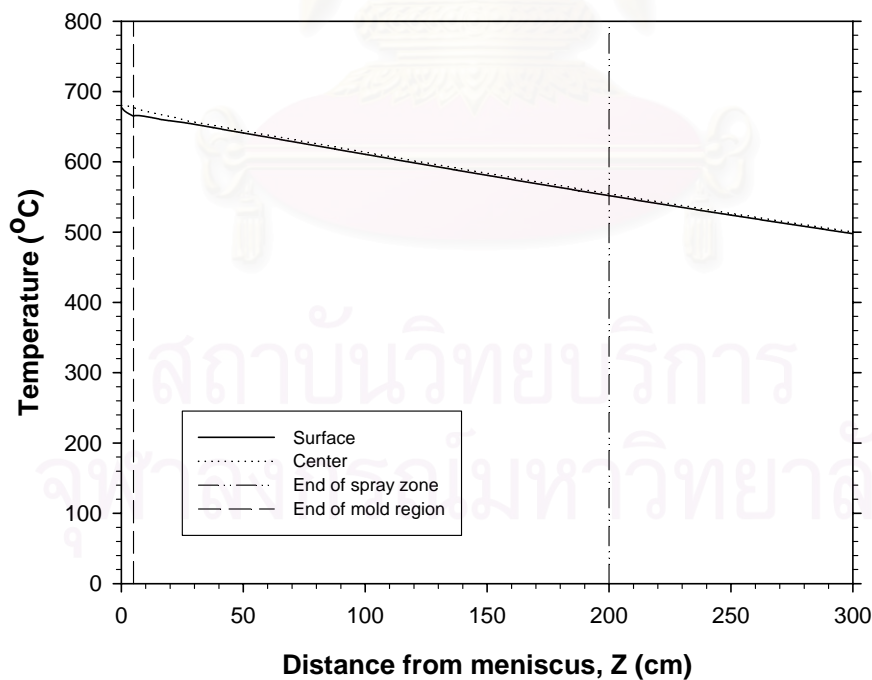
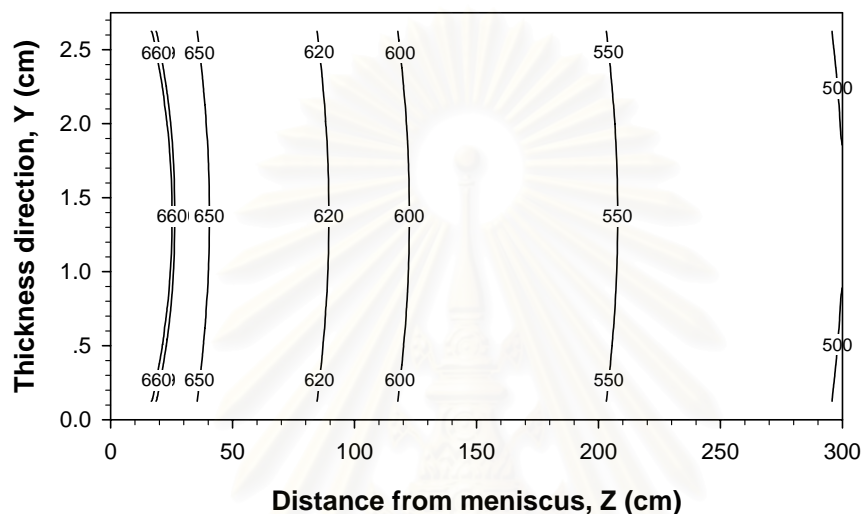
### 4.3.3 แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณี 3c

กรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสของแบบหล่อและแต่งงานหล่อมีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี ในขณะที่เดียวกันกำหนดให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดีในบริเวณที่มีการสเปรย์เช่นเดียวกับในกรณี 4.3.2 และบริเวณที่มีการยื่นตัวในอากาศกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสที่เท่ากันกับบริเวณที่มีการสเปรย์ เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตารางที่ 3.3 กรณี 3c

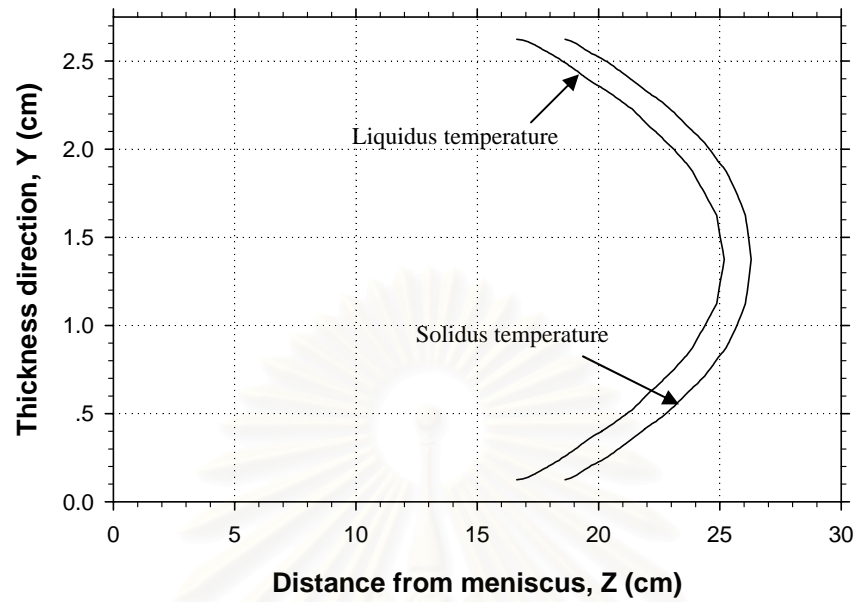
จากผลการคำนวณในรูปที่ 4.17 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบของความหนาในแต่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้าง และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางแต่งงานหล่อตลอดความยาวตามระนาบ จะเห็นว่าอุณหภูมิมักลดลงค่อนข้างช้าและลดลงอย่างต่อเนื่องทั้งในบริเวณที่มีการสเปรย์ และบริเวณที่มีการยื่นตัวในอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดีในบริเวณที่เป็นแบบหล่อและบริเวณที่มีการสเปรย์ ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่ผิวของงานหล่อที่คำนวณได้ที่ระยะ 3 เมตรจากเมนิสคัสมีอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าที่คำนวณได้ในกรณีนี้จะมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงจากโรงงาน โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าที่ระยะ 2 เมตรจากเมนิสคัส อุณหภูมิที่ผิวของแต่งงานหล่อที่คำนวณได้จากกรณี 4.3.2 และ 4.3.3 มีค่าที่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 550 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิที่ผิวที่คำนวณได้ที่ระยะ 3 เมตรจากเมนิสคัสในกรณี 4.3.3 มีค่าต่ำกว่าที่คำนวณได้ในกรณี 4.3.2 ประมาณ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากการยื่นตัวในบริเวณนี้ของกรณี 4.3.2 มีการกำหนดให้การยื่นตัวที่บริเวณที่มีการยื่นในอากาศมีค่าต่ำกว่าในบริเวณที่มีช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของแบบหล่อและแต่งงานหล่อเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการสเปรย์ และจากการเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้จากทั้งสองกรณี สามารถสรุปได้ว่าการยื่นตัวของแต่งงานหล่อในช่วงบริเวณของการสเปรย์ภายหลังจากที่โลหะมีการแข็งตัวที่เปลือกแล้วทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแต่งงานหล่อกับแบบหล่อที่เป็นวงล้อและสายพานเกิดขึ้นซึ่งระยะดังกล่าวกำหนดให้มีระยะจาก 5 เซนติเมตรจากเมนิสคัสไปจนถึงระยะที่แต่งงานหล่อออกจากเครื่องหล่อหรือที่ระยะ 2 เมตรจากเมนิสคัส ทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสของแต่งงานหล่อกับแบบหล่อที่เป็นวงล้อ/สายพานมีการถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดี ถึงแม้ว่าบริเวณดังกล่าวจะมีการสเปรย์ด้วยน้ำให้กับผิวด้านนอกของวงล้อและสายพานแล้วก็ตาม และด้วยสาเหตุนี้จึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวของงานหล่อที่วัดได้จริงจากกระบวนการที่ระยะ 3 เมตรจากเมนิสคัสยังคงมีอุณหภูมิสูงถึง 530 องศาเซลเซียส

จากผลการคำนวณในกรณีนี้จะทำให้ได้ความลึกของบ่อน้ำโลหะประมาณ 26 เซนติเมตร โดยมีระยะเริ่มต้นการแข็งตัวที่ประมาณ 17 เซนติเมตรจากเมนิสคัส ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากการที่การคำนวณในกรณีนี้กำหนดให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวสัมผัสของแบบหล่อและแต่งงานหล่อมีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี จึงทำให้จุดเริ่มต้นของการแข็งตัวมีระยะที่ลึกขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.18

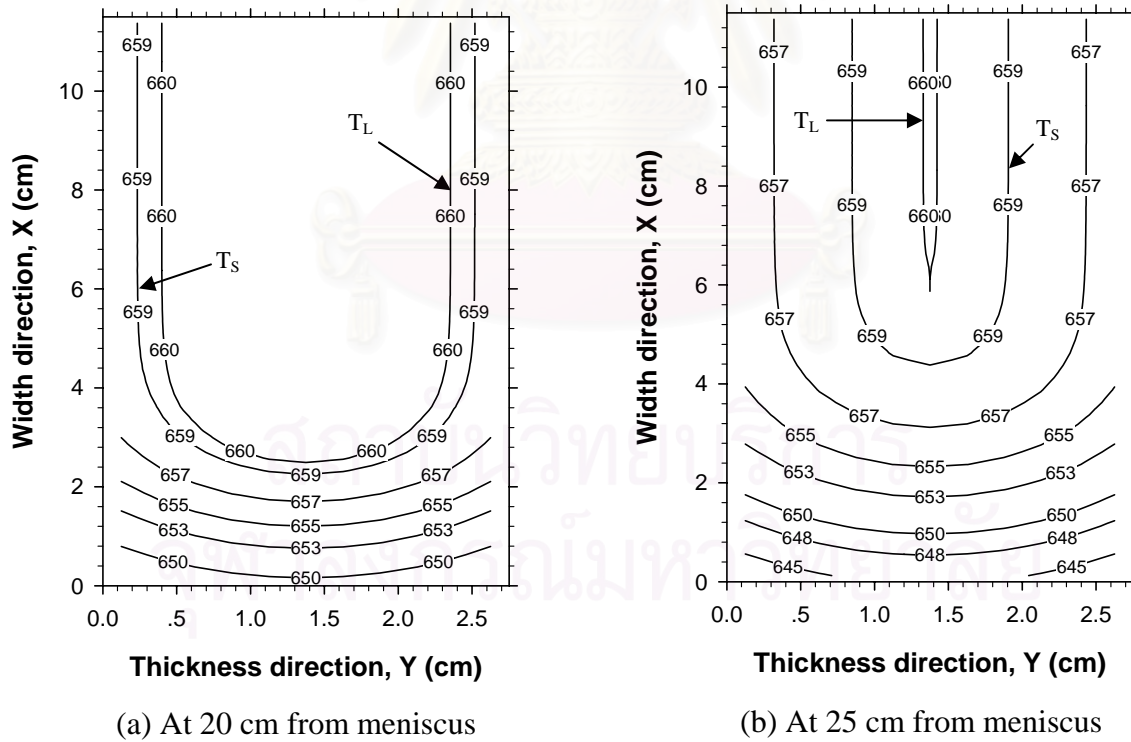
รูปที่ 4.19 แสดงขนาดและรูปร่างของบ่อน้ำโลหะที่ระยะต่างๆ จากเมนิสคัส จะเห็นว่าที่ระยะ 20 เซนติเมตรจากเมนิสคัสแท่งงานหล่อเพียงจะมีการแข็งตัวที่เปลือกมีความหนาแค่ประมาณ 5 มิลลิเมตร จากทิศทางตามแนวความหนา และที่ระยะ 25 เซนติเมตรจากเมนิสคัสแท่งงานหล่อใกล้จะมีการแข็งตัวเป็นของแข็งหมด



รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามระยะในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อ และอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง



รูปที่ 4.18 รูปร่างและความลึกของบ่อน้ำโลหะ



รูปที่ 4.19 รูปร่างของบ่อน้ำโลหะและการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางที่ระยะต่างๆ จากตำแหน่งเมนิสคัส

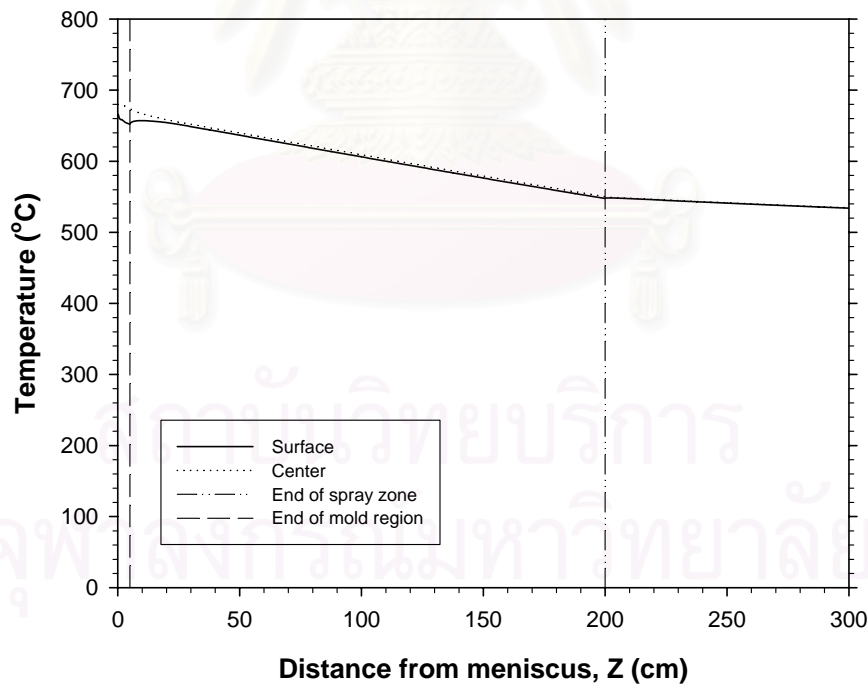
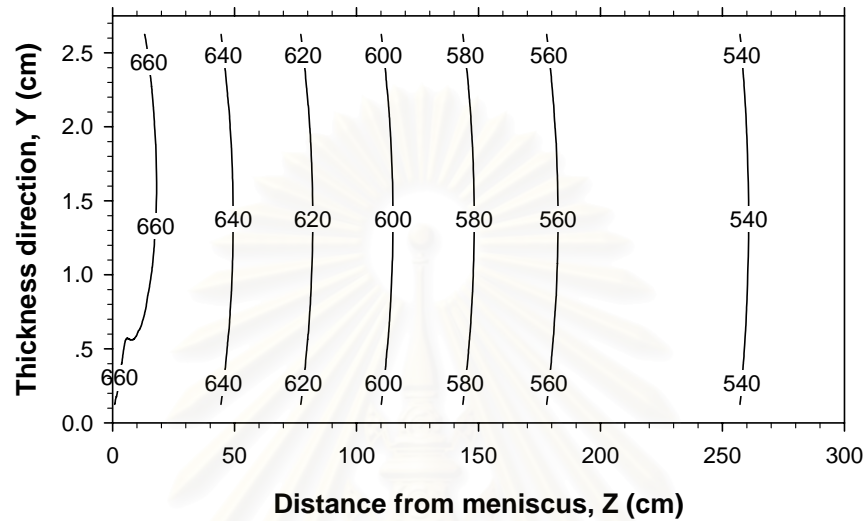
#### 4.4 แบบจำลองที่มีการประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตกรณีที่ 4

ในกรณีที่มีความไม่สมมาตรของการถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งงานหล่อด้วยเครื่องหล่อต่อเนื่อง ประเภทวงล้อ/สายพาน

ในความเป็นจริง โลหะอะลูมิเนียมที่ทำการหล่อด้วยเครื่องหล่อประเภทวงล้อ/สายพานนี้จะถูกถ่ายเทความร้อนออกไปยังแบบหล่อที่มีความแตกต่างกันอยู่ 2 ด้าน คือ ด้านที่เป็นวงล้อ และด้านที่เป็นสายพาน พร้อมทั้งนำข้อมูลและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตจริงมาใช้ในการคำนวณ เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในบริเวณแบบหล่อที่มีการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันในด้านที่เป็นวงล้อและด้านที่เป็นสายพาน โดยในการคำนวณสำหรับกรณีนี้จะใช้ความเร็วในการหล่อ 4 เมตรต่อนาที มีอุณหภูมิเทที่ 680 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นให้กับแบบหล่อที่เป็นวงล้อและสายพาน 33 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของอากาศ 33 องศาเซลเซียส และแท่งงานหล่อมีรูปร่างของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ  $27.5 \times 230$  มิลลิเมตร โดยในการคำนวณจะใช้เงื่อนไขขอบเขตสำหรับด้านที่เป็นวงล้อเหมือนกับในกรณีที่ 4.3.2 ซึ่งจะมีอุณหภูมิที่ผิวของแท่งงานหล่อจากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงจากกระบวนการผลิตที่ประมาณ 530 องศาเซลเซียส แต่ในกรณีนี้จะตั้งสมมติฐานให้การถ่ายเทความร้อนของผิวสัมผัสระหว่างสายพานและโลหะอะลูมิเนียมมีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี เนื่องจากสายพานที่ใช้ในเครื่องหล่อมีขนาดที่บางเพียง 1.4 มิลลิเมตร ทำให้เมื่อมีการหล่อต่อเนื่องไปเป็นระยะเวลาานอาจจะทำให้สายพานมีการเสีรูปร่างเนื่องจากผลของความร้อนที่ได้รับเป็นเวลานาน โดยอาจจะเกิดการโก่งงอ ไม่ได้ระนาบที่แบนราบเสมอกันตลอดทั้งแนวสายพาน ซึ่งจะส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี จึงกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสในบริเวณแบบหล่อของด้านที่เป็นสายพานมีค่าที่ต่ำกว่าของด้านที่เป็นวงล้อ ซึ่งเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณจะแสดงในตารางที่ 3.4

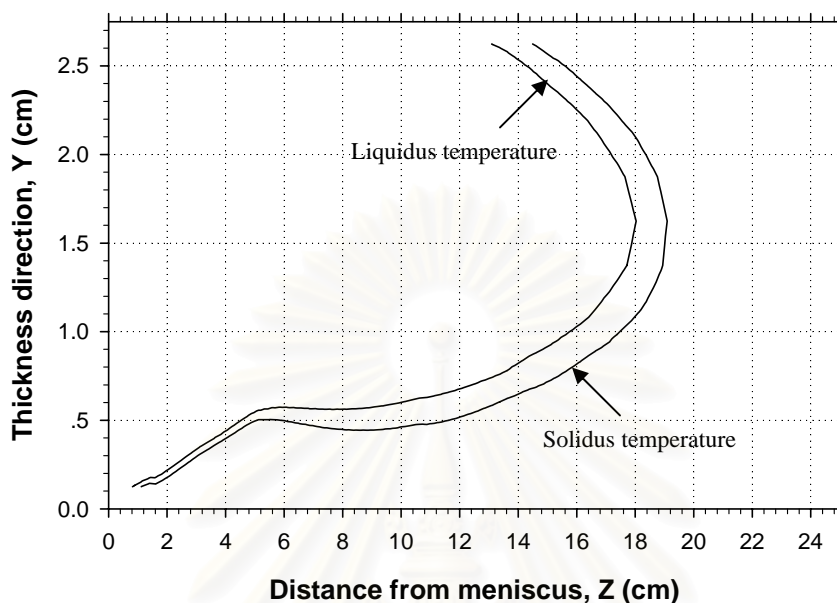
ผลจากการคำนวณที่ได้ในรูปที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในระนาบของความหนาในแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้าง และการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางแท่งงานหล่อตลอดความยาวตามระนาบ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีการลดลงอย่างช้าๆ ทั้งในบริเวณที่มีการสเปร์ย์ และบริเวณที่มีการเย็นตัวในอากาศเช่นเดียวกับในกรณีที่ 4.3.2 โดยบริเวณที่มีความสำคัญในการเย็นตัวของแท่งงานหล่อ คือบริเวณที่มีการสเปร์ย์ ซึ่งจะครอบคลุมช่วงระยะตั้งแต่ 5 เซนติเมตรจากเมนิสคัส ไปจนถึงระยะ 2 เมตรจากเมนิสคัสหรือตำแหน่งที่แท่งงานหล่อออกจากเครื่องหล่อ เพราะบริเวณช่วงนี้เป็นบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนที่มีระยะความยาวมากกว่าบริเวณอื่น แต่ในกรณีนี้จะสมมติให้บริเวณในช่วงดังกล่าวมีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งงานหล่อและแบบหล่อซึ่งเป็นวงล้อ/สายพานมีการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดี เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างแท่งงานหล่อกับแบบหล่อขึ้นภายหลังจากที่มีการแข็งตัวของเปลือกของแข็งที่ผิวของแท่งงานหล่อเช่นเดียวกับในกรณีที่ 4.3.2 และจากการคำนวณจะได้อุณหภูมิที่ผิวที่ระยะ 3

เมตรจากเมนิสคัส มีอุณหภูมิประมาณ 530 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากกระบวนการที่มีการผลิตจริง



รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามระยะทางในทิศทางความหนาของแท่งงานหล่อ และอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางของแท่งงานหล่อที่ตำแหน่งกึ่งกลางด้านความกว้าง

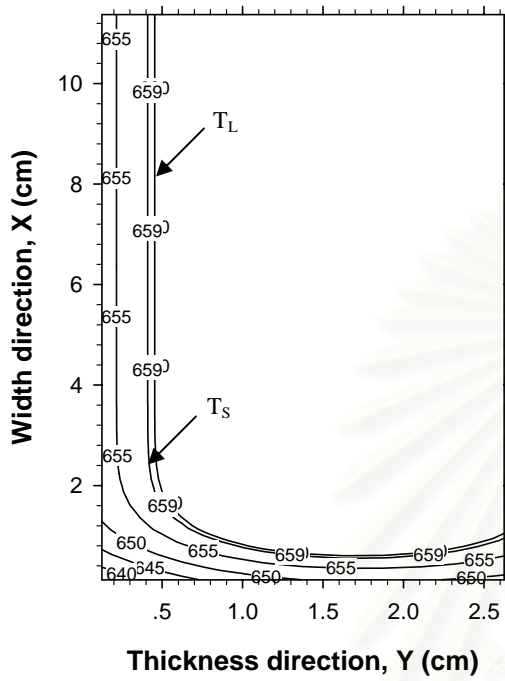




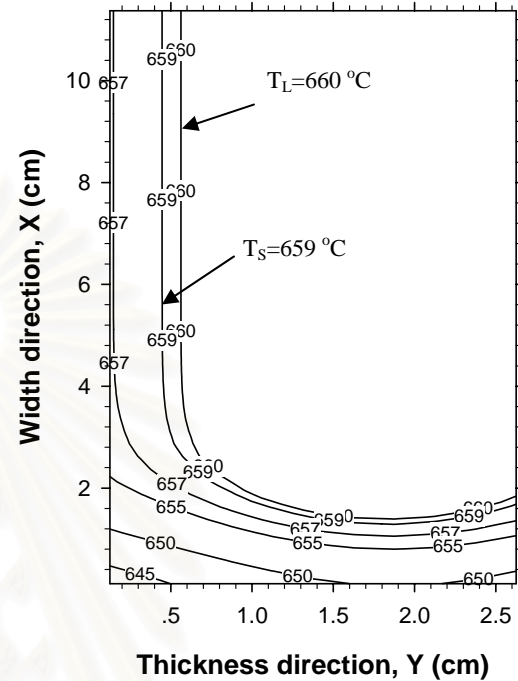
รูปที่ 4.21 รูปร่างและความลึกของบ่อน้ำโลหะ

ในส่วนของความลึกของบ่อน้ำโลหะที่ได้จากการคำนวณในกรณีนี้ จะเห็นได้ว่ารูปร่างของบ่อน้ำโลหะมีความไม่สมมาตรเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละด้านตามเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยบ่อน้ำโลหะมีความลึกประมาณ 19 เซนติเมตร ซึ่งมีความลึกมากกว่าในกรณี 4.3.2 ซึ่งมีระยะประมาณ 12 เซนติเมตร เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่ไม่ดีในด้านที่ทำงานหล่อสัมผัสกับสายพาน โดยโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวจะเริ่มแข็งตัวที่ระยะประมาณ 13-14 เซนติเมตรจากเมนิสคัส ในขณะที่ในด้านที่เป็นวงล้อจะเริ่มมีการแข็งตัวที่ตำแหน่งใกล้กับเมนิสคัส

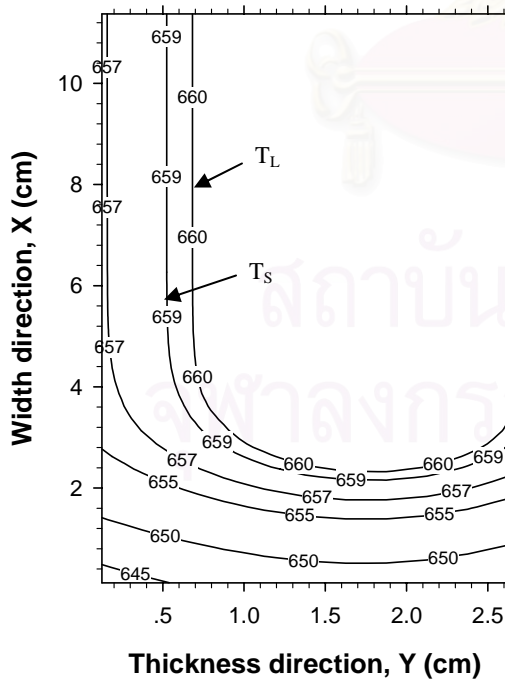
รูปที่ 4.22 แสดงขนาดและรูปร่างของบ่อน้ำโลหะและอุณหภูมิที่มีการกระจายตัวในพื้นที่หน้าตัดของแท่งงานหล่อที่ระยะต่างๆ จากเมนิสคัส โดยที่ตำแหน่ง 4 เซนติเมตรจากเมนิสคัส ความหนาของเปลือกของแข็งที่มีการแข็งตัวแล้วในด้านแบบหล่อที่เป็นวงล้อจะมีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ตามแนวความหนา และยังไม่มีการแข็งตัวเกิดขึ้นในด้านที่สัมผัสกับสายพานเหล็ก ที่ระยะ 15 เซนติเมตรจากเมนิสคัส การแข็งตัวในด้านวงล้อจะมีความหนาประมาณ 8 มิลลิเมตร ในขณะที่ในด้านที่เป็นสายพานเพิ่งจะเริ่มมีการแข็งตัวและมีความหนาประมาณ 1-2 มิลลิเมตร และที่ตำแหน่ง 20 เซนติเมตรจากเมนิสคัสจะเห็นได้ว่าแท่งงานหล่อมักมีการเย็นตัวกลายเป็นของแข็งจนหมดแล้ว



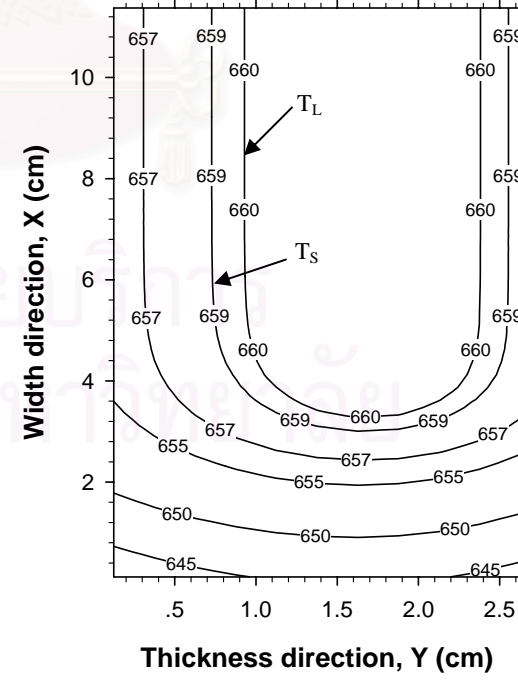
(a) At 4 cm from meniscus



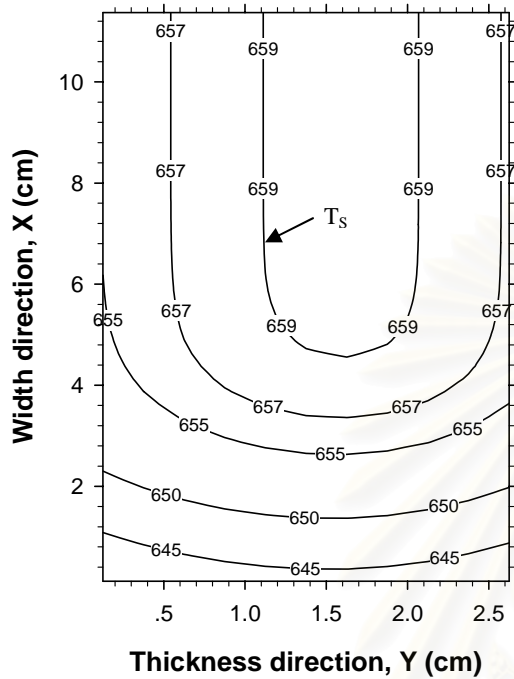
(b) At 8 cm from meniscus



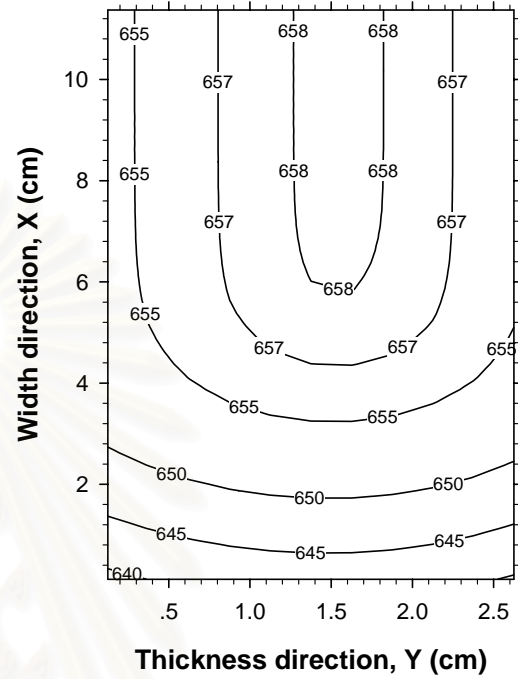
(c) At 12 cm from meniscus



(d) At 15 cm from meniscus



(e) At 18 cm from meniscus



(f) At 20 cm from meniscus

รูปที่ 4.22 รูปร่างของบ่อน้ำโลหะและการกระจายตัวของอุณหภูมิในภาคตัดขวางที่ระยะต่างๆ จากตำแหน่งเมนิสคัส

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### สรุปผลการวิจัย

โปรแกรมได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการแข็งตัวของโลหะอะลูมิเนียมโดยใช้สมการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ซึ่งทำการคำนวณด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) และได้ข้อสรุปที่สำคัญของงานวิจัยดังต่อไปนี้

- 1) โปรแกรมการถ่ายเทความร้อนสามมิติในสถานะไม่คงตัวได้ถูกพัฒนาขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้ในการคำนวณเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเครื่องหล่อต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพานได้
- 2) โปรแกรมสามารถทำการคำนวณเพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการ เช่น ความเร็วในการหล่อ สภาพการถ่ายเทความร้อนและการเย็นตัวในแบบหล่อ และอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ใช้ในการหล่อ ที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ และการแข็งตัวของชิ้นงานที่ทำการหล่อ
- 3) การเพิ่มความเร็วในการหล่อจะทำให้ความลึกของบ่อน้ำโลหะเพิ่มขึ้นแต่ตำแหน่งเริ่มต้นในการแข็งตัวที่เปลือกของแท่งงานหล่อยังคงอยู่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งเมนิสคัส
- 4) สภาพการถ่ายเทความร้อนและการเย็นตัวที่ไม่ดีในแบบจะทำให้ความลึกของบ่อน้ำโลหะเพิ่มขึ้น และทำให้ตำแหน่งเริ่มต้นในการแข็งตัวที่เปลือกของแท่งงานหล่อมีระยะที่ต่ำลงจากตำแหน่งเมนิสคัส
- 5) สภาพการถ่ายเทความร้อนและการเย็นตัวที่ไม่ดีในแบบหล่อจะส่งผลกระทบต่อความลึกของบ่อน้ำโลหะมากกว่าการเพิ่มความเร็วในการหล่อ
- 6) ผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องประเภทวงล้อ/สายพาน เพื่อวิเคราะห์สภาวะปัจจุบันของกระบวนการผลิต และหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต
- 7) โปรแกรมสามารถใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน โดยทำการจำลองรูปแบบการเย็นตัวของกระบวนการหล่อต่อเนื่องแบบไดเรคชันลึ และแบบลูกรีดคู่สำหรับโลหะอะลูมิเนียมได้

## รายการอ้างอิง

1. Zupuskalov, N. Comparison of Continuous Strip Casting with Conventional Technology. ISIJ International 43 (2003): 1115-1127.
2. Mizikar, E. A. Mathematical Heat Transfer Model for Solidification of Continuous Cast Steel Slabs. Trans. TMS-AIME 239 (1967): 1747-1753.
3. Brimacombe, J. K.; Samarasekera, I. V.; and Lait, J. E. Continuous Casting: Heat Flow, Solidification and Crack Formation. 2, United State of America: BookCrafters, 1984.
4. Hong, C. P.; Umeda, T.; and Kimura, Y. Numerical Models for Casting Solidification: Part 2. Application of the Boundary Element Method to Solidification Problems. Metallurgical Transaction B 15B (March 1984): 101-107.
5. Brimacombe, J. K. Design of Continuous Casting Machines Base on a Heat-Flow Analysis: State-of-the-Art Review. Can.Met.Quart 15 (1976): 163-175.
6. Piya, K.; Ittipon, D.; Suvanchai, P.; and Umeda, T. Simulation of Continuous Casting to be Used in SME in Thailand. The 2<sup>nd</sup> Interantional Conference on Struture Processing and Properties of Materials (2004): 563-570.
7. Mallik, R. K.; and Mehrotra, S.P. Mathematical Modelling of Single Roll Continuous Steel Strip Caster Based on Fluid Flow and Heat Transfer Considerations. ISIJ International 33 (1993): 595-604.
8. Li, G.; and Thomas, B. G. Transient Thermal Model of the Continuous Single-Wheel Thin-Strip Casting Process. Metallurgical and Materials Transactions B 27B (June 1996): 509-525.
9. Buttsworth, D. R.; and Jones, T. V. Radial Conduction Effects in Transient Heat Transfer Experiments. The Aeronautical Journal (May 1997): 209-212.
10. Sengupta, J.; Cockcroft, S.L.; Maijer, D.M.; Wells, M.A.; and Larouche, A. On the Development of a Three-Dimensional Transient Thermal Model to Predict Ingot Cooling Behavior during the Start-Up Phase of the Direct Chill-Casting Process for an AA5182 Aluminum Alloy Ingot. Metallurgical and Materials Transactions B 35B (June 2004): 523-540.
11. Flemings, M. C. Solidification Processing. United State of America: McGraw-Hill, Inc., 1974.

12. ปิยะ แก้วนพรัตน์. การวิเคราะห์การแข็งตัวในการหล่อแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
13. Spitzer, K. H.; Harste, K.; Weber, B.; and Schwerdtfeger, K. Mathematical Model for Thermal Tracking and On-line Control in Continuous Casting. ISIJ International 32 (1992): 848-856.
14. Sanders, R. E. Technology Innovation in Aluminum Products. JOM 53 (2001): 21-25.
15. Al-Khafaji, A. W.; and Tooley, J. R. Numerical Methods in Engineering Practice. United State of America: CBS College Publishing, 1986.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล	นาย ปัญญา บัวสมบุรา
วัน-เดือน-ปีเกิด	21 กุมภาพันธ์ 2520
ที่อยู่	20/29 หมู่บ้านสุขญา ถ. รังสิต-นครนายก ต. บึงขี้ไถ อ. ธัญบุรี จ. ปทุมธานี 12130
วุฒิการศึกษา	ประถมศึกษา โรงเรียนบ้านเชียงประชาเชิงเข็ด ปี 2532 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล ปี 2535 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอุดรพิทยานุกูล ปี 2537 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปี 2542
โทรศัพท์ติดต่อ	01-873-0050

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย