



วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ลักษณะเฉพาะของแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

การศึกษารูปแบบการไหลของน้ำเหล็กโดยอาศัยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เพื่อนำไปสู่การทำนายรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อประเภทแท่งแบนแบบต่อเนื่อง (Slab Continuous Caster) และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับคุณภาพของชิ้นงานหล่อ ในที่นี้การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เพื่อศึกษารูปแบบการไหลของน้ำเหล็กในสภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ นั้นจะศึกษาโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม CAFFA (Computer-Aided Fluid Flow Analysis; Version 1.5) ซึ่งเป็นโปรแกรม ที่พัฒนาขึ้นมา เพื่อศึกษาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ของ ของไหล (Fluid Dynamics) โดยตรง การพัฒนาโปรแกรมดังกล่าวอาศัยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) และการประยุกต์สมการพื้นฐานของการไหลได้แก่ สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) ดังที่ได้กล่าวไว้ในสมการ (2.1), (2.2), (2.3) และการประยุกต์สมการแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (k-ε Model Equation) ซึ่งเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบปั่นป่วนในแง่ของพลังงานจลน์ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนและการเปลี่ยนรูปของพลังงานจลน์ ที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนตามสมการดังนี้

$$\rho \left( u \frac{\partial K}{\partial x} + v \frac{\partial K}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial y} \right) + \rho G_k - \rho \epsilon \quad (3.1)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{K} \rho G_k - C_2 \frac{\epsilon^2}{K} \quad (3.2)$$

ซึ่ง  $G_k$  คือเทอมพลังงานจลน์ (K) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน

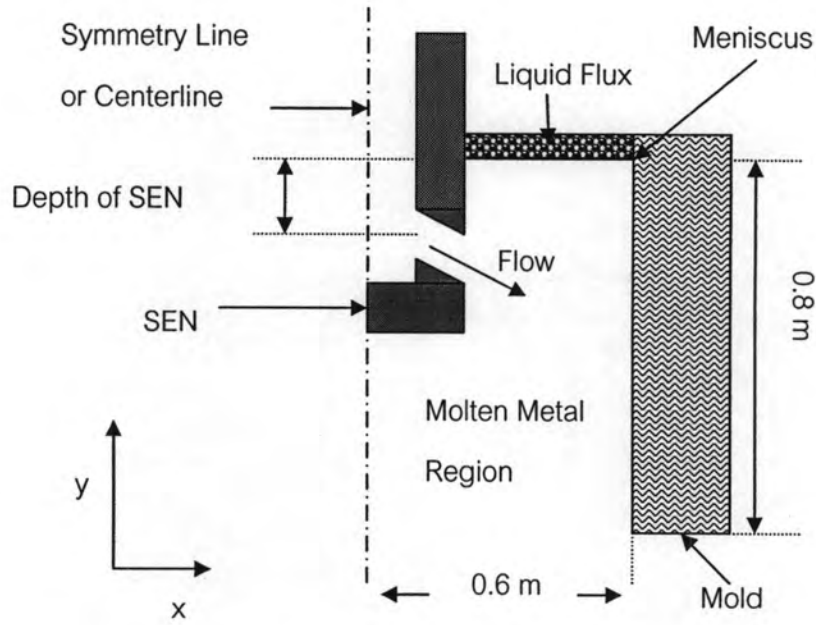
$$G_k = \frac{\mu_t}{\rho} \left\{ 2 \left\langle \frac{\partial u}{\partial x} \right\rangle^2 + 2 \left\langle \frac{\partial v}{\partial y} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right\rangle^2 \right\}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

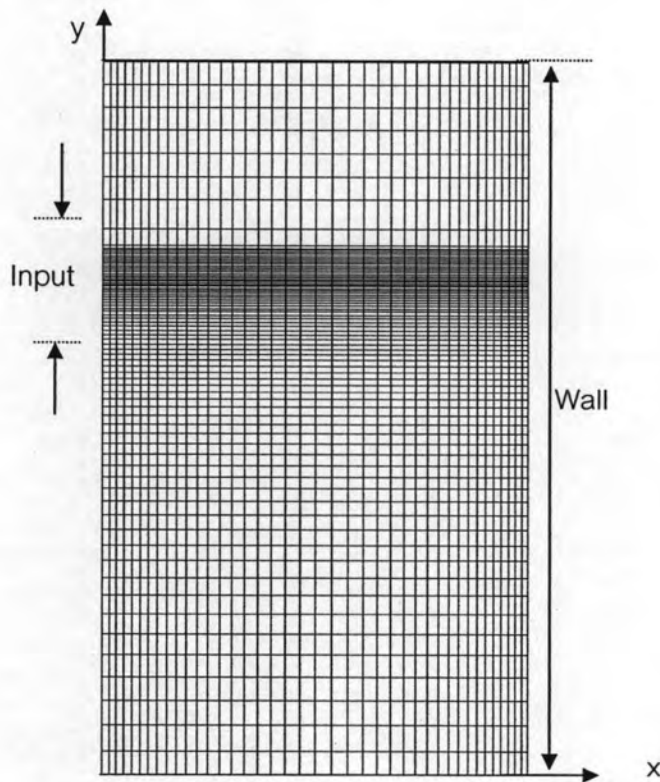
เทอมซ้ายมือของสมการ (3.1) และ (3.2) คือการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และการสูญเสียของพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นตามลำดับ เทอมที่หนึ่งและสองทางขวามือของสมการ (3.1) และ (3.2) เป็น

เทอมซ้ายมือของสมการ (3.1) และ (3.2) คือการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และการสูญเสียของพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นตามลำดับ เทอมที่หนึ่งและสองทางขวามือของสมการ (3.1) และ (3.2) เป็นเทอมการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์โดยการแพร่และการสูญเสียของพลังงานจลน์โดยการแพร่ตามลำดับ เทอมที่สาม, สี่ทางขวามือของสมการ (3.1) และ (3.2) คือ เทอมที่เป็นการสร้างและการทำลายพลังงานตามลำดับ

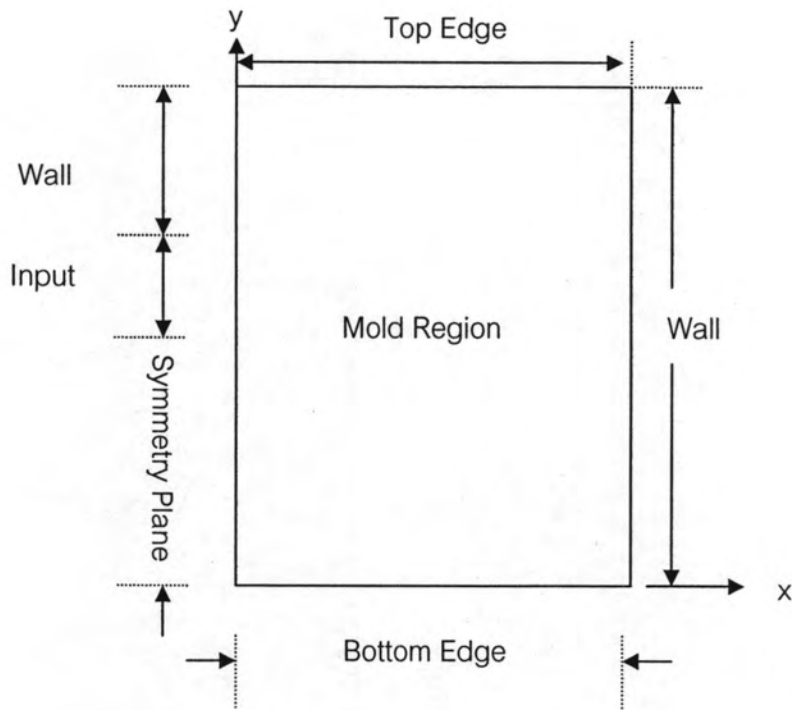
จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาสร้างแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่ใช้ในการศึกษารูปแบบการไหลของน้ำเหล็ก ที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อประเภทแท่งแบนแบบต่อเนื่อง (Slab Continuous Caster) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนต่อไป จะทำการพัฒนาโปรแกรมต่อจาก Source Code ของ CAFFA-Program โดยการประดิษฐ์โปรแกรมเพิ่มเติมในส่วนของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Electromagnetic Force) เข้าไปใน Source Code ของ CAFFA-Program เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นกับรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อประเภทแท่งแบนแบบต่อเนื่อง (Slab Continuous Caster) เนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในที่นี้ เพื่อเป็นการประหยัดทั้งในแง่ของเวลาและหน่วยความจำในการคำนวณจะพิจารณาแบบหล่อเพียงครั้งเดียว เพราะเนื่องจากลักษณะการไหลของน้ำเหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณทั้งสองด้านของเส้นสมมาตร (Symmetry Line) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ในการคำนวณจะเริ่มต้น ด้วยการกำหนดขอบเขต (Domain) แล้วสร้าง Grid ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากรูปดังกล่าว จะสังเกตเห็นว่าในการสร้าง Grid นั้น บริเวณผนังและบริเวณที่จ่ายน้ำเหล็กเข้าสู่แบบหล่อ (Input) จะต้องกำหนดจำนวน Grid ให้มีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณอื่นเป็นพิเศษ เพราะเนื่องจากบริเวณดังกล่าว มีความไวต่อความแม่นยำในการคำนวณ ดังนั้นต้องอาศัยความละเอียดในการคำนวณบริเวณดังกล่าวมากกว่าบริเวณอื่นๆ เมื่อได้สร้าง Grid สำหรับการคำนวณเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับขอบเขต (Domain) และ Grid ที่ได้สร้างไว้แล้ว โดยมีข้อกำหนดทั่วไปดังนี้ การกำหนดหมายเลข 1 มีความหมายเทียบเท่ากับ อินพุต (Input) ที่ขอบเขตนั้น การกำหนดหมายเลข 2 มีความหมายเทียบเท่ากับ เอาท์พุต (Output) ที่ขอบเขตนั้น การกำหนดหมายเลข 3 มีความหมายเทียบเท่ากับ ระนาบสมมาตร (Symmetry Plane) ที่ขอบเขตนั้น การกำหนดหมายเลข 4 หรือ 5 มีความหมายเทียบกับ ผนัง (Wall) ที่ขอบเขตนั้น แนวทางการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งบริเวณขอบบน (Top Edge) และขอบล่าง (Bottom Edge) มีความหมายเทียบเท่ากับ ระนาบสมมาตร (Symmetry Plane)



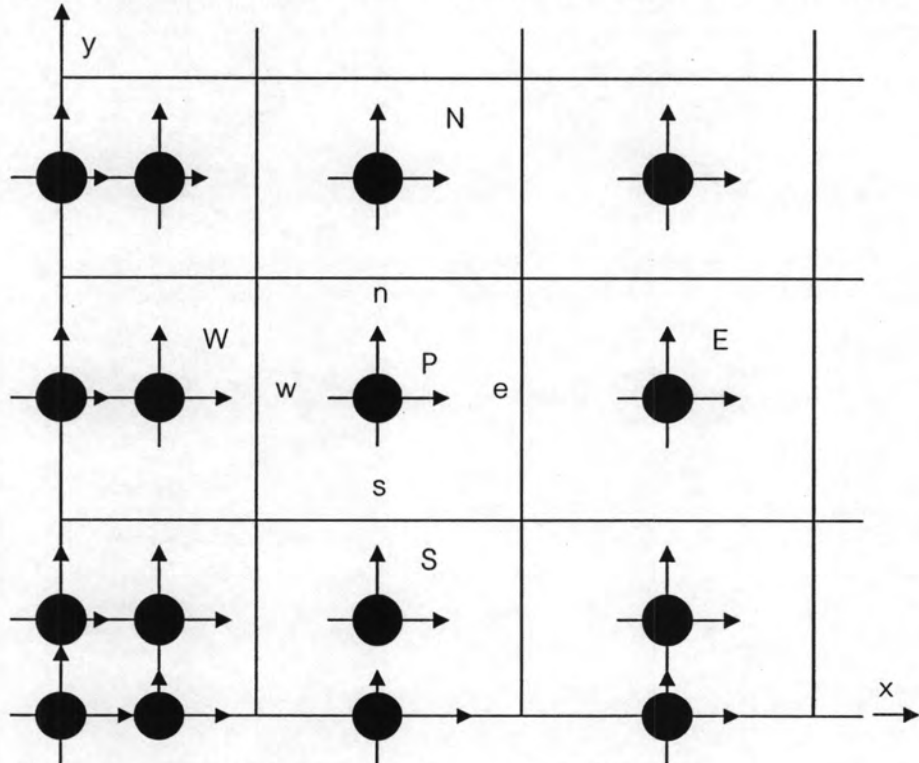
รูปที่ 3.1 แสดงแบบหล่อประเภทแท่งแบนแบบต่อเนื่อง (Slab Continuous Caster) ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง 2 มิติ



รูปที่ 3.2 แสดงการสร้าง Grid ที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลอง 2 มิติ



รูปที่ 3.3 แสดงแนวทางการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณแบบจำลอง 2 มิติ



รูปที่ 3.4 แสดงการจัดเรียงตำแหน่งร่วมของโหนดที่นำมาคำนวณในแต่ละแนวแกนตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method) ใน 2 มิติ

รูปที่ 3.4 แสดงการแบ่งปริมาตรควบคุม (Control Volume) ชนิดการจัดเรียงตำแหน่งร่วมของโหนด ที่ใช้ ในการพัฒนาโปรแกรม CAFFA (Computer-Aided Fluid Flow Analysis; Version 1.5) โดยมีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีเงื่อนไขขอบเขตไม่ต่อเนื่องและกับปัญหาที่มีขอบเขตของผลเฉลยที่ยู่ยากซับซ้อนได้ดี การคำนวณสำหรับแต่ละแกนของ  $x$  และ  $y$  ตามระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method) ใน 2 มิติ เป็นการคำนวณในแต่ละปริมาตรควบคุม (Control Volume) นั้นๆ เช่น ที่ตำแหน่งโหนด P จะเป็นตำแหน่งตรงกลางที่เป็นเสมือนตำแหน่งอ้างอิงและล้อมด้วยปริมาตรควบคุม (Control Volume) อื่นๆ ที่อยู่ทางทิศตะวันออก E, ทิศตะวันตก W, ทิศใต้ S, และทิศเหนือ N ตามลำดับ แต่ละปริมาตรควบคุม (Control Volume) ถูกนำมาคำนวณหาความเร็ว หาความดันในแต่ละปริมาตรควบคุม (Control Volume) นั้นๆ รวมไปถึงการคำนวณแรงแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยต้องคำนวณจากตำแหน่งโหนดดังกล่าว โดยใช้ตำแหน่งตรงกลางของแต่ละปริมาตรควบคุม (Control Volume) เป็นเสมือนตัวแทนของทั้งปริมาตรควบคุม (Control Volume) นั้น ส่วนตัวอักษรกำกับที่บริเวณแต่ละหน้าของปริมาตรควบคุม (Control Volume) เช่น e, w, s, และ n เป็นตัวกำกับบอกทิศทางของหน้าปริมาตรควบคุม (Control Volume Face) ในทิศตะวันออก ทิศตะวันตก ทิศใต้ และทิศเหนือตามลำดับ ส่วนบริเวณตรงขอบจะถูกคำนวณตามตำแหน่งโหนดที่แสดงตามรูปที่ 3.4

### 3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model Verification)

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้นอาศัยผลการจำลองทางกายภาพเปรียบเทียบกับผลการจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่เงื่อนไขเดียวกันของ Thomas B.G. ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เพื่อดูแนวโน้มของรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 พบว่าเส้นแนวการไหลของน้ำเหล็ก (a) ที่ได้จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันกับเส้นแนวการไหลที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ (b) หลังจากนั้นทำการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับของ Thomas B.G. แล้วนำผลที่ได้จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์มาเทียบกับผลของ Thomas B.G. อีกที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 พบว่าเส้นแนวการไหลที่ได้จากการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ (a) ของ Thomas B.G. มีรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กที่มีความสอดคล้องกันกับการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม CAFFA (b)

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์และสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองแบบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

พารามิเตอร์	Steel	Water
Viscosity, Ns/m <sup>2</sup>	0.0055	0.000959
Density, kg/m <sup>3</sup>	7015	1000
Nozzle angle degree, downward	15	15
Kinetic energy, m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	0.0502	0.0432
Dissipation, m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	0.3935	0.4414
Casting speed, m/s	0.0167	0.0167
Half caster width simulated, m	0.66	0.6856
Length simulated, m	3	1.118
Nozzle submergence depth, m	0.265	0.265

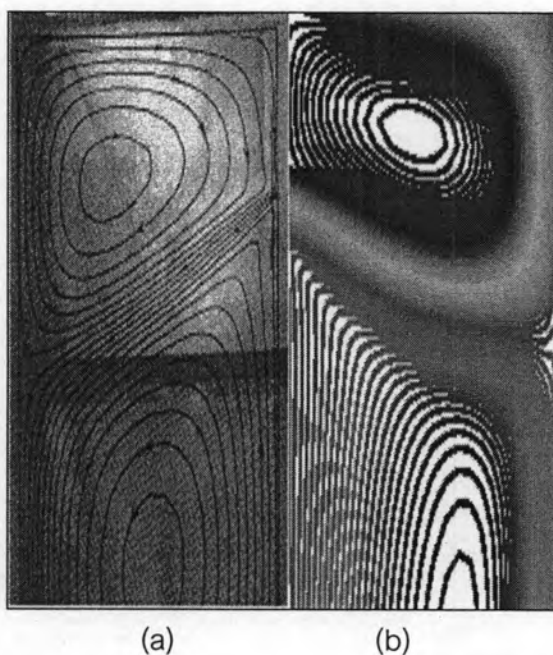
ดังนั้นจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) กับแบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model) ดังที่กล่าวข้างต้นนั้น สามารถนำผลมา ยืนยันความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) สำหรับการ คำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) ได้



(a)

(b)

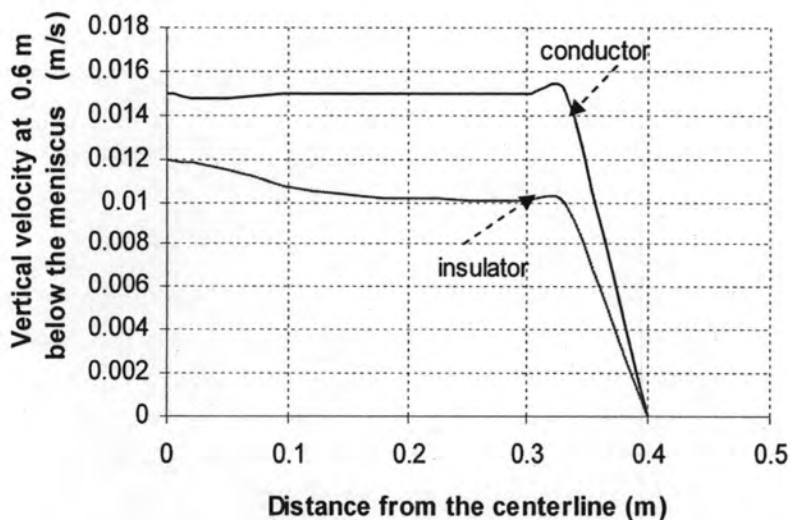
รูปที่ 3.5 แสดง Streamline ของ Mathematical model (a) กับ Physical water model (b) ของ Thomas B.G.



รูปที่ 3.6 แสดง Streamline ของ Calculated flow ของ Thomas B.G. (a) กับ Streamline ที่ได้จาก Mathematical model โดย CAFFA-Program (b) ตามเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 3.1

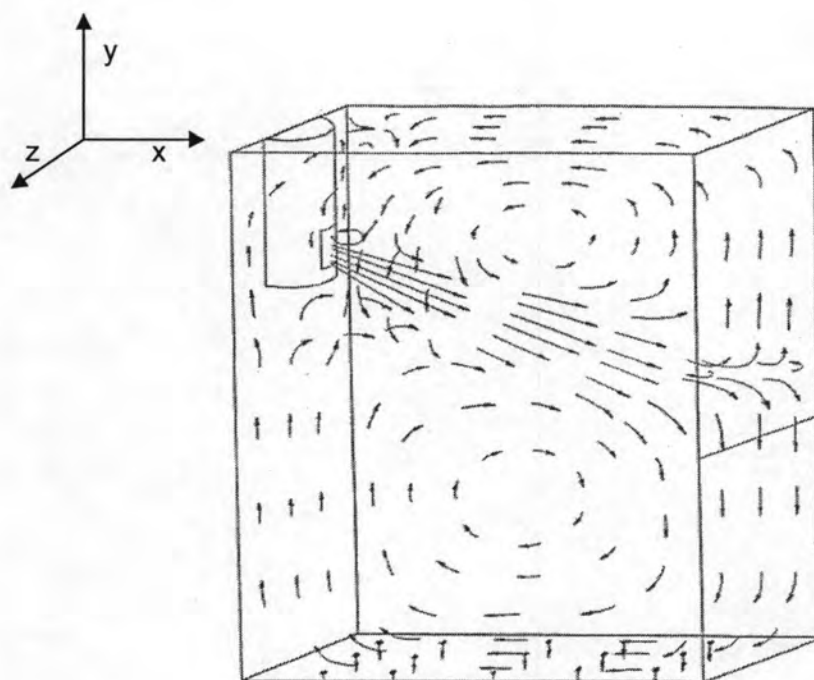
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเพื่อตรวจสอบโปรแกรม

Parameters	Parameter Values
Simulated length (m)	0.8x2.0x0.17
Nozzle size (m)	0.060x0.060
Depth of nozzle (m)	0.15
Casting speed (m/s)	0.012
Density of molten steel (kg/m <sup>3</sup> )	7020
Viscosity (N.s/m <sup>2</sup> )	5.59x10 <sup>-3</sup>
Electrical conductivity (ohm <sup>-1</sup> . m <sup>-1</sup> )	7.14x10 <sup>5</sup>



รูปที่ 3.7 แสดงการตรวจสอบ Program Validation จำลองภายใต้เงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 3.2

ค่า  $B_{max} = 0.5$  T ที่ 0.4 m และ ตรวจสอบความเร็วที่ 0.6 m ต่ำกว่าเมนิสคัส



รูปที่ 3.8 Physical water model ใน 3มิติ ของ Thomas B.G. จำลองตามเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 3.1

ในกรณีที่แสดงตามรูปที่ 3.7 เป็นการแสดงผลเปรียบเทียบความเร็วตามแนวตั้งที่ระยะ 0.6 เมตร จากเมนิสคัส ระหว่างผลการคำนวณของ Li Baokuan ที่  $B_{max}$  เท่ากับ 0.5 เทสลาติดตั้งที่



ที่ตำแหน่ง 0.4 เมตรจากเมนิสคัส และสมมติให้มีเปลือกของเหล็กที่แข็งตัวเริ่มต้นเป็นตัวนำไฟฟ้า (Conductor) แต่ในส่วนที่คำนวณจาก Code ที่พัฒนาขึ้น สมมติให้บริเวณผนังแบบหล่อเป็น ฉนวน (Insulator) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น จากรูปที่ 3.7 พบว่า ลักษณะของความเร็วที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบจำลองนั้นมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นการตรวจสอบ ความถูกต้องอีกครั้งหนึ่งที่จะยืนยันความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่สร้างขึ้น ส่วนรูปที่ 3.8 เป็น Physical water model ใน 3 มิติ สำหรับแบบหล่อประเภทแท่งแบน ของ Thomas B.G. จำลองตามเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 3.1 จากรูปสังเกตพบว่าทิศทางการไหลของของไหล จะถูก จำลอกจากจากอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก ฟุ้งเข้าชนผนังด้านแคบ (Narrow Face Mold Wall) แล้ว กระจายขึ้นและลงตามผนัง กลายเป็นการไหลแบบหมุนวนในแนวแกน x และ y ดังแสดงในรูป และ ไม่มีการไหลในทิศทางตามแกน z เพราะฉะนั้นเพื่อทำให้การสร้างแบบจำลองง่ายขึ้น สามารถทำ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน 2 มิติ สำหรับศึกษารูปแบบการไหลของน้ำเหล็ก ในแบบ หล่อประเภทแท่งแบนของกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Slab Continuous Caster) ได้

การคำนวณแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จากกฎความสัมพันธ์ของ Lorentz ตามสมการที่ 2.4 ซึ่งเท่ากับ

$$\vec{F}(= F\vec{i} + F\vec{j} + F\vec{k}) = \vec{J} \times \vec{B}$$

จากสมการที่ 2.4 สามารถคำนวณค่า  $\vec{J}$  ได้จาก ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5 ในบทที่ 2 ซึ่ง เท่ากับ

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$$

ค่าความเร็วของน้ำเหล็ก  $\vec{V}$  เป็นค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม CAFFA ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ถูก พัฒนาขึ้นเพื่อคำนวณเกี่ยวกับพลศาสตร์ของของไหล (Fluid Dynamics) โดยตรง ค่าความเร็วของ น้ำเหล็กจะถูกวางไว้ให้เป็นตัวแปรในฟังก์ชันของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า เหนี่ยวนำดังกล่าวจะถูกนำไปประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณผลของแรง แม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อต่อไป

ค่า  $\vec{E} = -\nabla\phi$  ซึ่ง  $\phi$  คือศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential, Volt) สามารถคำนวณได้โดย ใช้โปรแกรม FlexPDE จากสมการของ Poisson

$$\nabla^2\phi = \sigma v_y(12.248y - 2.39) \text{ ที่ } 300 \text{ แอมแปร์}$$

$$\nabla^2\phi = \sigma v_y(39.42y - 7.71) \text{ ที่ } 1000 \text{ แอมแปร์}$$

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่แสดงตามรูปที่ 3.3 เพื่อคำนวณหาค่า  $\phi$  สามารถทำ ได้ ดังนี้

บริเวณขอบบน (Top Edge) สมมติให้เป็นฉนวน (Insulator) เนื่องจากเป็นบริเวณ พลั๊กซ์หลอมเหลว (Liquid Flux) ที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำมากๆ เพราะฉะนั้นกำหนดให้

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

บริเวณผนังแบบหล่อ (Mold Wall) สมมติให้เป็นฉนวน (Insulator) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีฟลักซ์ไหลวนเหลว (Liquid Flux) บางส่วนไหลลงมากันระหว่างน้ำเหล็กกับผนังแบบหล่อ เพราะฉะนั้นสามารถกำหนดให้

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

บริเวณขอบล่าง (Bottom Edge) ถูกมองว่าเหล็กแท่งแบน (Slab) มีความยาวมากๆ (Infinity) เพราะฉะนั้นสามารถกำหนดให้

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

บริเวณระนาบสมมาตร (Symmetry Plane) กำหนดให้

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตทั้งสี่ด้านพบว่า มีลักษณะที่เหมือนกันคือคล้ายเป็นฉนวน (Insulator) ซึ่งหมายถึงค่า  $\phi$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงกับระยะทาง ดังนั้นเมื่อ เกรเดียนต์ (Gradient) ของ  $\phi$  เท่ากับศูนย์ แสดงว่าค่า  $\vec{E} = -\nabla \phi$  เท่ากับศูนย์ด้วย เพราะฉะนั้นเทอม  $\vec{E}$  ในสมการ 2.5 จึงไม่มีผลต่อการคำนวณหรือมีผลต่อการคำนวณน้อยมาก ดังนั้นสมการ 2.5 สามารถลดรูปลงมาเท่ากับ

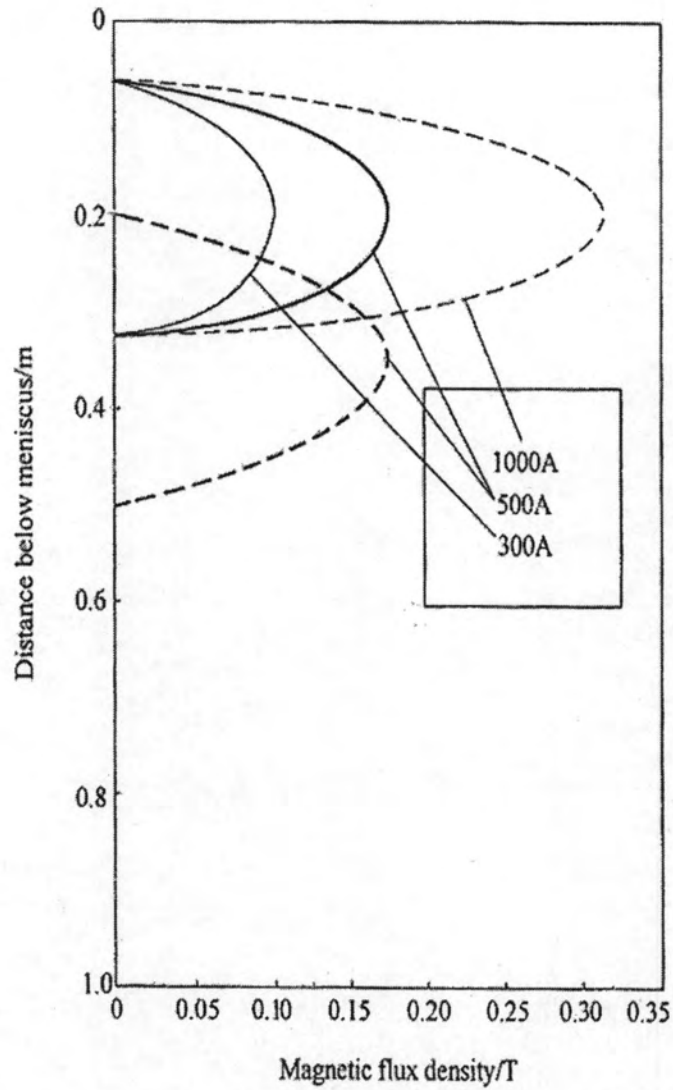
$$\vec{J} = \sigma(\vec{V} \times \vec{B})$$

จากกฎความสัมพันธ์ของ Lorentz ตามสมการที่ 2.4 สามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

$$\vec{F} (= F\vec{i} + F\vec{j} + F\vec{k}) = \sigma(\vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B} = -\sigma v_x B_z^2 \vec{i} - \sigma v_y B_z^2 \vec{j}$$

$\vec{B}$  คือค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก สามารถประมาณฟังก์ชันได้จากกราฟการทดลองหาค่า  $\vec{B}$  ที่เกิดขึ้นภายในแบบหล่อ ของ Li Baokuan ดังแสดงตามรูปที่ 3.9



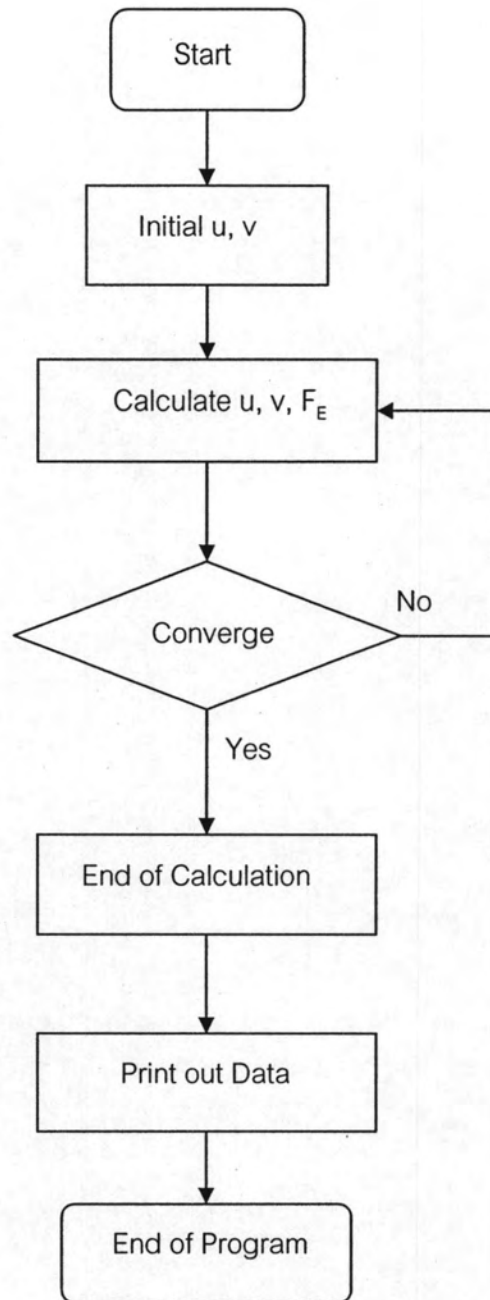


รูปที่ 3.9 ลักษณะเส้นกราฟของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่ใช้ในการคำนวณค่า  $\bar{B}$

จากความสัมพันธ์ของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

$$\vec{F} = -\sigma_{v_x} B_z^2 i - \sigma_{v_y} B_z^2 j$$

สามารถนำไปประดิษฐ์เป็น Code ของโปรแกรมต่อไปใน CAFFA-Program ได้



รูปที่ 3.10 Chart แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

### 3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองใน 2 มิติ

3.3.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณอินพุตที่อ้างอิงตามแกน x, และ y ดังแสดงในรูปที่ 3.3 กำหนดให้เงื่อนไขขอบเขตตามข้อกำหนดของโปรแกรมเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับความเร็วด้านเข้า ที่คำนวณได้จากวิธีสมดุลของมวล (Mass Balance) จากอัตราเร็วการหล่อ (Casting Speeds, m/s) ดังนี้

$$Q_{out} = V_c A_{out} \quad (3.1)$$

$Q_{out}$  คืออัตราการไหลของปริมาตรด้านออก (Outlet Volume Flow Rate, m<sup>3</sup>/s)

$V_c$  คืออัตราเร็วการหล่อ (Casting Speeds, m/s)

$A_{out}$  คือพื้นที่หน้าตัดด้านออก (Outlet Cross Sectional Area, m<sup>2</sup>)

$$Q_{in} = V_{in} A_{in} \quad (3.2)$$

$Q_{in}$  คืออัตราการไหลของปริมาตรด้านเข้า (Inlet Volume Flow Rate, m<sup>3</sup>/s)

$V_{in}$  คืออัตราเร็วการไหลเข้า (Inlet Speeds, m/s)

$A_{in}$  คือพื้นที่หน้าตัดด้านเข้า (Inlet Cross Sectional Area, m<sup>2</sup>)

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (3.3)$$

ดังนั้น

$$V_{in} = \frac{V_c A_{out}}{A_{in}} \quad (3.4)$$

สมการที่ (3.4) เป็นอัตราเร็วไหลเข้าสู่แบบหล่อของน้ำโลหะในหน่วยเมตรต่อวินาที เมื่อ  $V_{in}$  คืออัตราเร็วไหลเข้า

3.3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณระนาบสมมาตร (Symmetry Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 กำหนดตามหลักเกณฑ์ของโปรแกรมเท่ากับ 3 มีค่าเทียบเท่ากับ

3.3.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณระนาบสมมาตร (Symmetry Plane) ดังแสดง  
ในรูปที่ 3.3 กำหนดตามหลักเกณฑ์ของโปรแกรมเท่ากับ 3 มีค่าเทียบเท่ากับ

$$u = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$$

3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณขอบบน (Top Edge) ดังแสดงในรูปที่ 3.3  
กำหนดตามหลักเกณฑ์ของโปรแกรมเท่ากับ 3 มีค่าเทียบเท่ากับ

$$v = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0$$

3.3.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณผนัง (Wall) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 กำหนดตาม  
หลักเกณฑ์ของโปรแกรมเท่ากับ 4 มีค่าเทียบเท่ากับ

$$u = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\rho}{\mu_t} \left( \frac{kv}{\ln \left( \frac{E \rho y_n C_\mu^{0.25} K^{0.5}}{\mu_{lam}} \right)} \right)^2 \frac{v}{|v|}$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial x} = 0$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} K^{1.5}}{\kappa y_n}$$

$E$  (wall roughness constant) =9.0

$y_n$  (distance the computational domain is offset from the wall) =0.01 m

3.3.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณด้านล่างของแบบหล่อ (Bottom Edge) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 กำหนดตามหลักเกณฑ์ของโปรแกรมเท่ากับ 3 มีค่าเทียบเท่ากับ

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

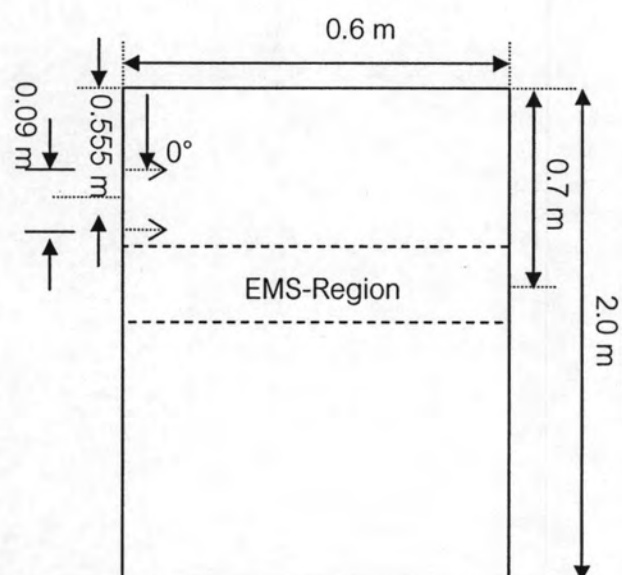
$$\frac{\partial \kappa}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0$$

3.4 การสร้างแบบจำลองในกรณีเปลี่ยนมุมของอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก (Changing of Port Angle of SEN) ภายในแบบจำลอง 2 มิติ

กรณีการเปลี่ยนมุมของอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็กเพื่อตรวจสอบผลกระทบบกกับกรณีการเปลี่ยนมุมของอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็กที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อ โดยพารามิเตอร์อื่นๆ กำหนดให้มีค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ในการจำลองแบบ จะศึกษาทั้งกรณีที่มีการให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากแหล่งกระแสไฟฟ้า (Current Source) ขนาด 300 แอมแปร์ และ 1000 แอมแปร์ เพื่อตรวจสอบผลของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อ โดยตำแหน่งการติดตั้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้แสดงตามรูปที่ 3.11 ถึง รูปที่ 3.15 อีกกรณีหนึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองโดยปราศจากการให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

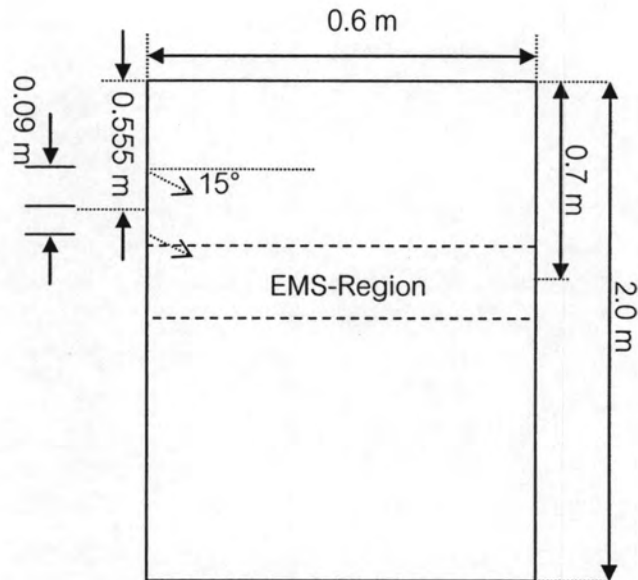
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบในกรณีเปลี่ยนมุมพอร์ต

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
Simulated length (m)	2.0
Mold size (m)	0.6x0.8x0.2
Casting speed (m/min)	1
Port size (m)	0.065x0.09
Port position below meniscus (m)	0.555
Port angle (degree)	0, 15, 30, 45, 60
Magnetic Flux Density (T)	0.1, 0.32

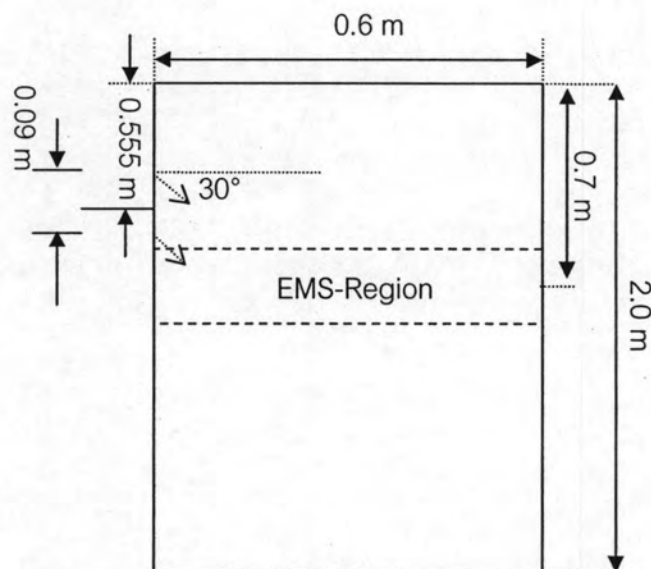


รูปที่ 3.11 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.555 m จากเมนิสคัส มุมก้ม



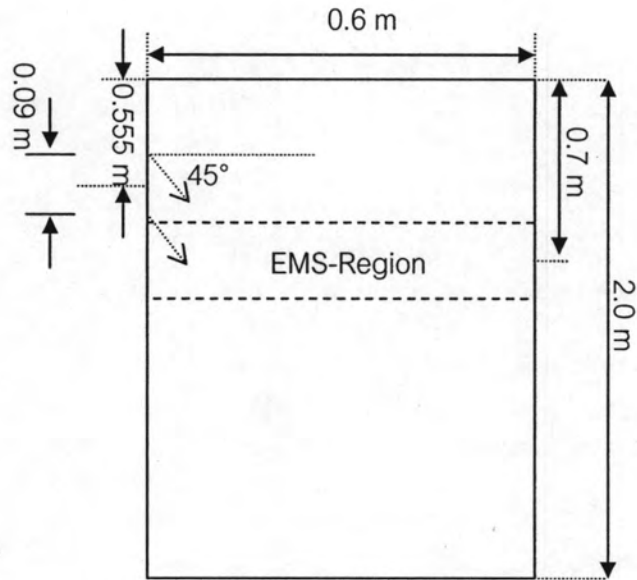


รูปที่ 3.12 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.555 m จากเมนิสคัส มุมก้ม 15°

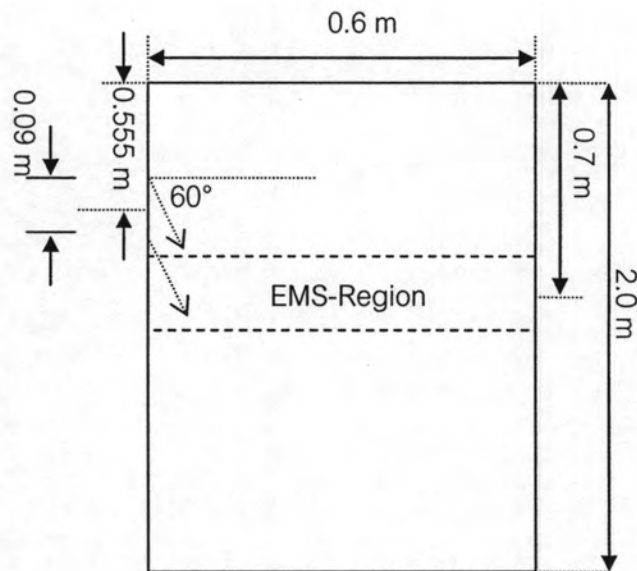


รูปที่ 3.13 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.555 m จากเมนิสคัส มุมก้ม 30°





รูปที่ 3.14 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.555 m จากเมนิสคัส มุมก้ม 45°



รูปที่ 3.15 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.555 m จากเมนิสคัส มุมก้ม 60°

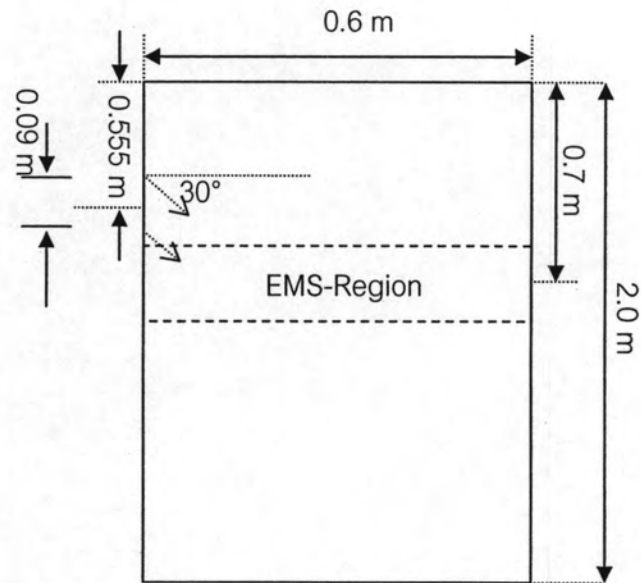
### 3.5 การสร้างแบบจำลองในกรณีเปลี่ยนตำแหน่งของอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก (Changing of Position of SEN) ในแบบจำลอง 2 มิติ

ในกรณีการจำลองแบบการไหล ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก (Submerge Entry Nozzle, SEN) เพื่อตรวจสอบผลกระทบของการเปลี่ยนตำแหน่งอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก (Port position) ที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อ (Caster) โดยเริ่มต้นจากตำแหน่ง 0.555 เมตร, 0.455 เมตร, 0.355 เมตร, 0.255 เมตร, และ 0.155 เมตร ต่ำกว่าเมนิสคัส ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ มุมพอร์ต และ ขนาดพอร์ตของอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก อัตราเร็วการหล่อ ขนาดแบบหล่อกำหนดให้คงที่ ต่อจากนั้นเป็นการจำลองโดยการให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field) ที่มีค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) เท่ากับ 0.1 และ 0.32 เทสลาตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 เพื่อตรวจสอบผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field) ที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อประเภทแท่งแบน ของกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Slab Continuous Casting Process)

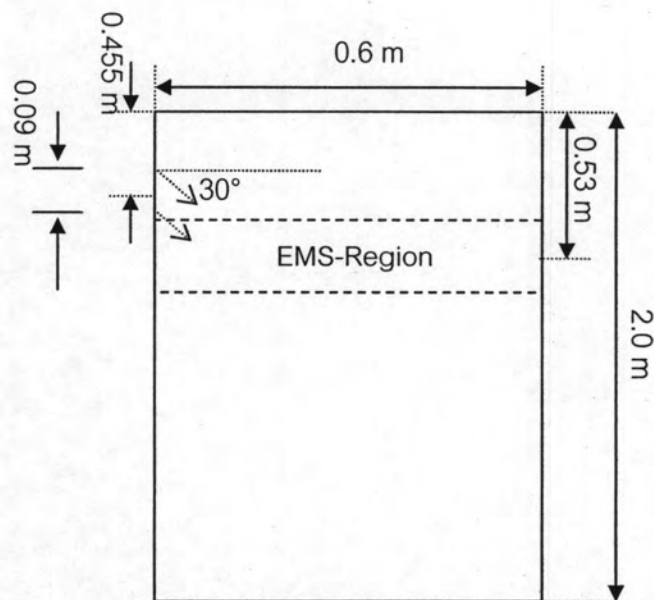
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองแบบภายใต้การเปลี่ยนตำแหน่งของอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
Mold size (m)	0.6x0.8x0.2
Casting speed (m/min)	1
Port size (m)	0.065x0.09
Port position (m, below meniscus)	0.555, 0.455, 0.355, 0.255, 0.155
Port angle (degree, downward)	30
Magnetic Flux Density (T)	0.1, 0.32

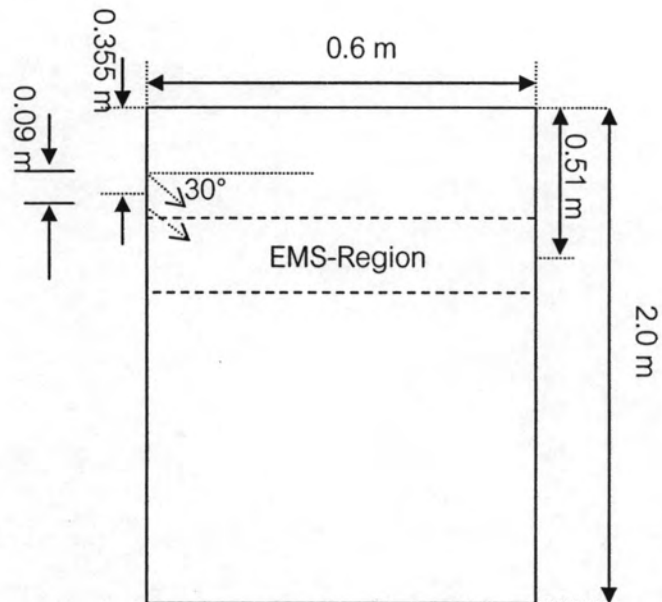
ในการจำลองแบบ จะศึกษาทั้งกรณีที่มีการให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากแหล่งกระแสไฟฟ้า (Current Source) ขนาด 300 แอมแปร์ และ 1000 แอมแปร์ เพื่อตรวจสอบผลของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อ โดยตำแหน่งการติดตั้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้แสดงตามรูปที่ 3.14 ถึง รูปที่ 3.18 อีกกรณีหนึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองโดยปราศจากการให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



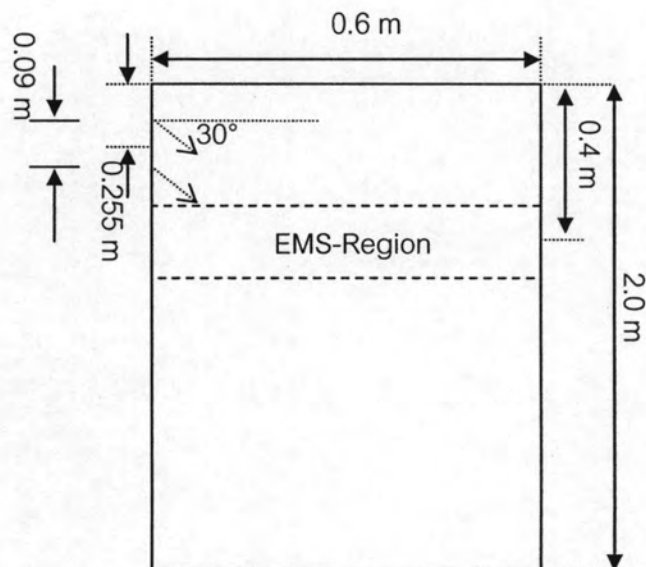
รูปที่ 3.16 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำหลัก  
สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.555 m จากเมนิสคัส มุมก้ม  
30°



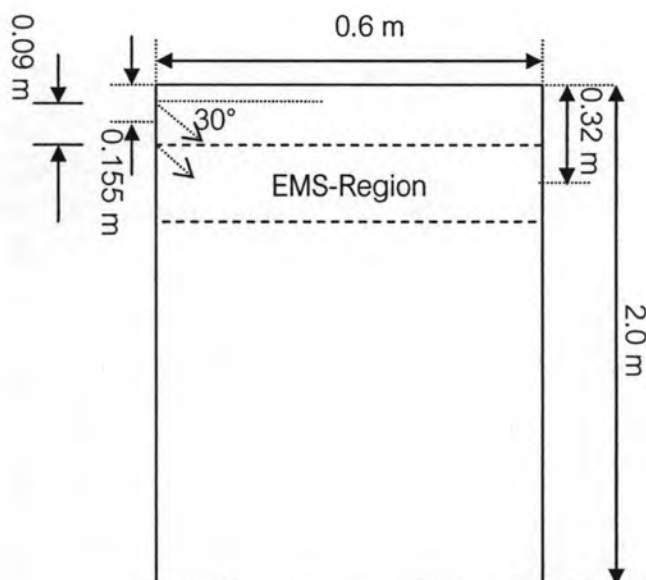
รูปที่ 3.17 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำหลัก  
สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.455 m จากเมนิสคัส มุมก้ม  
30°



รูปที่ 3.18 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก  
สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.355 m จากเมนิสคัส มุมก้ม  
30°



รูปที่ 3.19 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก  
สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.255 m จากเมนิสคัส มุมก้ม  
30°



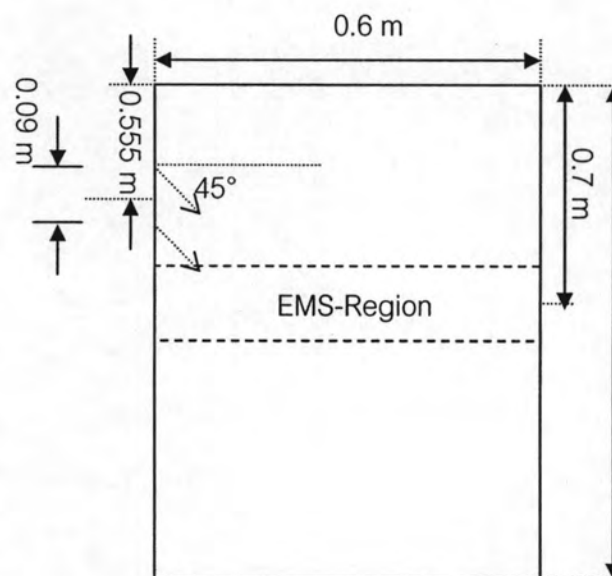
รูปที่ 3.20 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.155 m จากเมนิสคัส มุมก้ม 30°

### 3.5 การสร้างแบบจำลองในกรณีการเปลี่ยนอัตราเร็วในการหล่อ (Casting Speeds) สำหรับการจำลองแบบ 2 มิติ

กรณีการสร้างแบบจำลอง เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนอัตราเร็วในการหล่อ (Casting Speeds) ที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อ ในการจำลองแบบจะทำการจำลองภายใต้เงื่อนไขตามตารางที่ 3.5 โดยการเปลี่ยนเฉพาะอัตราเร็วในการหล่อ (Casting Speeds) แต่ค่าพารามิเตอร์อื่นๆยังกำหนดให้คงที่ ในการจำลองแบบ จะศึกษาทั้งกรณีที่มีการให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากแหล่งกระแสไฟฟ้า (Current Source) ขนาด 300 แอมแปร์ และ 1000 แอมแปร์ เพื่อตรวจสอบผลของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่มีต่อรูปแบบการไหลของน้ำเหล็กภายในแบบหล่อ โดยตำแหน่งการติดตั้งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้แสดงตามรูปที่ 3.21 อีกกรณีหนึ่งเป็นการสร้างแบบจำลอง โดยปราศจากการให้แรงแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบที่อัตราเร็วในการหล่อต่างๆ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
Mold size (m)	0.6x0.8x0.2
Casting speed (m/min)	1, 1.6, 2.2, 2.8
Port size (m)	0.065x0.09
Port position (m, below meniscus)	0.555
Port angle (degree, downward)	45
Simulated length (m)	2
Magnetic Flux Density (T)	0.1, 0.32



รูปที่ 3.21 แบบจำลองขนาด 0.6 x 2.0 m ตำแหน่งความลึกอุปกรณ์จ่ายน้ำเหล็ก สำหรับการจำลองแบบ (Depth of SEN) 0.555 m จากเมนิสคัส มุมก้ม 45°