

การจำลองพฤติกรรมการแข็งตัวของงานหล่อ

SIMULATION OF CASTING SOLIDIFICATION

ปัญญา ศรีจันทร์

Panya Srichandr

คณะพลังงานและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Faculty of Energy and Material, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi.

บทคัดย่อ

ในการจำลองพฤติกรรมงานหล่อโลหะจะต้องคำนึงถึงความร้อนแฝง ทฤษฎีการแข็งตัวของโลหะตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางความร้อนของโลหะและวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ การดัดแปลงสมการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เอนทัลปีและอุณหภูมิดัดแปลงจะทำให้ปัญหาในการจำลองลดลง ในทางปฏิบัติพบว่า การจำลองโดยใช้วิธีดังกล่าวให้ผลใกล้เคียงกับที่วัดได้จากการทดลอง การจำลองพฤติกรรมงานหล่อโลหะได้อย่างแม่นยำจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมงานโลหะ

ABSTRACT

In the simulation of solidification processes it is important to consider relevant solidification theories and the variation in thermal properties of castings and moulds. The problem is simplified through the modification of heat transfer equation in which the temperature is replaced by enthalpy and modified temperature. The results of the simulation agree reasonably well with those obtained experimentally. Potential benefits which could arise from accurate simulation are discussed.

* คัดจากบทความที่น่าสนใจในการประชุมวิชาการ เรื่อง "การออกแบบและจำลองแบบในงานวิศวกรรม"

จัดโดย วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ ระหว่างวันที่ 1-3 เมษายน 2532

รายการสัญลักษณ์ที่ใช้

C_o	=	average solute concentration
C_L	=	solute concentration in liquid
k_e	=	partition coefficient
f_s	=	fraction solid
f_l	=	fraction liquid = $1 - f_s$
α	=	back diffusion parameter
	=	$4 D_s/t_f \lambda^2$
D_s	=	diffusion coefficient of solute in solid
t_f	=	local solidification time
T	=	temperature
t	=	time
λ	=	secondary arm spacing
ρ	=	density
C_p	=	heat capacity
k	=	thermal conductivity
H_f	=	latent heat of fusion
H	=	enthalpy (heat content)
θ	=	modified temperature
k_o	=	referenced thermal conductivity
Δt	=	time step
x, y	=	cartesian coordinates
T_i	=	interfacial temperature
A, n	=	material constants

บทนำ

การหล่อ (casting) นับว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากที่สุดขั้นตอนหนึ่งในการผลิตโลหะ ชิ้นงานโลหะทุกชนิด (นอกจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากผงโลหะ) ล้วนต้องผ่านกระบวนการหล่อมาทั้งสิ้น การหล่อโลหะอาจจะเป็นการหล่อรูปพรรณ (shaped casting) ซึ่งหลังจากการตกแต่งเพียงเล็กน้อยจะสามารถนำไปใช้งานได้เลย หรือการหล่อเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการขึ้นรูปโดยกระบวนการทางกล (metal working) ต่าง ๆ (เช่น การรีด) โดยอาจจะหล่อเป็นอินกอต (ingot) หรือ สแลบ (slab) หรือ บิลเล็ต (billet)

คุณภาพและคุณสมบัติของงานหล่อจะขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างภายในและความสมบูรณ์ของงานหล่อนั้น ๆ เป็นสำคัญ โครงสร้างและความสมบูรณ์ของงานหล่อจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการแข็งตัว (solidification behaviour) และการเปลี่ยนเฟสในสถานะของแข็ง (solid state transformation) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเย็นตัวซึ่งทั้งสองจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ (ส่วนผสมทางเคมี) และประวัติทางความร้อน

(thermal history) ของงานหล่อ ประวัติทางความร้อนของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดของโลหะการออกแบบงานหล่อ วัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อ ตลอดจนอุณหภูมิเท ลักษณะการไหลของน้ำโลหะ และลักษณะของผิวสัมผัส (interface) ระหว่างงานหล่อกับแบบ ประวัติทางความร้อนจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบงานหล่อ เช่นการออกแบบ รูสัน รูเท และทางไหลของน้ำโลหะ ตลอดจนการเลือกวัสดุสำหรับทำแบบหล่อ นอกจากนี้ประวัติทางความร้อนยังมีประโยชน์ในการทำนายลักษณะของโครงสร้างภายในบางประการและความสมบูรณ์ของงานหล่อได้อีกด้วย

ในทางปฏิบัติจะสามารถบันทึกประวัติทางความร้อนของงานหล่อได้โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ในระหว่างการเย็นตัวของงานหล่อ การปฏิบัติดังกล่าวนี้ว่าสิ้นเปลืองมากเพราะนอกจากเทอร์โมคัปเปิลจะมีราคาแพงแล้วยังมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองเป็นจำนวนหลายครั้งจึงจะได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ ทั้งนี้เพราะมีตัวแปรเป็นจำนวนมากที่มีอิทธิพลต่อประวัติทางความร้อนของงานหล่อ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการจำลองพฤติกรรมของการแข็งตัวของงานหล่อโลหะจะทำให้เราสามารถศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว อันจะทำให้ลดความจำเป็นในการทดลองที่สิ้นเปลืองดังกล่าวได้อย่างมาก

การแข็งตัวของโลหะ

การแข็งตัวของโลหะผสมเฟสเดียว (single phase alloys) โดยปกติแล้วจะเป็นแบบเดนดริติก (dendritic solidification) กล่าวคือของแข็งที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะคล้ายต้นไม้โดยมีลำต้น (primary arms) และกิ่ง (secondary arms) เป็นส่วนประกอบสำคัญซึ่งเราเรียกของแข็งลักษณะดังกล่าวว่าเดนไดรต์ (dendrite) ในระหว่างการแข็งตัวจะเกิดการกระจายของธาตุผสม (solute redistribution) ซึ่งจะทำให้ปริมาณของธาตุผสมในตำแหน่งต่าง ๆ ของเดนไดรต์ไม่เท่ากัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวเราเรียกว่าเกิดการเกาะกลุ่มระยะใกล้ (microsegregation) ลักษณะของการเกาะกลุ่มระยะใกล้นี้จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแยกตัว (partition coefficient) และสัมประสิทธิ์การแพร่ซึม (diffusion coefficient) ของธาตุที่เกี่ยวข้อง เมื่อการแข็งตัวสิ้นสุดลงความแตกต่างของธาตุผสมในตำแหน่งต่าง ๆ ของเดนไดรต์อาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะ และพารามิเตอร์ระหว่างการแข็งตัว บนพื้นฐานของความมากน้อยของการเกาะกลุ่มระยะใกล้นี้ เราสามารถแบ่งลักษณะการแข็งตัวของโลหะผสมเฟสเดียวออกเป็น 3 แบบคือ

1. การแข็งตัวแบบสมดุลย์ (equilibrium solidification) หมายถึงการแข็งตัวที่เกิดขึ้นช้ามาก (เมื่อเทียบกับอัตราการแพร่ซึมของธาตุผสม) ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การแข็งตัวจะเป็นดังสมการที่ (1):

$$C_L = C_0 / (1 - (1 - k_e)f_s) \quad \text{----- (1)}$$

2. การแข็งตัวแบบซีล (Scheil solidification) หมายถึงการแข็งตัวที่ไม่มีการแพร่ซึมในของแข็งเกิดขึ้นเลย ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การแข็งตัวจะเป็นดังสมการที่ (2):

$$C_L = C_0(1 - f_s)^{k_e - 1} \quad \text{----- (2)}$$

3. การแข็งตัวแบบมีการแพร่ซึมย้อนกลับ (back diffusion) หมายถึงการแข็งตัวที่ธาตุผสมมีการแพร่ซึมในเดนไดรต์เป็นปริมาณจำกัด ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสองกรณี กรณีแรกเป็นกรณีที่ความสามารถใน

การแพร่ซึม (diffusivity) ของธาตุผสมไม่สูงมากนัก จะมีความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การแข็งตัวดัง
ในสมการที่ (3)⁽¹⁾:

$$C_L = C_0 \{1 - (1 - 2\alpha k_e) f_s\} \frac{k_e - 1}{1 - 2\alpha k_e} \quad (3)$$

ในกรณีที่ธาตุผสมมีความสามารถในการแพร่ซึมสูงมาก (เช่นคาร์บอนในเหล็ก) แต่ไม่ถึงกับเป็น
การแข็งตัวแบบสมดุลย์ ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การแข็งตัวจะเป็นดังสมการที่ (4)⁽²⁾:

$$C_L = C_0 \{1 - (1 - 2\Omega k_e) f_s\} \frac{k_e - 1}{1 - 2\Omega k_e} \quad (4)$$

$$(\Omega = \alpha - \alpha \exp(-\frac{1}{\alpha}) - \frac{1}{2} \exp(-\frac{1}{2\alpha}))$$

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับสมการที่ (1) ถึงสมการที่ (4) ก็คือ f_s ซึ่งเป็นสัดส่วนของโลหะที่แข็งตัว
แล้ว ทั้งนี้เพราะเป็นส่วนที่คายความร้อนแฝงออกมาอันจะมีผลกระทบต่ออุณหภูมิของงานหล่อที่กำลังแข็งตัวอยู่

การดัดแปลงสมการถ่ายเทความร้อน

ปรากฏการณ์พื้นฐานของการแข็งตัวของโลหะก็คือการถ่ายเทความร้อนจากน้ำโลหะสู่บรรยากาศ
นั่นเอง การถ่ายเทความร้อนในระหว่างการหล่อโลหะจะเป็นทั้ง 3 แบบคือ การนำ (conduction) การพา
(convection) และการแผ่รังสี (radiation) ซึ่งความสำคัญของแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการหล่อ
เป็นต้นว่า ในการหล่อสแลบบนต่อเนื่อง (continuous slab casting) การพาและการแผ่รังสีจะมีความสำคัญ
พอๆ กับการนำ ส่วนการหล่อในแบบหล่อทรายการพาและการแผ่รังสีจะมีความสำคัญน้อยมากเป็นต้น ใน
บทความนี้เป็นการรายงานผลจากการหล่อในแบบหล่อทราย ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำใน 2 มิติ
เป็นหลัก

สมการของการถ่ายเทความร้อนจะมีรูปแบบดังในสมการที่ (5):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) \quad (5)$$

ซึ่งในกรณีทั่วไปที่ค่า k ไม่คงที่เราจะได้ว่า:

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} &= k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \frac{\partial k}{\partial y} \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} &= k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial k}{\partial T} \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

สมการที่ (6) เป็นสมการประเภท nonlinear partial differential equation ซึ่งยากต่อการหาคำตอบ
ถ้าเราดัดแปลงสมการที่ 5 ให้อยู่ในรูปของเอนทัลปี (enthalpy, H) และอุณหภูมิดัดแปลง (modified
temperature, O) ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 7 และ 8⁽³⁾:

$$H = \int C_p dT + (1 - f_s) H_f \quad (7)$$

$$\phi = \int \frac{k}{k_0} dT \quad (8)$$

เราจะได้สมการถ่ายเทความร้อนในรูปของสมการที่ (9):

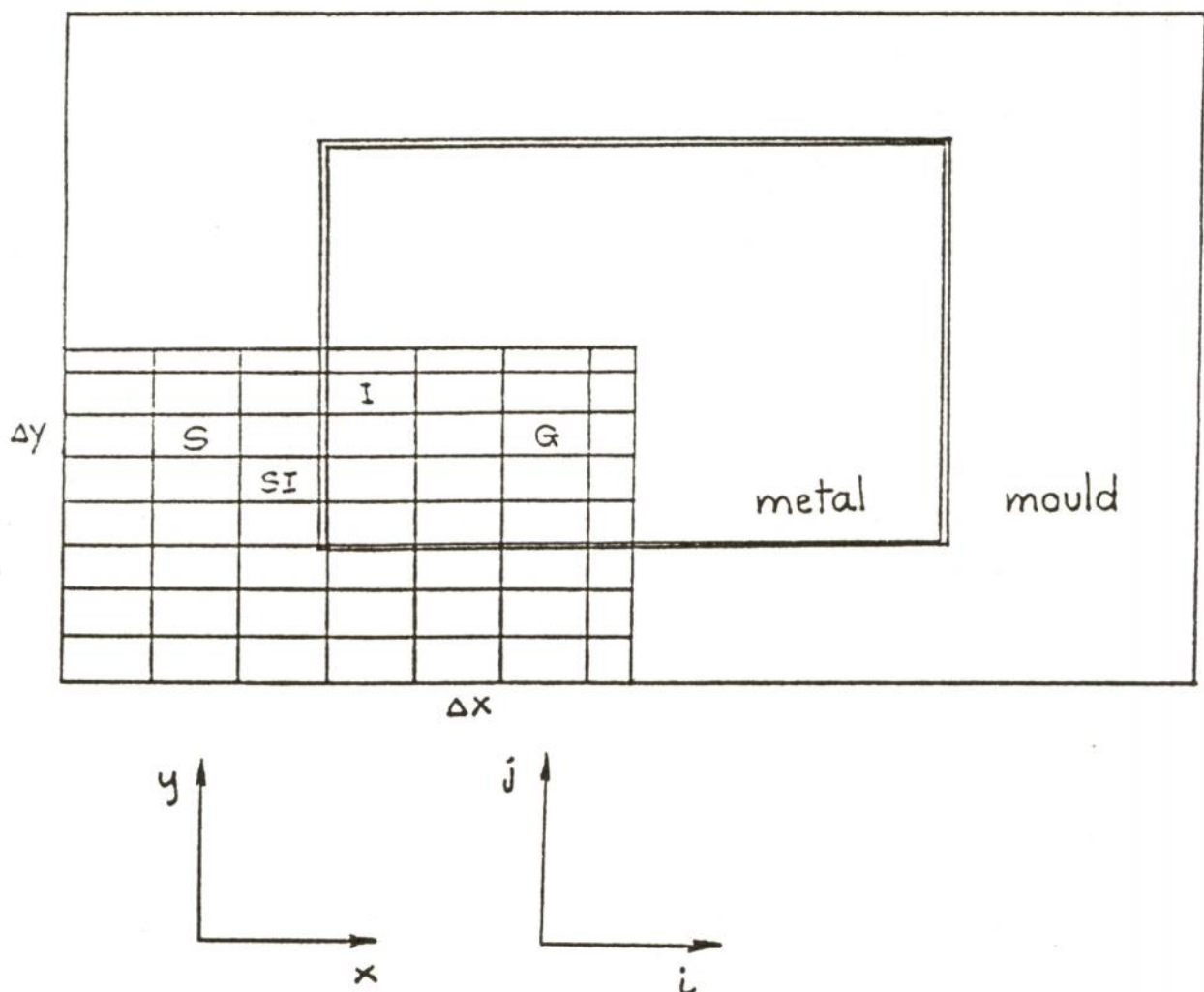
$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = k_o \left\{ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right\} \text{----- (9)}$$

ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นและหาคำตอบได้ง่ายกว่า

ขั้นตอนและวิธีการในการจำลอง

จุดประสงค์หลักในการจำลองก็คือ การแก้สมการที่ (9) โดยวิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference method) ซึ่งจะคำนวณหาค่าของเอ็นทัลปีเป็นเวลาต่าง ๆ เริ่มจากการเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อ การเปลี่ยนค่าเอ็นทัลปีเป็นอุณหภูมิจะทำได้โดยอาศัยสมการที่ (7) โดยที่ f_s จะขึ้นอยู่กับลักษณะการแข็งตัวของโลหะผสมแต่ละชนิดดังได้กล่าวแล้ว

ขั้นแรกจะต้องนำภาคตัด (cross-section) ของงานหล่อในระนาบที่ขนานกับการถ่ายเทความร้อน มาแบ่งเป็นส่วนเล็ก ๆ (nodes) ดังตัวอย่างในรูปที่ 1 จากนั้นจะให้ค่าเอ็นทัลปีแก่ส่วนต่าง ๆ เหล่านั้นและคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของเอ็นทัลปีของแต่ละส่วนโดยอาศัยรูปแบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของสมการที่ (9) และหลักการอนุรักษ์พลังงาน



รูปที่ 1 การแบ่ง nodes ในแบบหล่อและงานหล่อ

สำหรับ nodes ทั่วไป (เช่น G);

$$H'_{i,j} = H_{i,j} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x^2} (\phi_{i-1,j} + \phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j}) + \frac{\Delta t}{\rho \Delta y^2} (\phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j})$$

สำหรับ nodes ที่อยู่ติดกับแบบหล่อ (เช่น I);

$$H'_{i,j} = H_{i,j} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta x^2} (2\phi_{I,j} + \phi_{i+1,j} - 3\phi_{i,j}) + \frac{\Delta t}{\rho \Delta y^2} (\phi_{i,j-1} + \phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j})$$

เมื่อ I เป็นอุณหภูมิที่อินเตอร์เฟซซึ่งได้จากการเปลี่ยนอุณหภูมิที่อินเตอร์เฟซเป็นอุณหภูมิที่อินเตอร์เฟซในขณะใด ๆ จะหาได้จากสมมติฐานที่ว่าผิวของงานหล่อและแบบหล่อจะมีอุณหภูมิเท่ากันที่จุดสัมผัส (ซึ่งได้พิสูจน์ว่าเป็นจริงจากการทดลอง⁽⁴⁾) และพลังงานที่ถ่ายเทจากงานหล่อจะเท่ากับพลังงานที่เข้าสู่แบบหล่อ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (10);

$$\frac{k_s (T_i - T_s)}{\Delta x / 2 (\Delta y / 2)_s} = \frac{k_m (T_m - T_i)}{\Delta x / 2 (\Delta y / 2)_m} \quad \text{----- (10)}$$

เมื่อ T_i เป็นอุณหภูมิที่อินเตอร์เฟซ T_s และ T_m เป็นอุณหภูมิของ nodes ที่อยู่ติดกันในแบบหล่อและในงานหล่อตามลำดับ

สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของ node ลักษณะอื่น ๆ ก็สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน

สำหรับในแบบหล่อทรายเราไม่มีความจำเป็นต้องดัดแปลงสมการการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในรูปของเอ็นธาลปีและอุณหภูมิที่ดัดแปลง เนื่องจากไม่มีความร้อนแฝงเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งคุณสมบัติทางความร้อนของแบบหล่อทรายจะไม่มีความสัมพันธ์ (functional relationship) ที่แน่นอนกับอุณหภูมิแต่จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอย่างอื่น เช่น ชนิดของทราย ขนาดของเม็ดทราย ความหนาแน่นของแบบ เป็นต้น นอกจากนี้คุณสมบัติทางความร้อนของแบบหล่อทรายก็ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อโลหะในทางปฏิบัติจะถือว่ามีความคงที่⁽⁵⁾

สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในแบบหล่อทรายจึงอยู่ในรูปของอุณหภูมิธรรมดา สำหรับ nodes ทั่วไป (เช่น S)

$$T'_{i,j} = T_{i,j} + \frac{\Delta t k_s}{\rho C_p \Delta x^2} (T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}) + \frac{\Delta t k_s}{\rho C_p \Delta y^2} (T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 2T_{i,j})$$

สำหรับ nodes ที่ติดกับโลหะ (เช่น SI)

$$T'_{i,j} = T_{i,j} + \frac{\Delta t k_s}{\rho_s C_p \Delta x^2} (T_{i+1,j} + T_{i-1,j} - 2T_{i,j}) + \frac{\Delta t k_s}{\rho_s C_p \Delta y^2} (2T_{i,j} + T_{i,j-1} - 3T_{i,j})$$

สมการสำหรับ nodes อื่น ๆ ในแบบหล่อก็สามารถสร้างขึ้นมาได้ในทำนองเดียวกัน

อนึ่ง เนื่องจากการสร้างสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ดังกล่าวเป็นแบบ explicit จึงจำเป็นต้องกำหนดขนาดของขั้นเวลา (time step, Δt) ในการคำนวณเพื่อป้องกันการเกิดความคลาดเคลื่อนสะสม (cumulative errors) ซึ่งจะทำให้ได้คำตอบที่ไม่ถูกต้องเนื่องจาก mathematical instability การหาขนาดของขั้นเวลานี้จะได้รับการพิจารณา node ของโลหะที่มุมของงานหล่อ ซึ่งจะได้ว่า:

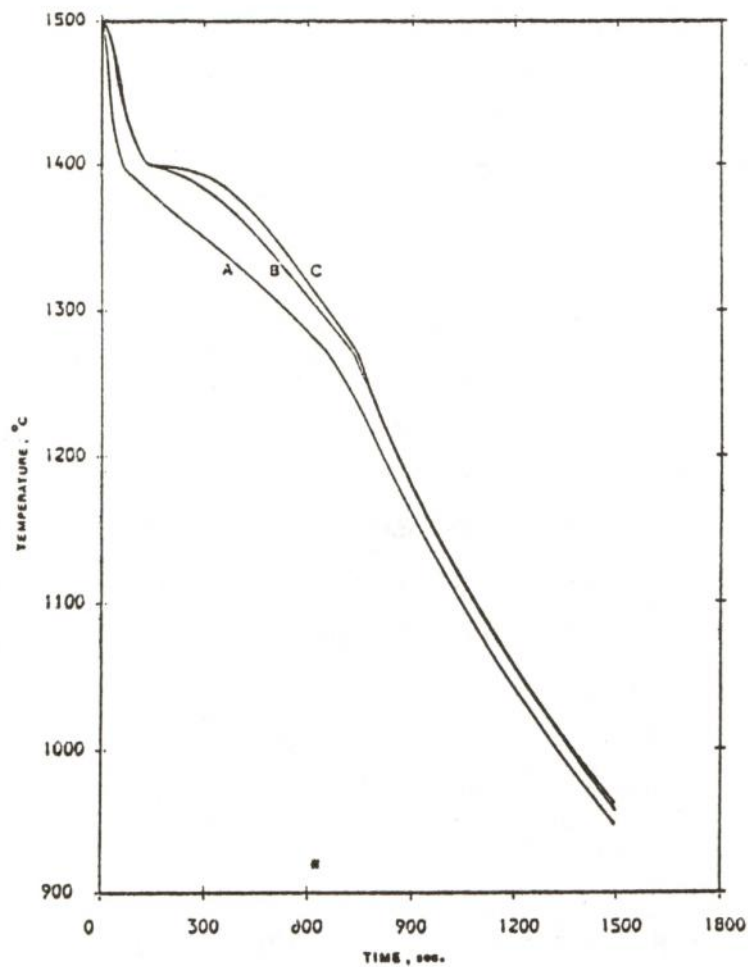
$$\Delta t < \frac{\rho C_p}{3k_{\max} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \quad \text{----- (11)}$$

เมื่อ $k_{\max}$ เป็นค่าการนำความร้อนสูงสุดของโลหะซึ่งในกรณีของโลหะหลายชนิดจะเป็นค่าการนำความร้อนของโลหะขณะเริ่มเท ρ , C_p ก็จะต้องเป็นคุณสมบัติของโลหะในขณะเดียวกัน

โปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการจำลอง

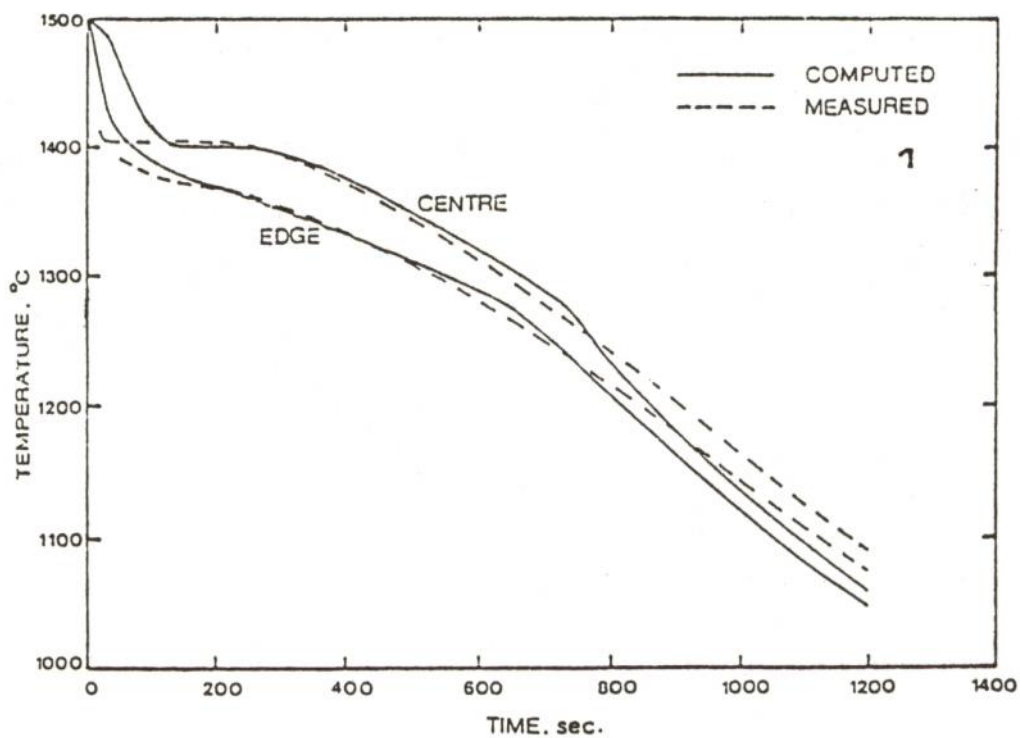
สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในหัวข้อที่ผ่านมาได้ถูกนำมาเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษา Fortran 77 รายละเอียดของโปรแกรมจะดูได้จาก flow diagram ในภาคผนวก ก คุณสมบัติทางความร้อนที่ใช้ในการคำนวณจะเห็นได้จากภาคผนวก ข (6.7) ข้อมูลที่ได้จะเป็นอุณหภูมิของ node ต่าง ๆ ที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งอาจจะใช้ graphic software พล็อตข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูปของกราฟก็ได้ ตัวอย่างผลของการคำนวณจะเห็นได้ในรูปที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการทดลอง^(18,19) จะเห็นได้ในรูปที่ 3 และรูปที่ 4

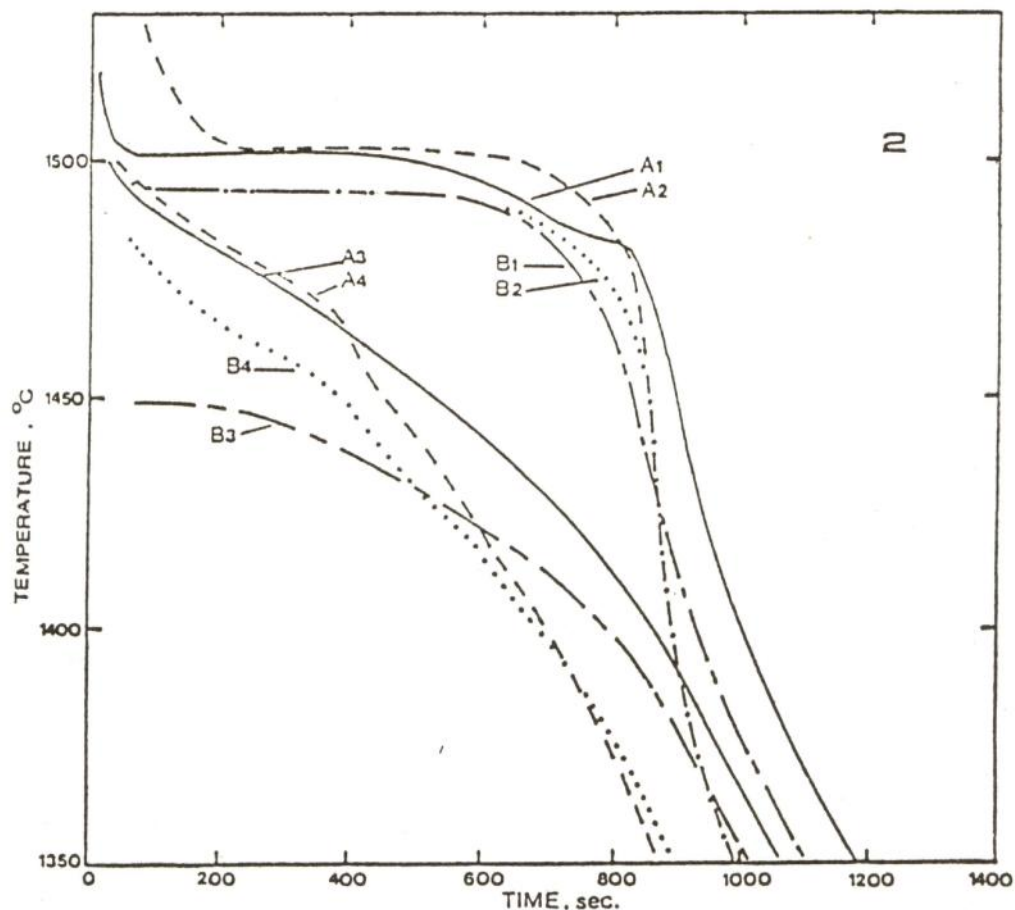


รูปที่ 2 ผลการจำลองของงานหล่อขนาด 100×100 มม.;

A = 5 มม.จากผิว, B = 25 มม.จากผิว และ C = กึ่งกลางงานหล่อ



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบการจำลองกับการทดลองที่ใช้เหล็กกล้ามังกานีส



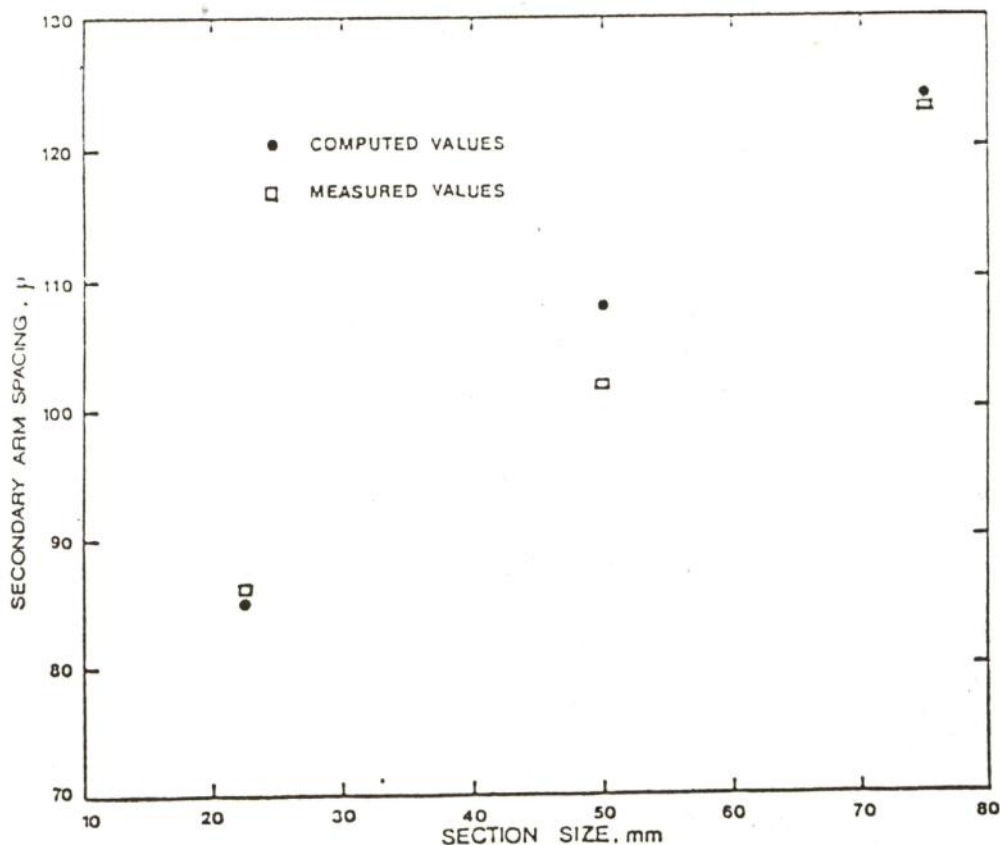
รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบการจำลองกับการทดลองที่ใช้เหล็กกล้าสเตนเลส
1,3 = ค่าที่ได้จากการทดลอง, 2,4 เป็นค่าที่ได้จากการจำลอง

การทำนายขนาดแขนของเดนไดรต์

ขนาดแขนของเดนไดรต์ (secondary arm spacing) นับเป็นส่วนของโครงสร้างจุลภาค (micro-structural features) ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติทางกลของงานหล่อ⁽¹⁰⁾ จากการทดลองพบว่าขนาดของแขนเดนไดรต์จะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการแข็งตัว (solidification time) ของโลหะดังสมการที่ (12)⁽¹⁰⁾:

$$\lambda = A t_f^n \quad (12)$$

จากการจำลองพฤติกรรมการณ์การแข็งตัวของโลหะจะทำให้เราสามารถทราบได้ว่า t_f ของส่วนต่าง ๆ ของงานหล่อหรือของงานหล่อขนาดต่าง ๆ เป็นเท่าใด โดยการคำนวณเวลาในระหว่างช่วง liquidus และ solidus การเปรียบเทียบขนาดของแขนเดนไดรต์จากการทำนายและผลที่ได้จากการทดลอง⁽⁸⁾ จะเห็นได้ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เปรียบเทียบขนาดแขนเดนไดรท์ที่ได้จากการจำลองและการทดลอง

ประโยชน์และข้อจำกัดของการจำลอง

จะเห็นได้จากหัวข้อที่ผ่านมาว่า การจำลองการแข็งตัวของโลหะให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ประโยชน์โดยตรงที่จะได้จากการจำลองก็คือ การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแข็งตัวของงานหล่อซึ่งมีเป็นจำนวนมาก เช่น อุณหภูมิเท อุณหภูมิของแบบหล่อ ความหนาของแบบหล่อ การใช้ทุนเย็น (chill) ชนิดของโลหะ เป็นต้น การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้โดยการทดลองจะสิ้นเปลืองมาก เพราะต้องทดลองหลายครั้งเนื่องจากจะต้องเปลี่ยนค่าตัวแปรเพียงตัวเดียวเท่านั้นสำหรับการทดลองแต่ละครั้ง ประโยชน์ต่อเนื่องที่จะตามมาได้แก่การออกแบบงานหล่อ ทั้งการออกแบบรูปร่างชิ้นงาน การออกแบบรูลันรูเท เพื่อที่จะให้ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ปราศจากช่องโหว่ทั้งช่องโหว่ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ (micro - and macroporosity) การออกแบบดังกล่าวจะมีความสำคัญมากสำหรับการหล่อโลหะที่มีการหดตัวสูงในระหว่างการแข็งตัว เช่น เหล็กกล้า อลูมิเนียมผสม บรอนซ์ต่าง ๆ การที่เรารู้อุณหภูมิของจุดต่าง ๆ ในงานหล่อที่เวลาใด ๆ จะทำให้เราทราบว่าส่วนไหนของโลหะที่แข็งตัวแล้ว ส่วนไหนที่เป็นกึ่งแข็งกึ่งเหลว (mushy zone) ส่วนไหนที่เป็นของเหลว จะทำให้เราทราบว่าจุดไหนจะเย็นตัวช้าที่สุด (hot spot) และเราควรจะออกแบบการไหลของน้ำโลหะและรูลัน (feeder head) อย่างไรจึงจะสิ้นเปลืองน้อยที่สุดและให้ประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้เรายังสามารถใช้ในการทำนายลักษณะของโครงสร้างงานหล่อบางประเภท เช่น ขนาดแขนของเดนไดรท์ (ดังได้กล่าวแล้ว) ปริมาณของเฟสที่สอง (nonequilibrium and equilibrium second phases) ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลและการปฏิบัติการทางความร้อน (heat treatments) ของงานหล่อได้อีกด้วย

สำหรับแบบจำลองที่เสนอในบทความนี้ เป็นการจำลองงานหล่อที่มีรูปร่างที่ไม่สลับซับซ้อนมากและมีการถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติเท่านั้น ในทางปฏิบัติงานหล่อส่วนใหญ่จะมีรูปร่างค่อนข้างซับซ้อนและมีการถ่ายเทความร้อนใน 3 มิติ การสร้างแบบจำลองจะต้องใช้วิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element method) ซึ่งมีความสลับซับซ้อนมากกว่าและจะต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำสูง การใช้ไฟไนต์อีลิเมนต์ในการจำลองนับว่ามีประโยชน์กว้างขวางกว่าการใช้ฟิสิกส์เฟอเรนซ์เพราะสามารถจะรวมการคำนวณความเค้นเข้าไปในแบบจำลองได้ด้วย ซึ่งจะทำได้โดยสามารถคำนวณหาความเค้นภายในของงานหล่อ (และงานเชื่อม) ตลอดจนแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าว (solidification cracking) ของงานหล่อและงานเชื่อมได้

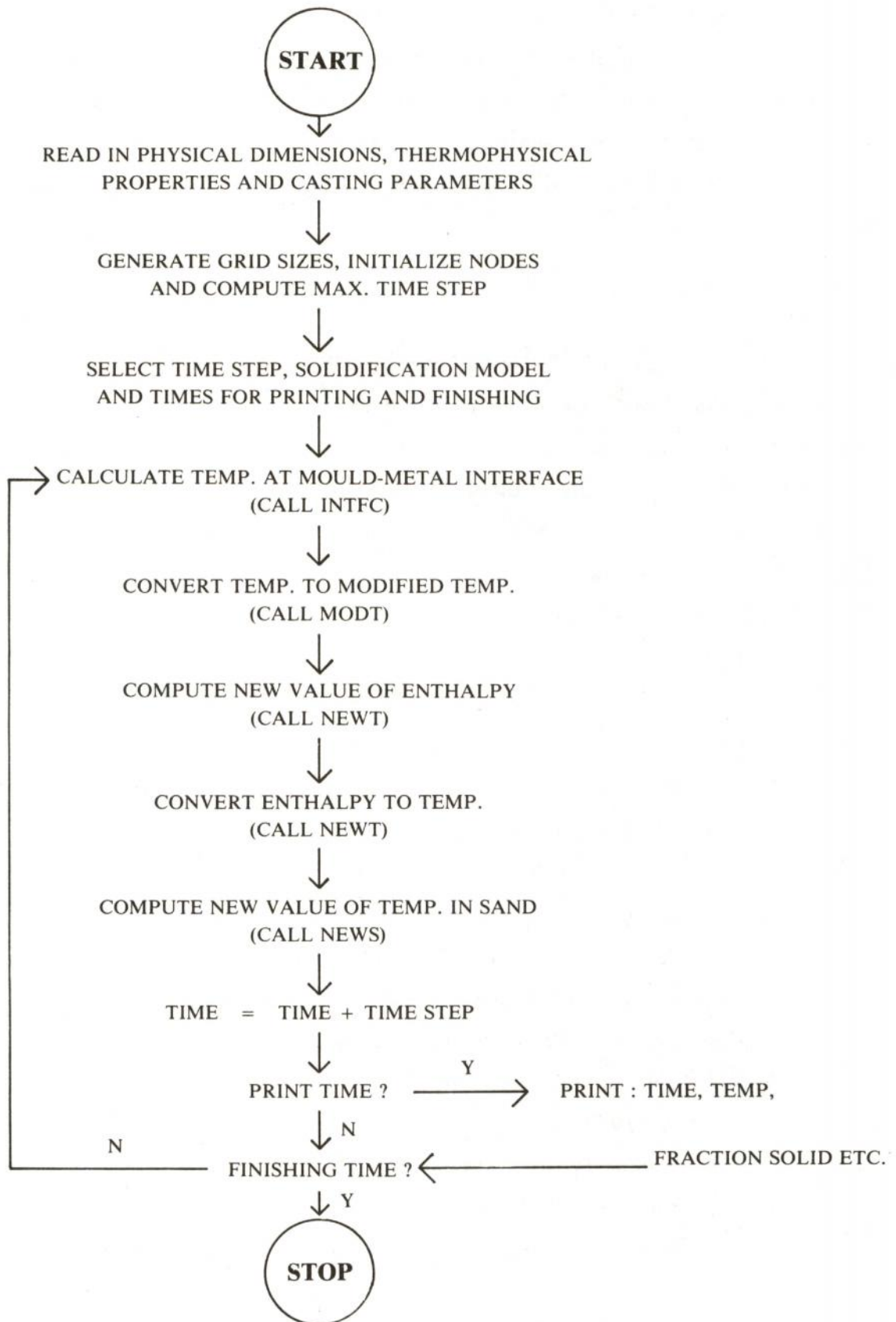
สรุป

การจำลองพฤติกรรม的竞争ตัวของโลหะโดยอาศัยวิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ในการแก้สมการการถ่ายเทความร้อนที่ดัดแปลงแล้วให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังมีข้อจำกัด เนื่องจากสามารถใช้ได้กับงานหล่อที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อนมากนักเท่านั้น ประโยชน์ของการจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะทำให้ความจำเป็นในการทดลองมีน้อยลงและจะทำให้การออกแบบงานหล่อเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การทำนายลักษณะและตำแหน่งของโพรงอากาศตลอดจนลักษณะโครงสร้างของงานหล่อบางประการ จะสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองนี้ การจำลองงานหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อนจะต้องอาศัยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์

เอกสารอ้างอิง

1. H.D. Brody and M.C. Flemings, *Trans. AIME*, 236, 1966, 615
2. T.W. Clyne and W. Kurz, *Met. Trans.*, 12A, 1981, 965
3. V.de.L.Davies, *AFS.Cast Metal Research J.*, 11, 1975, 33
4. H.F. Bishop et al., *AFS. Trans.*, 59, 1951, 435
5. R.E. Marrone et al., *AFS. Cast Metal Research J.*, 6, 1970, 184
6. BISRA, "Thermophysical Properties of Some Commercial Steels at Elevated Temperatures", Butterworth, London, 1953
7. SCRATA, "Data Sheet on the Properties of Steel Castings", Nos 1-15, SCRATA, Sheffield, 1977-1979
8. P. Srichandr, *Ph.D. Thesis*, Sheffield University, 1985
9. P.A. Bibby, *Ph.D. Thesis*, Sheffield University, 1972
10. M.C. Flemings, "Solidification Processing", Mc Graw-Hill, 1974

ภาคผนวก ก
FLOW DIAGRAM



ภาคผนวก ข
THERMOPHYSICAL PROPERTIES

STEELS

Density	7400 kg/m ³
Specific Heat	680 J/kg °C
Thermal Conductivity	16 + 0.01 T (°C) W/m °C
Liquidus Temp	1400 °C
Melting Point of Solvent	1476 °C
Partition Coefficient	0.36
Latent Heat of Fusion	272 kJ/kg
Eutectic Temp	1150 °C

SILICA SAND

Density	1500 kg/m ³
Specific Heat	1250 J/kg °C
Thermal Conductivity	1.0 W/m °C