

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการไหลของของไหลอัดตัวได้ผ่านวัสดุพรุน ภายในท่อภายใต้สนามแม่เหล็ก

Analysis of Heat Transfer and Compressible Flow through a Porous Medium in Pipe under a Magnetic Fields

บวรศักดิ์ ยะกะนิษฐ์, วาতিต ภัคดี *

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน
ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120

*ติดต่อ : pwatit@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับราบเรียบภายในท่อสองมิติในสภาวะไม่คงตัวและวิเคราะห์พฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของของไหลชนิดที่นำไฟฟ้าและสามารถอัดตัวได้ ในท่อแนวราบที่มีวัสดุพรุน ผ่านสนามแม่เหล็กในทิศทางการเคลื่อนที่ของการไหลที่มีค่าสม่ำเสมอ โดยสมมุติอุณหภูมิผนังมีค่าคงที่แต่อุณหภูมิต่างกันและไม่นำไฟฟ้า ค่าสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) และความหนืด (viscosity) ของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ในการแก้ปัญหาของสมการทั้งในส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นนั้น โดยใช้เทคนิค Sixth - Order Accurate Compact Finite Difference ร่วมกับวิธี Third-order Runge-Kutta ผลที่ได้จากการคำนวณถูกแสดงในรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิ ที่ค่าของสนามแม่เหล็กต่างๆ รวมถึงค่าความพรุนที่เปลี่ยนแปลงด้วย โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ตีพิมพ์แล้วก่อนหน้านี้ซึ่งศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อของไหลชนิดที่นำไฟฟ้าแต่ไม่สามารถอัดตัวได้และอยู่ในสภาวะคงตัว ผลที่ได้จากการตรวจเทียบมีแนวโน้มที่เหมือนกัน ความแตกต่างเกิดจากการที่พิจารณาความอัดตัวได้ของของไหลและคุณสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

คำหลัก: สนามแม่เหล็ก, วัสดุพรุน, ของไหลที่สามารถอัดตัวได้, คุณสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ

Abstract

In the present study, unsteady state, flow in pipe, forced convection on two-dimensional and heat transfer behavior of viscosity compressible fluid and electrical conductivity in the horizontal porous media channel. Uniform Magnetic field is perpendicular to the movement of the flow. The wall are assumed to be non-conducting and maintained at two fixed but different temperatures. The thermal conductivity and viscosity of the fluid changes with temperature. Sixth - Order Accurate Compact Finite Difference scheme together with the Third-order Runge-Kutta method are used to solve a set of non-linear equations. The results of the calculation will be expressed in the form of the velocity and temperature at different values of the magnetic field and porosity. The mathematical model and numerical methods have been validated

by comparing with the results of previously published studies that examined the effect of a magnetic field on the steady viscous incompressible fluid. The compared results have the same trends. The difference is due to the compressibility and property variation effects.

Keywords: magnetic field, porous medium, compressible fluid, thermal properties that change with temperature

1. บทนำ

ในโลกปัจจุบันพลังงานได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทำให้ความต้องการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไม่สอดคล้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่ถูกให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก และในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา การใช้หลักการแมกนีโตไฮโดรไดนามิกส์ (Magnetohydrodynamics, MHD) หรือการใช้สนามแม่เหล็กควบคุมลักษณะการไหลของไหลที่สามารถนำไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยผลของแมกนีโตไฮโดรไดนามิกส์บนของไหลในวัสดุพอร์นได้ถูกนำมาศึกษาเนื่องจากมีการประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางทางด้านวิศวกรรมและธรณีวิทยาเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการแข็งตัวในกระบวนการโลหะ การควบคุมการกระจายใต้ดินของขยะเคมี การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและปั๊ม เป็นต้น ข้อดีของวิธีการนี้คือไม่มีชิ้นส่วนหรือกลไกที่เคลื่อนไหวเพื่อปรับรูปแบบการไหลอีกทั้งยังสามารถปรับรูปแบบการไหลเมื่อความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงได้อีกด้วย

Taklifi, Aghanajafi [1] และ Abo-Eldahab, Gendy [4] ได้ศึกษาผลของการไหลของไหลนำไฟฟ้าในแนวตั้ง ผ่านแผ่นเรียบบางที่สภาวะคงตัว 2 มิติในวัสดุพอร์น โดยมีสนามแม่เหล็กในทิศขวางการไหล พบว่าการเพิ่มสนามแม่เหล็กจะทำให้ค่าความเร็วและแรงเสียดทานที่ผนังมีค่าเพิ่มขึ้นแต่อุณหภูมิจะลดลง Pal และ Talukdar [2] ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการไหลพบว่าผลของการแผ่รังสีความร้อนและสนามแม่เหล็กจะมีผลทำให้ ความเร็ว อุณหภูมิ มีค่า

ลดลงและยังพบว่าปฏิกิริยาทางเคมีและการแผ่รังสีความร้อนจะไปลดค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานผิว ในขณะที่ค่าความพอร์นจะไปเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานผิว Chen [3] ศึกษาปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลพบว่าสนามแม่เหล็กมีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิว เลขนัสเซิล (Nusselt number) จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสนามแม่เหล็กเข้าไป ส่วนค่าของความหนืดก็จะไปลดค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนแต่จะมีผลเพียงเล็กน้อยกับค่าความดันที่ผนังกับค่าของความเข้มข้น และการเพิ่มของอัตราส่วนแรงลอยตัว (buoyancy ratio) จะเพิ่มค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณใกล้ผิวแต่จะลดลงเมื่อห่างจากผิวมาก

นอกจากนี้ Chamkha [5] ศึกษาปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อวัสดุพอร์นโดยรวมผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก พบว่าสนามแม่เหล็กและวัสดุพอร์นมีผลทำให้ความเร็วลดลง ส่วนสนามไฟฟ้าไม่มีผลต่ออุณหภูมิแต่จะทำให้ความเร็วมีค่าสูงขึ้น Aboul-Hassan และ Attia [6] ศึกษาปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่ผิวเป็นวัสดุพอร์นโดยรวมผลสนามแม่เหล็ก ค่าความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิพบว่าผลของสนามแม่เหล็กต่ออุณหภูมิขึ้นอยู่กับความหนืดและเวลา

จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นได้มีการศึกษาในหลายแง่มุมไม่ว่าจะเป็นผลของการแผ่รังสี ค่าสนามแม่เหล็ก ค่าความหนืด ค่าการซึมผ่านได้ (permeability) ที่มีผลต่อของไหลและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งล้วนแต่อธิบายพฤติกรรมของของไหลที่สมมุติเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้น

ศึกษาพฤติกรรมของของไหลเป็นแบบอัดตัวได้และคุณสมบัติทางความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

2. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับราบเรียบภายในท่อสองมิติในสภาวะไม่คงตัวและพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของของไหลชนิดที่นำไฟฟ้าและสามารถอัดตัวได้ ในท่อที่มีวัสดุพอร์นสม่ำเสมอแนวนราบ ผ่านสนามแม่เหล็กในทิศขวางการเคลื่อนที่ของการไหลที่มีค่าสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2-1 ค่าสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) และความหนืด (viscosity) ของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลนำไฟฟ้ารวมถึงสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำไม่ถูกนำมาพิจารณาและที่ผนังไม่นำไฟฟ้า โมเดลของฟอชเมอร์ (forchheimer model) ถูกใช้จำลองพฤติกรรมไหลในวัสดุพอร์น ชุดสมการกำกับที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังต่อไปนี้

2.1 สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right] \\ - \frac{\mu}{K} u - \frac{\rho}{\sqrt{K}} |\vec{V}| u - \sigma B^2 u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right] \\ - \frac{\mu}{K} v - \frac{\rho}{\sqrt{K}} |\vec{V}| v \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho e_t}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e_t \vec{V}) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial (u \tau_{xx})}{\partial x} \\ + \frac{\partial (v \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (u \tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial (v \tau_{yy})}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

2.4 ค่าความหนืดคำนวณ

$$\mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.7}, \mu_0 = 1.71 \times 10^{-5} \text{ kg/m s} \quad (5)$$

2.5 เทนเซอร์ (tensor) ของค่าความเค้น

$$\tau_{xy} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$\tau_{xx} = -\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (7)$$

$$\tau_{yy} = -\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

2.6 ค่าสภาพการนำความร้อน

$$k_{eff} = \varepsilon k_{fluid} + (1 - \varepsilon) k_{solid} \quad (9)$$

$$k_{fluid} = \frac{\mu(T) C_p}{Pr} \quad (10)$$

2.7 พลังงานรวมและพลังงานภายใน

$$e_t = e + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 u_k^2, \quad e = -\frac{p}{\rho} \quad (11), (12)$$

2.8 สมการแก๊สในอุดมคติ

$$p = \rho RT \quad (13)$$

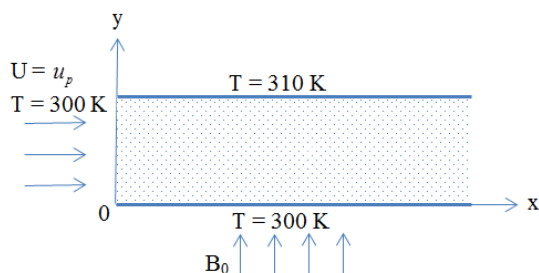
2.9 สภาวะเริ่มต้นของปัญหา

เมื่อเวลาเริ่มต้นความเร็วทั้งโดเมนมีค่าเท่ากับ 0 และอุณหภูมิเท่ากับ 300 K

2.10 เงื่อนไขขอบเขต

ขอบเขตของปัญหาที่ y เท่ากับ 0 และ 0.2 mm ความเร็ว u และ v เท่ากับ 0 และที่ y เท่ากับ 0 mm อุณหภูมิเท่ากับ 300 K ที่ y เท่ากับ 0.2 mm อุณหภูมิเท่ากับ 310 K โดยที่ทางเข้า ความเร็ว (u_p) มีค่าตามสมการ (14) โดยรัศมีของท่อ (l) เท่ากับ 0.1 mm และ u_0 เท่ากับ 1.00 m/s และอุณหภูมิเท่ากับ 300 K

$$u_p = u_0 \left[\cos\left(\frac{\pi y}{2l}\right) \right]^2 \quad (14)$$



รูปที่ 2-1 โดเมนของปัญหาที่พิจารณา

3. วิธีการคำนวณ

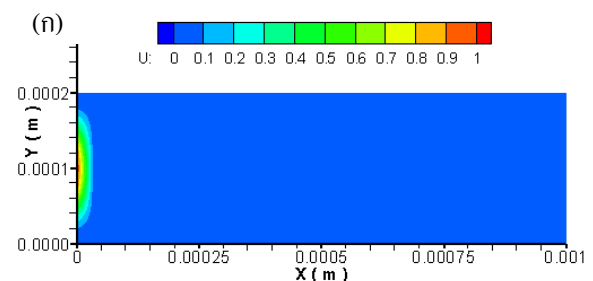
งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาในโดเมน 2 มิติที่มีขนาด 1 mm x 0.2 mm และมีความละเอียด 29 x 129 จุด เงื่อนไขขอบเขตกำหนดโดยวิธี Navier Stokes Characteristic Boundary Conditions (NSCBC) [8] ซึ่งขอบเขตในแนวแกน y เป็น Non - reflecting boundary condition และผนังมีอุณหภูมิคงที่ในแนวแกน x คำตอบของสมการสำหรับแก้ปัญหาได้มาจากการใช้ระเบียบวิธี Sixth - Order Accurate Compact Finite Difference และวิธี Third - Order Runge - Kutta ในการหาคำตอบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยการตรวจสอบความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ตีพิมพ์แล้วก่อนหน้านี้

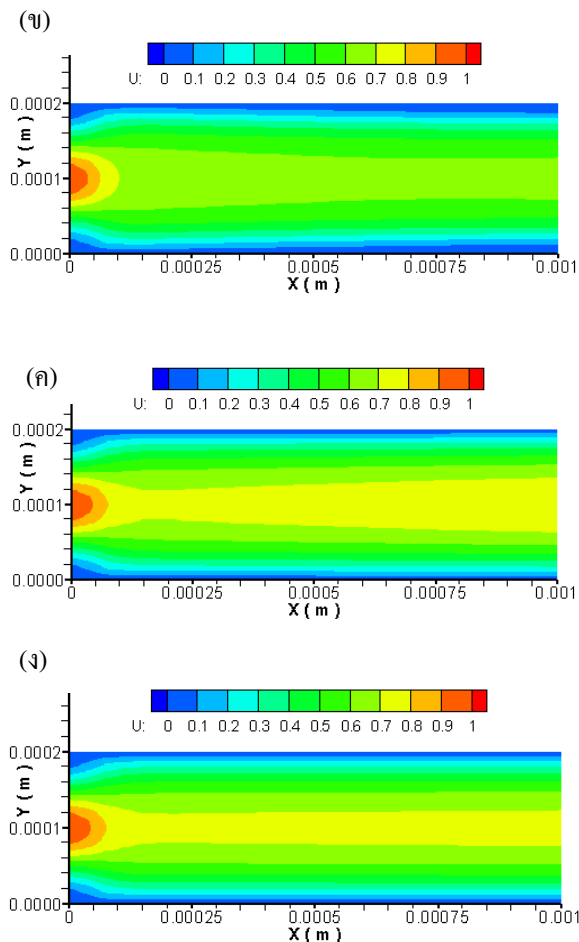
กับ Chamkha [5] ซึ่งศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อของไหลชนิดที่นำไฟฟ้าแต่ไม่สามารถอัดตัวได้

4. ผลและการวิเคราะห์

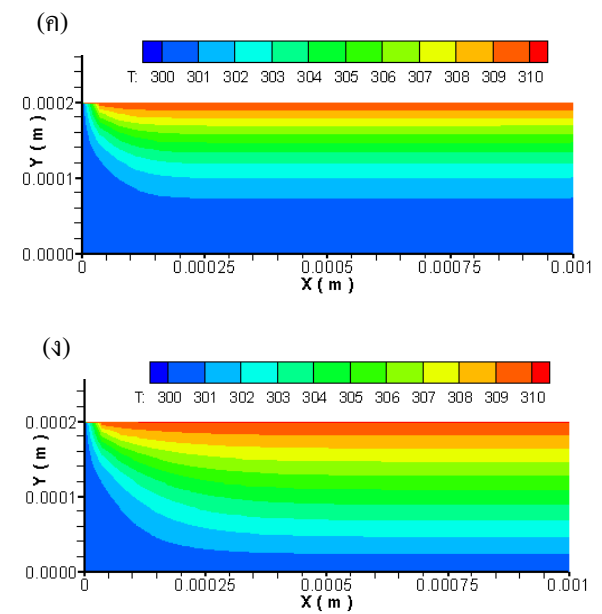
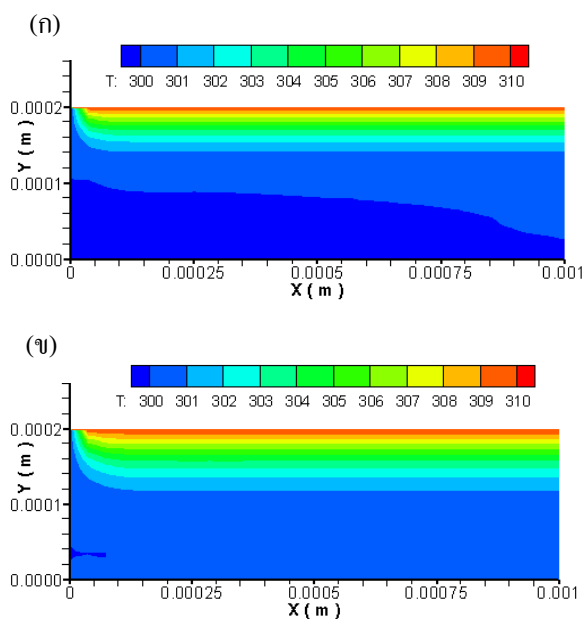
งานวิจัยนี้ศึกษาผลของค่าความพรุนและค่าสนามแม่เหล็กที่ค่าต่างๆต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหลภายในท่อหรือช่องการไหล แนวราบที่มีวัสดุพรุนสม่ำเสมอผ่านสนามแม่เหล็กที่ขบวนการเคลื่อนที่ของของไหลที่และคุณสมบัติทางความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ค่าการนำไฟฟ้า (σ) เท่ากับ 3×10^{-15} S/m ค่าการซึมผ่านวัสดุ (K) เท่ากับ 0.001 m² ค่าสภาพการนำความร้อนของของแข็ง (k_{solid}) เท่ากับ 0.6 W/m K และค่าคุณสมบัติของอากาศ 300 K ที่ความดันบรรยากาศ

จากรูปที่ 4-1 และรูปที่ 4-2 แสดงสนามความเร็วและอุณหภูมิที่ค่าสนามแม่เหล็ก (B) 780 เมกะเทสลา (MT) และค่าความพรุน 0.5 จากเวลาเริ่มต้นไปจนเข้าสู่สภาวะคงตัวจะพบว่าในช่วงแรกจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทั้งสนามความเร็วและอุณหภูมิที่เวลาจาก 0 - 0.11 ms โดยจะเห็นได้จากรูป (ก) - (ค) ก่อนเปลี่ยนแปลงจะค่อยๆลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่เวลาจาก 0.11 - 0.65 ms แสดงโดยรูป (ค) - (ง)





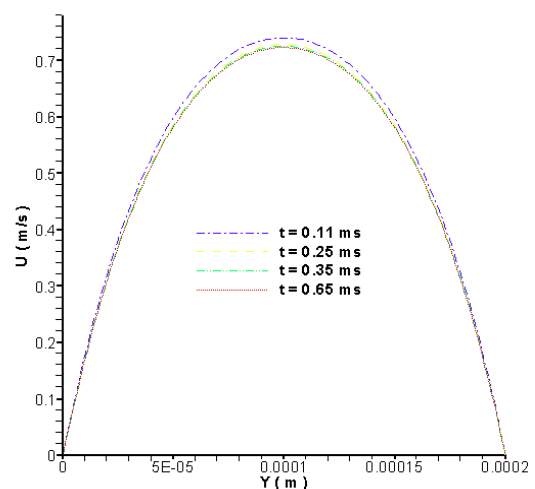
รูปที่ 4-1 สนามความเร็วในหน่วย m/s ที่เวลาต่างๆ

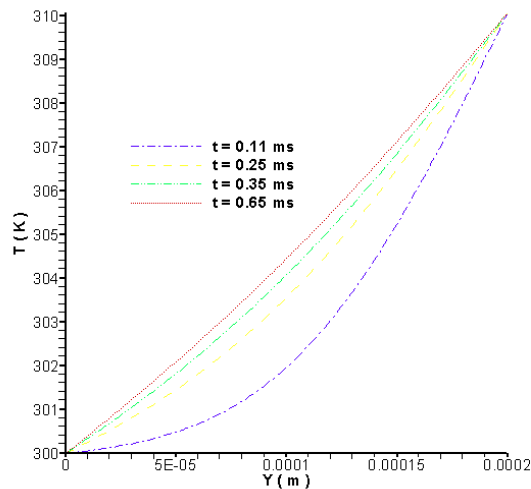
(ก) $t = 0.01$ ms (ข) $t = 0.05$ ms(ค) $t = 0.11$ ms (ง) $t = 0.65$ ms

รูปที่ 4-2 สนามอุณหภูมิในหน่วย K ที่เวลาต่างๆ

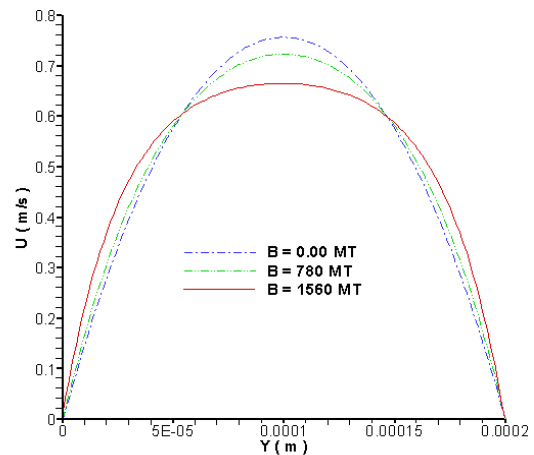
(ก) $t = 0.01$ ms (ข) $t = 0.05$ ms(ค) $t = 0.11$ ms (ง) $t = 0.65$ ms

จากรูปที่ 4-3 และ 4-4 แสดงผลของความเร็วและอุณหภูมิของการไหลภายในท่อที่ค่าสนามแม่เหล็ก 780 MT และค่าความพรุน 0.5 ที่เวลาใดๆ ณ ตำแหน่ง x เท่ากับ 0.5 mm พบว่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากรูป 4-1 จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งสมดุลดังแสดงในรูป 4-3 ซึ่งต่างจากอุณหภูมิที่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาจนเข้าสู่สภาวะคงตัว

รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับตำแหน่งในแกน y ที่เวลาใดๆ

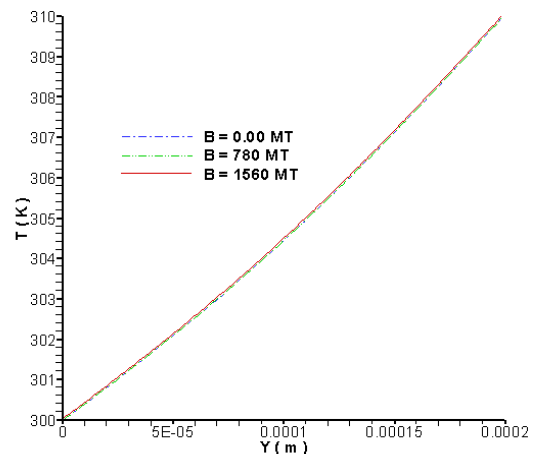


รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งในแกน y ที่เวลาใดๆ



รูปที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับตำแหน่งในแกน y ด้วยอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

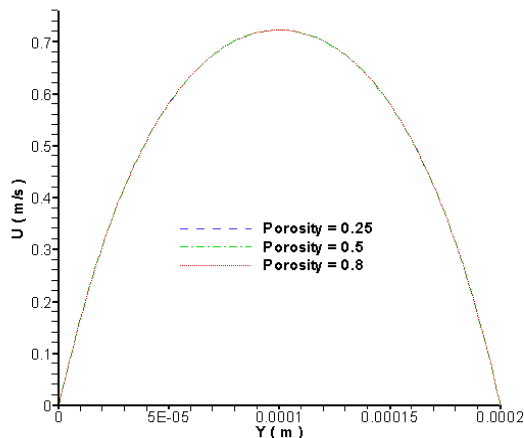
จากรูปที่ 4-5 และ 4-6 แสดงให้เห็นผลของสนามแม่เหล็กขนาด 0, 780 และ 1560 MT ที่ค่าความพรุน 0.5 ณ ตำแหน่ง x เท่ากับ 0.5 mm ที่มีต่อค่าความเร็วและอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว พบว่าสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงที่ไปผลักดันหรือต้านการไหลของของไหลซึ่งเรียกแรงนี้ว่า แรงลอเรนซ์ จากรูป 4-5 จะเห็นได้ว่าที่บริเวณขอบด้านข้างใกล้ผนังท่อที่ y เท่ากับ 0 - 0.05 mm และ 0.15 - 0.2 mm ความเร็วจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กซึ่งตรงกันข้ามกับบริเวณช่วงกลางท่อที่ y เท่ากับ 0.05 - 0.15 mm ความเร็วสูงสุดจะมีค่าลดลง 4.4 และ 12.28 % เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่า 780 และ 1560 MT ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากสมการ (4) สนามแม่เหล็กไม่ได้ส่งผลโดยตรงกับค่าอุณหภูมิ



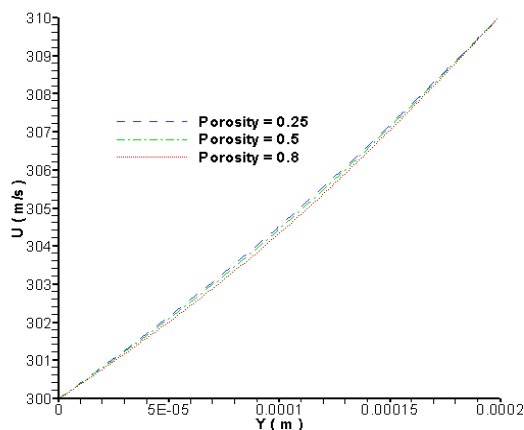
รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งในแกน y ด้วยอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 4-7 และ 4-8 แสดงให้เห็นผลของค่าความพรุน (porosity, ε) 0.25, 0.50 และ 0.80 ที่สนามแม่เหล็กขนาด 780 MT ณ ตำแหน่ง x เท่ากับ 0.5 mm ที่มีต่อค่าความเร็วและอุณหภูมิที่สภาวะคงตัว พบว่าการเพิ่มค่าความพรุนจะไม่ส่งผลโดยตรงกับค่าความเร็วจากสมการ (2) และ (3) ซึ่งค่าในเทอมของวัสดุพรุน (เทอมที่ 3 และ 4 ด้านขวามือของสมการ (2) และ (3)) ไม่มีค่าของความพรุน จึงทำให้ค่าความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนค่าของอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มค่าของความพรุน ซึ่ง

ณ ตำแหน่ง y เท่ากับ 0.1 mm แสดงให้เห็นว่าค่าของอุณหภูมิลดลง 0.02 และ 0.04 % เมื่อเพิ่มค่าความพรุนจาก 0.25 เป็น 0.50 และ 0.80 ตามลำดับ จากสมการ (8) จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความพรุนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนของของแข็งมีผลลดลงจึงทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนรวมมีผลลดลงด้วย



รูปที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับตำแหน่งในแกน y ด้วยอิทธิพลของค่าความพรุน



รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับตำแหน่งในแกน y ด้วยอิทธิพลของค่าความพรุน

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัญหาของการไหลแบบราบเรียบภายในท่อที่มีวัสดุพูนของแมกนีโตไฮโดรไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อนโดยมีสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับการไหลที่อัดตัวได้ ค่า

สภาพการนำความร้อน และค่าความหนืด มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ผลของสนามแม่เหล็กและค่าความพรุน สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็กเป็นจาก 0 เป็น 780 และ 1560 MT จะมีผลทำให้ความเร็วสูงสุดของของไหลบริเวณช่วงกลางท่อลดลง 4.4 และ 12.28 % ตามลำดับ แต่ความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในบริเวณเข้าใกล้ผนังท่อ แต่อุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
2. การเพิ่มค่าของความพรุนจะมีผลต่อความเร็วน้อยมากแต่จะมีผลให้อุณหภูมิของของไหลลดลงเล็กน้อย

ดังนั้นจากผลการวิจัยข้างต้นเราสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและควบคุมการไหลของของไหลนำไฟฟ้าภายในท่อวัสดุพูน โดยการควบคุมสนามแม่เหล็กและค่าของความพรุนของวัสดุ

รายการสัญลักษณ์

p	= ความดัน (Pa)
R	= ค่าคงตัวของแก๊ส ($\text{m}^2/\text{s}^2 \text{ K}$)
T	= อุณหภูมิ (K)
t	= เวลา (s)
ρ	= ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
u	= ความเร็วของการไหลในแกน x (m/s)
v	= ความเร็วของการไหลในแกน y (m/s)
K	= ค่าการซึมผ่านวัสดุพูน (m^2)
k_{eff}	= ค่าสภาพการนำความร้อนรวม ($\text{W}/\text{m K}$)
μ	= ค่าความหนืด ($\text{kg}/\text{m s}$)
C_p	= ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ ($\text{J}/\text{kg K}$)
ε	= ค่าความพรุนของวัสดุพูน
B	= สนามแม่เหล็ก (T)
σ	= ค่าการนำไฟฟ้าของของไหล (S/m)

ตัวห้อย

x	= ทิศทาง x
y	= ทิศทาง y

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Alireza Taklifi ,Cyrus Aghanajafi. (2012). MHD non-Darcian flow through a non-isothermal vertical surface embedded in a porous medium with radiation, *Meccanica* 47, pp. 929–937
- [2] Dulal Pal , Babulal Talukdar. (2010) Buoyancy and chemical reaction effects on MHD mixed convection heat and mass transfer in a porous medium with thermal radiation and Ohmic heating, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 15, pp. 2878–2893
- [3] Chien-Hsin Chen. (2004). Combined heat and mass transfer in MHD free convection from a vertical surface with Ohmic heating and viscous dissipation, *International Journal of Engineering Science* 42, pp. 699–713
- [4] Emad M. Abo-Eldahab , M.S. El Gendy. (2001). Convective heat transfer past a continuously moving plate embedded in a non-Darcian porous medium in the presence of a magnetic field, *Canadian Journal of Physics* Vol. 79
- [5] Ali J. Chamkha. (2001). Unsteady laminar hydromagnetic flow and heat transfer in porous channels with temperature-dependent properties, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 11 No. 5, pp. 430-448
- [6] Ahmed Lotfy Aboul-Hassan and Hazem Ali Attia (2002). Unsteady hydromagnetic flow of a viscoelastic fluid with temperature dependent viscosity, *Canadian Journal of Physics*, Vol. 80
- [7] M.F. El-Amin. (2003). Combined effect of viscous dissipation and Joule heating on MHD forced convection over a non-isothermal horizontal cylinder embedded in a fluid saturated

porous medium, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 263, pp. 337–343

- [8] T.J.Poinsot and S.K.Lele (1992), *J. Comput.Phys.*101,104