

ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในการไหลของท่อขนาดไมโคร

Critical Heat Flux of Water in Micro Tube Flow

คำนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนเป็นปัญหาหลักในงานทางด้านวิศวกรรมเพราะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบทำงาน โดยความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับฟลักซ์ความร้อนของการถ่ายเทความร้อน ฟลักซ์ความร้อนสูงสุดของของไหลคือฟลักซ์ความร้อนวิกฤต ดังนั้นการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจึงมีความสำคัญในการออกแบบเพื่อที่จะสามารถทำนายการถ่ายเทความร้อนได้อย่างถูกต้องเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด การถ่ายเทความร้อนในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลในช่องไหลขนาดเล็กและการไหลของของไหลในท่อขนาดเล็กกับระบบ ซึ่งการไหลของของไหลในท่อขนาดเล็กนี้มีรูปแบบการไหลที่แตกต่างไปจากการไหลในท่อปกติ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อฟลักซ์ความร้อนของของไหล การหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อขนาดเล็กจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด

ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตคือฟลักซ์ความร้อนสูงสุดของของไหลซึ่งเกิดขึ้นขณะของไหลกำลังจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซซึ่งเรียกว่าการเดือด (Boiling) โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซนี้ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ (Latent Heat) จะมีบทบาทสำคัญ การเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลจะเกิดการถ่ายเทความร้อนสูงมาก จะเกิดขึ้นในการเดือดในอุณหภูมิที่แตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการพาความร้อนที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะเป็นอย่างมาก สภาวะการถ่ายเทความร้อนที่ดีเช่นนี้มีขอบเขตอยู่และขีดจำกัดบนฟลักซ์ความร้อนซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนนี้จะเรียกว่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (Critical Heat Flux, CHF) โดยทั่วไปแล้วสภาวะของขีดจำกัดจะเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ฟลักซ์ความร้อนสูงเกินไปหรืออุณหภูมิของพื้นที่ผิวสูงเกินไป เมื่อเกิดขึ้นแล้วการถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถจะตรวจวัดค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตนี้ได้

สำหรับการทดลองหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อขนาดเล็กที่ผ่านมานั้น มีการสร้างเป็นตารางค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต โดยจะแสดงค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 8 มิลลิเมตร ที่ความดันและอัตราการไหลต่าง ๆ และจะมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ โดยสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกสร้างขึ้นจากผลการทดลองเพื่อหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของท่อที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่าง ๆ โดยช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อคือ 1-25 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อขนาดเล็กนั้นสามารถหาค่าได้ถูกต้องสำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเล็กสุดคือ 1 มิลลิเมตร ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากเครื่องมือวัดและการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าฟลักซ์ความร้อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (Critical Heat Flux, CHF) ของน้ำในท่อกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ซึ่งการหาความสัมพันธ์จะทำให้สามารถหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำสำหรับการไหลในท่อขนาดต่างๆ ได้ โดยจะทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ช่วยในการแก้ปัญหาเพราะสามารถคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อขนาดไมโครได้และการใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นจะสามารถเห็นลักษณะการไหลของของไหลเพื่อที่จะนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนของไหลต่อไป โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ใช้คำนวณในงานวิจัยนี้คือโปรแกรม Fluent จากการตรวจเอกสารการทดลองหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อแนวตั้งขนาดเล็กนั้นจะมีผลการทดลองอยู่ในช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1- 25 มิลลิเมตร ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตโดยใช้โปรแกรม Fluent แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จากนั้นก็จะใช้โปรแกรม Fluent ในการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตสำหรับขนาดของท่อที่เล็กลงไปจนกระทั่งโปรแกรมไม่สามารถหาค่าได้ โดยขนาดของท่อที่เล็กลงที่โปรแกรมสามารถคำนวณได้คือ 0.0002 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นท่อขนาดทรานซิสชันนาโน หลังจากการใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์เชิงคำนวณเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความเร็วและเวกเตอร์ของความเร็วของน้ำ และหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อขนาดต่าง ๆ แล้ว จะทำการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดเล็กกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ โดยจะแบ่งเป็นช่วงความสัมพันธ์ในช่วงขนาดของท่อต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากลักษณะทางกายภาพของการไหลที่ส่งผลกระทบต่อค่าฟลักซ์ความร้อนของน้ำ ซึ่งเมื่อทราบสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความ

ร้อนวิกฤตของน้ำในท่อกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ก็จะสามารถหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อขนาดต่าง ๆ ที่ความดันและอัตราการไหลต่าง ๆ ได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อคุณลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของน้ำในท่อขนาดไมโครในแนวดิ่งโดยใช้โปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. เพื่อหาค่าฟลักซ์ความร้อนของน้ำในท่อขนาดไมโคร
3. เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดไมโครกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
4. เพื่อดูผลกระทบของการกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของความเร็ว การกระจายตัวของอุณหภูมิ และลักษณะการไหล ที่ส่งผลกระทบต่อฟลักซ์ความร้อนในท่อขนาดไมโคร

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ของไหลในงานวิจัยนี้คือ น้ำ โดยจะมี 2 สถานะคือน้ำที่เป็นของเหลวและน้ำที่เป็นก๊าซ
2. พิจารณาการไหลแบบคงที่และไม่อัดตัว (Steady Incompressible Flows)
3. การวัดขนาดของท่อคิดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของท่อ
4. การหาค่าฟลักซ์ความร้อนคิดเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนโดยไม่คิดถึงผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำท่อและความขรุขระของผิวท่อ

การตรวจเอกสาร

ปรากฏการณ์การเกิดฟลักซ์ความร้อนวิกฤต

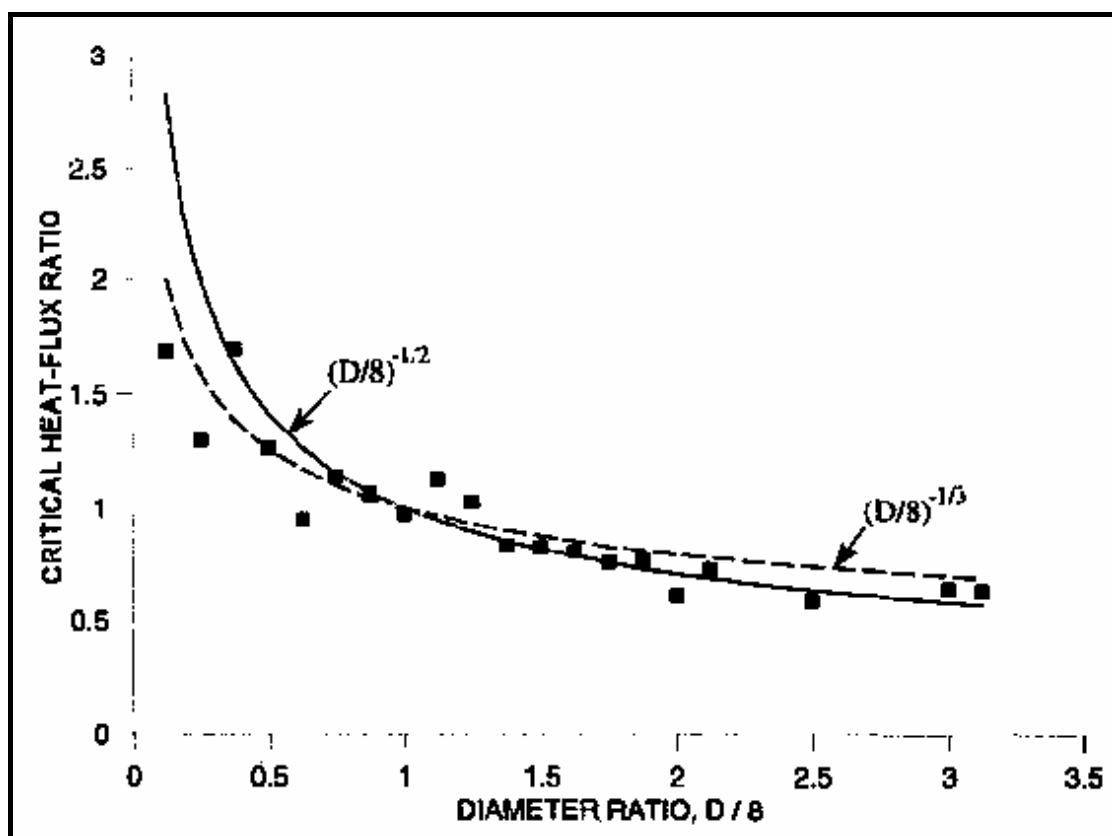
ปรากฏการณ์การเกิดฟลักซ์ความร้อนวิกฤต ได้มีการค้นพบราว ๆ ปี 1934 เมื่อ Nukiyama ได้ทำการทดลองค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดในการเดือดแบบแอ่งของน้ำที่ต้มด้วยศึกษาปัญหาการเพิ่มอัตราการระเหยของหม้อไอน้ำสำหรับเรือดำน้ำ ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ก็มีการศึกษาการเกิดฟลักซ์ความร้อนวิกฤตมากมายซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเดือดแบบแอ่งซึ่งหมายถึงการเดือดภายนอกแบบธรรมชาติของแอ่งของเหลวขนาดใหญ่ นอกจากนั้นยังมีการศึกษาอีกหลายกรณีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของการไหลภายในแบบบังคับในช่องทางไหลเพื่อที่จะนำเอาข้อมูลไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น เตาปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องกำเนิดไอแม่เหล็กเหนี่ยวนำสูง และเครื่องยนต์ของจรวด แต่มีการศึกษาเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับเรื่องของฟลักซ์ความร้อนวิกฤต ในการไหลภายนอกแบบบังคับ

การศึกษาและทดลองเพื่อหาค่าฟลักซ์ความร้อนของของไหลสำหรับการไหลภายในแบบบังคับในช่องทางไหลนั้นได้มีการศึกษาและทดลองเรื่อยมาจนปี 1975 ได้มีการจัดทำเป็นตารางค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำเป็นครั้งแรกโดย Doroshchuk et al. (1975) โดยมีข้อมูลของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต 5,000 ค่า ที่ความดันและอัตราการไหลต่าง ๆ ในท่อแนวตั้งขนาด 8 มิลลิเมตร และ Doroshchuk et al. (1975) ได้มีการเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตกับอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เมื่อเทียบกับค่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 8 มิลลิเมตร สมการดังกล่าวคือ

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8mm}} = \left(\frac{D}{8} \right)^n \quad (1)$$

ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโดยนักคิดหลายท่านเช่น Muller-Menzel (1987), Boltenko et al. (1990), Kirillov et al. (1989), Bergles. (1963), Ornatskiy (1969) และ Cheng et al. (1992) โดยความสัมพันธ์ในสมการดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่า n ที่จะเข้ามาแทนในสมการ ได้มีการหาค่าตัวเลขเข้ามาแทนค่าใน n เช่น $-1/2$, $-1/3$, $-1/4$ Groeneveld et al. (1996) ได้ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาตัวเลขค่า n ที่ดีที่สุดมาแทนเพื่อที่จะให้ได้

ค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่สุด ซึ่งจากภาพที่ 1 จะเห็นว่า ค่า n เท่ากับ $-1/2$ จะให้ค่าใกล้เคียงกว่า n เท่ากับ $-1/3$



ภาพที่ 1 กราฟเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของสมการความสัมพันธ์ที่ n เท่ากับ $-1/2$ และ $-1/3$ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่าง ๆ

ที่มา : Groeneveld et al. (1996)

ในปี 1995 Groeneveld et al. ได้มีการพัฒนาตารางค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำ โดยมีข้อมูลของค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต 30,000 ค่า ที่ความดันและอัตราการไหลต่าง ๆ ในท่อแนวดิ่งขนาด 8 มิลลิเมตร ได้มีการเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตกับอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เมื่อเทียบกับค่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 8 มิลลิเมตร สมการดังกล่าว โดยใช้ค่า n เท่ากับ $-1/2$

ความสัมพันธ์ในสมการดังกล่าวนี้ให้ค่าใกล้เคียงได้ในขนาดของท่อที่จำกัดคือ 3-25 มิลลิเมตร ซึ่งไม่สามารถใช้กับท่อขนาดไมโครได้

การแบ่งขนาดของท่อ

ได้มีการมีการแบ่งท่อตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) โดยมีการแบ่งออกเป็นชั้น ๆ ดังนี้ (ที่มา : Kandlikar et al. 2006)

ท่อขนาดเล็ก	$D > 3$	มิลลิเมตร
ท่อขนาดมินิ	$0.2 < D \leq 3$	มิลลิเมตร
ท่อขนาดไมโคร	$0.01 < D \leq 0.2$	มิลลิเมตร
ท่อขนาดทรานซิสชันไมโคร	$0.001 < D \leq 0.01$	มิลลิเมตร
ท่อขนาดทรานซิสชันนาโน	$0.0001 < D \leq 0.001$	มิลลิเมตร
ท่อขนาดนาโน	$D \leq 0.0001$	มิลลิเมตร

ดังนั้นการวิจัยนี้จึงได้นำโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เข้ามาช่วยในการแก้คำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดต่าง ๆ โดยการคำนวณโดยใช้โปรแกรมนั้นจะคำนวณในช่วงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.0002-40 มิลลิเมตร ซึ่งครอบคลุมช่วง ท่อขนาดเล็ก ท่อขนาดมินิ ท่อขนาดไมโคร ท่อขนาดทรานซิสชันไมโครและท่อขนาดทรานซิสชันนาโน แล้วนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาหาสมการความสัมพันธ์ต่อไป

ทฤษฎี

สมการหลักที่ควบคุม

ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบของไหลชนิดเดียวแต่มี 2 สถานะ คือของเหลวและก๊าซ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้คำนวณในโปรแกรม Fluent นั้นคือแบบจำลองแบบ Mixture Model โดยจะมีสมการควบคุมดังนี้คือ

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (2)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (3)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (4)$$

โดยที่ $\vec{v}_m$ คือ ความเร็วมวลเฉลี่ย

ρ_m คือ ความหนาแน่นของ Mixture

α_k คือ Volume Fraction ของ เฟส k

$\dot{m}$ คือ อัตราการถ่ายเทมวล

สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p - \nabla \cdot \left[\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T) \right] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (5)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (6)$$

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (7)$$

โดยที่ n คือ เลขของเฟส

F คือ a Body Force

μ_m คือ ความเร็วของ Mixture

$\vec{v}_{dr,k}$ คือ ผลต่างของความเร็วระหว่างเฟสที่ 2 กับ Mixture

สมการพลังงาน (Energy Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = -\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (8)$$

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (9)$$

โดยที่ k_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

S_E คือ Volumetric Heat Sources

h_k คือ Sensible Enthalpy ของเฟส k

โดย Relative (Slip) Velocity และ The Drift Velocity คือ

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (10)$$

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_{qk} \quad (11)$$

$$\vec{v}_{pq} = \frac{(\rho_p - \rho_m) d_p^2}{18 \mu_q f_{drag}} \vec{a} \quad (12)$$

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (13)$$

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla) \vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (14)$$

สมการ Volume Fraction สำหรับ Secondary Phase

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (15)$$

สมการพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (16)$$

สมการอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (17)$$

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (18)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (19)$$

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1 \text{ และ } \sigma_\epsilon = 1.3$$

โดย non-equilibrium wall function (Kim and Choudhury 1995) ถูกใช้ในงานวิจัยนี้

ปัญหาในการพาความร้อนทั่วไปนั้นจะต้องอาศัยความรู้ในด้านตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Parameter) ซึ่งจะเป็นแนวความคิดในการทำความเข้าใจในกลไกทางกายภาพและทำให้เกิดวิธีการที่ง่ายกว่าในการแก้ปัญหาในการถ่ายเทความร้อนใด ๆ

ในการเดื่อนั้นก่อนข้างยากที่จะพัฒนาสมการหลักที่ควบคุม ออกมาได้จาก ทฤษฎี ดังนั้นจึงง่ายกว่าที่จะหาตัวแปรไร้มิติที่เหมาะสมจาก ทฤษฎี ของ Buckingham – Pi ที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไป

ซึ่งจากความรู้ด้านการพาความร้อนนั้น พบว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนี้จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวกับจุดอิ่มตัว $\Delta T = |T_s - T_{sat}|$ แรงลอยตัวที่เกิดจากความหนาแน่นแตกต่างของของเหลวกับไอ $g(\rho_l - \rho_v)$ ความร้อนแฝง h_{fg} แรงตึงผิว σ และคุณสมบัติทางกายภาพความร้อนของของเหลวหรือไอ ρ, c_p, k_{eff}, μ นั่นคือ

$$h = f \left[\Delta T, g(\rho_l - \rho_v), h_{fg}, \sigma, L, \rho, c_p, k_{eff}, \mu \right] \quad (20)$$

เนื่องจากในที่นี่มีสิบตัวแปรกับห้ามิติด้วยกัน (m, kg, s, J, K) ดังนั้นจะมีกลุ่มไร้มิติ 5 กลุ่มด้วยกัน ดังนี้

$$\frac{hL}{k} = f \left[\frac{\rho g(\rho_l - \rho_v)L^3}{\mu^2}, \frac{c_p \Delta T}{h_{fg}}, \frac{\mu c_p}{k_{eff}}, \frac{g(\rho_l - \rho_v)L^2}{\sigma} \right] \quad (21)$$

หรือนิยามกลุ่มไร้มิติ

$$Nu_L = f \left[\frac{\rho g(\rho_l - \rho_v)L^3}{\mu^2}, Ja, Pr, Bo \right] \quad (22)$$

ตัวเลขของ Nusselt และ Prandtl นั้นรู้จักกันดีจากการวิเคราะห์ทางการพาความร้อน ตัวแปรไร้มิติใหม่ที่เกิดขึ้นคือตัวเลขของ Jakob, Ja ตัวเลขของ Bond, Bo และตัวเลขที่ไม่มีชื่อที่มีส่วนคล้ายกับตัวเลขของ Grashof อยู่มากตัวแปรที่ไม่มีชื่อนี้จะแสดงผลการเคลื่อนไหวจากแรงลอยตัวของของเหลวที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน ตัวเลขของ Jakob ซึ่งตั้งชื่อตาม Max Jakob นั้นเป็นอัตราส่วนของพลังงานความร้อนสัมผัสสูงสุดที่ถูกดูดซับเข้าไปต่อความร้อนแฝง ที่ถูกดูดซับเข้าไปในระหว่างการเดือดนั้นในกรณีทั่วไปแล้วค่าความร้อนสัมผัสจะน้อยกว่าความร้อนแฝงมากจนค่า Ja จะมีค่าน้อยมาก ตัวเลขของ Bond นั้นจะเป็นอัตราส่วนของแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับวัตถุต่อแรงตึงผิว

การถ่ายเทความร้อนจากการเดือด

หากมีการระเหยเกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างของแข็งกับของเหลวแล้ว จะเรียกว่าการเดือด ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของผิว T_s เกินค่าอุณหภูมิอิ่มตัว T_{sat} ที่สอดคล้องกับความ

ด้านของของเหลวนั้น มีการถ่ายเทความร้อนจากผิวของของแข็งไปสู่ของเหลว ซึ่งจะสามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนนั้นได้จากกฎของนิวตันเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

$$Q_s = h(T_s - T_{sat}) = h\Delta T_e \quad (23)$$

$$\Delta T_e = T_s - T_{sat} \quad (24)$$

Q_s = ฟลักซ์ความร้อนจากผิวของของแข็งไปสู่ของเหลว, W/m^2

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $W/m^2 K$

T_s = อุณหภูมิของผิวของแข็ง, K

T_{sat} = อุณหภูมิอิ่มตัวของของเหลว, K

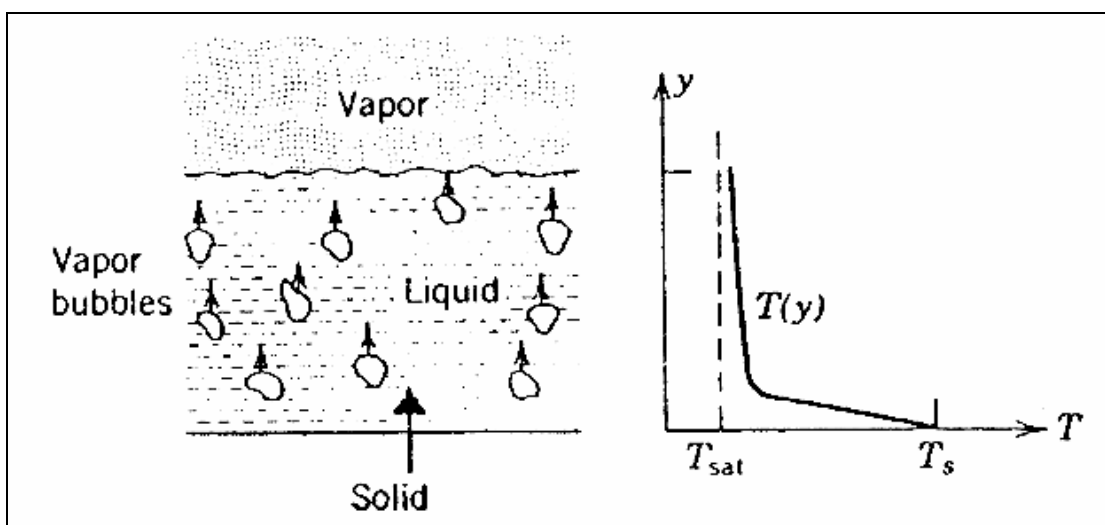
ΔT_e = อุณหภูมิส่วนเกิน, K

กระบวนการนี้จะถูกควบคุมโดยการเกิดฟองซึ่งจะเติบโตขึ้นและแยกตัวออกไปจากผิว การเติบโตและพลศาสตร์ของฟองนั้นจะมีลักษณะที่ซับซ้อนมากโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) ธรรมชาติของผิว และคุณลักษณะทางกายภาพความร้อนของของไหลเช่นแรงตึงผิว เป็นต้น ในทางกลับกัน พลศาสตร์ของการเกิดฟองก็จะมีผลกระทบต่อการเคลื่อนไหวยของของไหลที่ใกล้ ๆ กับผิว และจะมีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอย่างมาก

การเดือดอาจเกิดขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ กันตัวอย่างเช่นการเดือดแบบแอ่ง (Pool Boiling) จะเกิดขึ้นโดยที่มีแอ่งของเหลวที่นิ่งอยู่และเกิดการเคลื่อนไหวยที่ใกล้ผิวหน้าเนื่องจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติจนถึงการผสมกันเนื่องจากการเติบโตและแยกตัวของฟอง ในทางตรงกันข้าม การเดือดแบบพาบังคับจะเกิดขึ้นโดยมีการเคลื่อนไหวยของของไหลโดยสื่อต้านนอกพร้อมกับมีการพาธรรมชาติและการผสมของฟองอาจจะแยกการเดือดออกเป็นการเดือดแบบได้เย็น (Subcooled Boiling) และการเดือดอิ่มตัว (Saturated Boiling) ในการเดือดแบบได้เย็นนั้นอุณหภูมิของของเหลวจะต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวและฟองที่เกิดขึ้นที่ผิวนั้นจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวได้ แต่การเดือดอิ่มตัวนั้นจะเกิดโดยอุณหภูมิของของเหลวจะเกินกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ฟองที่เกิดขึ้นจะถูกของเหลวดันขึ้นไปด้วยแรงลอยตัวและหนีไปถึงผิวอิสระ

การเดือดแบบแอ่ง

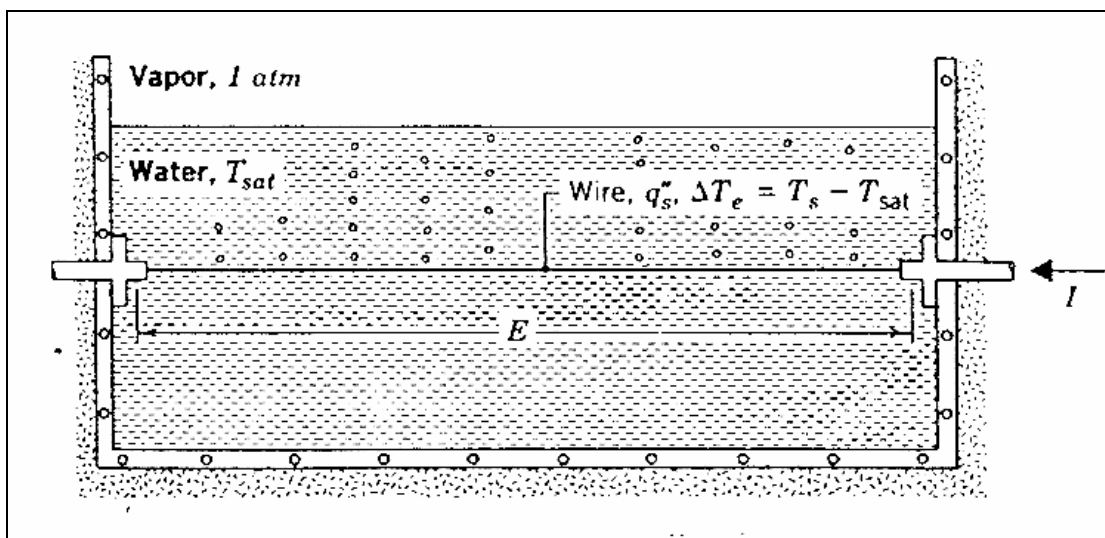
การเดือดแบบแอ่งอิมตัว (Saturated Pool Boiling) ดังแสดงในภาพที่ 2 อุณหภูมิของของเหลวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อออกห่างผิวของแข็ง แต่ก็ยังสูงกว่าอุณหภูมิอิมตัว ฟองที่เกิดขึ้นที่ผิวต่อของของเหลวกับของแข็งนั้นจะลอยขึ้นและมีของเหลวไหลเข้าแทนที่ที่ที่รอยต่อนั้น กลไกการเดือดเช่นนี้จะเข้าใจได้ง่ายขึ้นหากเราพิจารณาเส้นโค้งของการเดือด (Boiling Curve)



ภาพที่ 2 การกระจายอุณหภูมิในการเดือดแบบแอ่งที่ผิวรอยต่อระหว่างของเหลว-ไอ
ที่มา : ประดิษฐ์ เทตุน (2543)

เส้นโค้งของการเดือด

Nukiyama ได้ทำการแบ่งช่วงการเดือดต่าง ๆ กัน ของการเดือดแบบแอ่งเป็นคนแรกโดยอาศัยเครื่องมือทดลองตามภาพที่ 3 มีการหาพล็อตความร้อนจากเส้นลวดนิโครมที่วางตัวในแนวนอนไปสู่น้ำอิมตัวโดยการวัดกระแสที่ไหลและศักย์ไฟฟ้าที่ตกลงอุณหภูมิของเส้นลวดนั้นจะหาได้จากแนวความคิดที่ว่า ความต้านทานความร้อนของเส้นลวดนั้นจะแปรกับอุณหภูมิ ซึ่งเรียกกันว่าการให้ความร้อนแบบควบคุมด้วยกำลังไฟฟ้าซึ่งอุณหภูมิเส้นลวด (T_s) จะเป็นตัวแปรไม่อิสระและกำลังไฟฟ้าที่ควบคุมไว้จะเป็นตัวแปรอิสระเมื่อสร้างกราฟตามรูปและดูตามลูกศรของเส้นโค้งการให้ความร้อนนั้นจะเห็นว่าเมื่อให้กำลังไฟฟ้าเข้าไปแล้วพล็อตความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในตอนแรกและจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนต่อมาตามอุณหภูมิส่วนเกินที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3 เครื่องมือให้ความร้อนโดยควบคุมกำลังไฟฟ้าของ Nukiyama ในการหาเส้นโค้งการเดือด

ที่มา : ประดิษฐ์ เทิดทูน (2543)

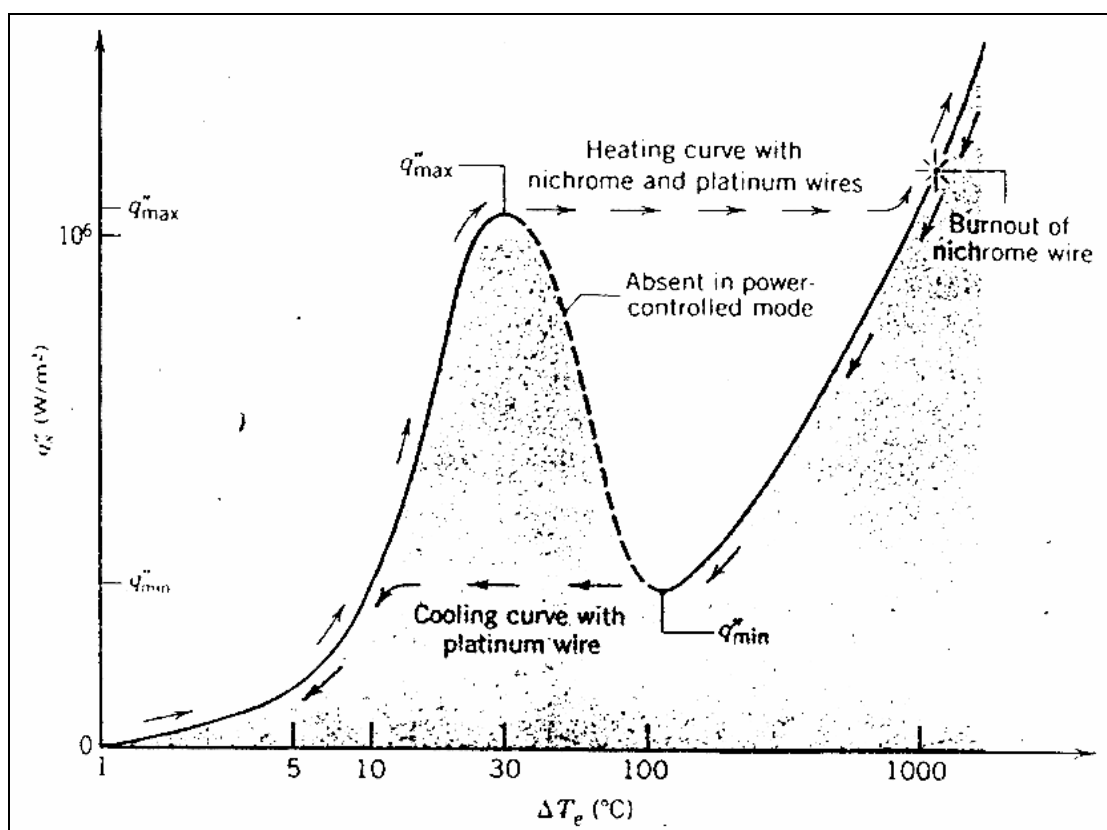
Nukiyama สังเกตว่าการเดือดจะเห็นได้จากการเกิดฟองซึ่งจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) ประมาณ 5 K หากเพิ่มกำลังไฟฟ้ามากขึ้นฟลักซ์ความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเมื่อเกินขีดจำกัดหนึ่ง $Q_{\max}$ นั้นอุณหภูมิจะกระโดดไปสู่จุดหลอมเหลวอย่างรวดเร็วและเกิดการไหม้ขึ้น อย่างไรก็ดี หากทดลองซ้ำโดยใช้เส้นลวดทองคำขาวซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่สูงกว่าแล้วจะสามารถควบคุมการเดือดให้อยู่เหนือค่าสูงสุดนั้นได้โดยไม่มีการไหม้ เมื่อลดกำลังไฟฟ้าลงเรื่อย ๆ ค่าอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) ที่แปรเปลี่ยนไปกับฟลักซ์ความร้อนนั้นจะเป็นไปตามเส้นโค้งแห่งการทำความเย็นตามรูปเมื่อฟลักซ์ความร้อนถึงจุดต่ำสุดแล้วหากลดกำลังต่อไปอีกจะทำให้อุณหภูมิส่วนเกินนั้นตกลงอย่างรวดเร็วและกระบวนการก็จะวิ่งตามเส้นโค้งเริ่มแรกกลับไปสู่จุดอิ่มตัวอีก

ชนิดของการเดือดแบบแอ่ง

หากพิจารณาการเดือดแบบแอ่งนี้อย่างถี่ถ้วนจะสามารถแบ่งเป็นช่วงหรือชนิดต่างๆได้ซึ่งช่วงต่างๆนี้จะแยกตามเส้นโค้งของการเดือดในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นเส้นโค้งที่ได้จากการเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศจากการสังเกตว่า จะขึ้นกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) พร้อมกับ

อุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) ดังนั้นช่วงการเดือดต่าง ๆ ก็จะแบ่งตามค่าของอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) คือ

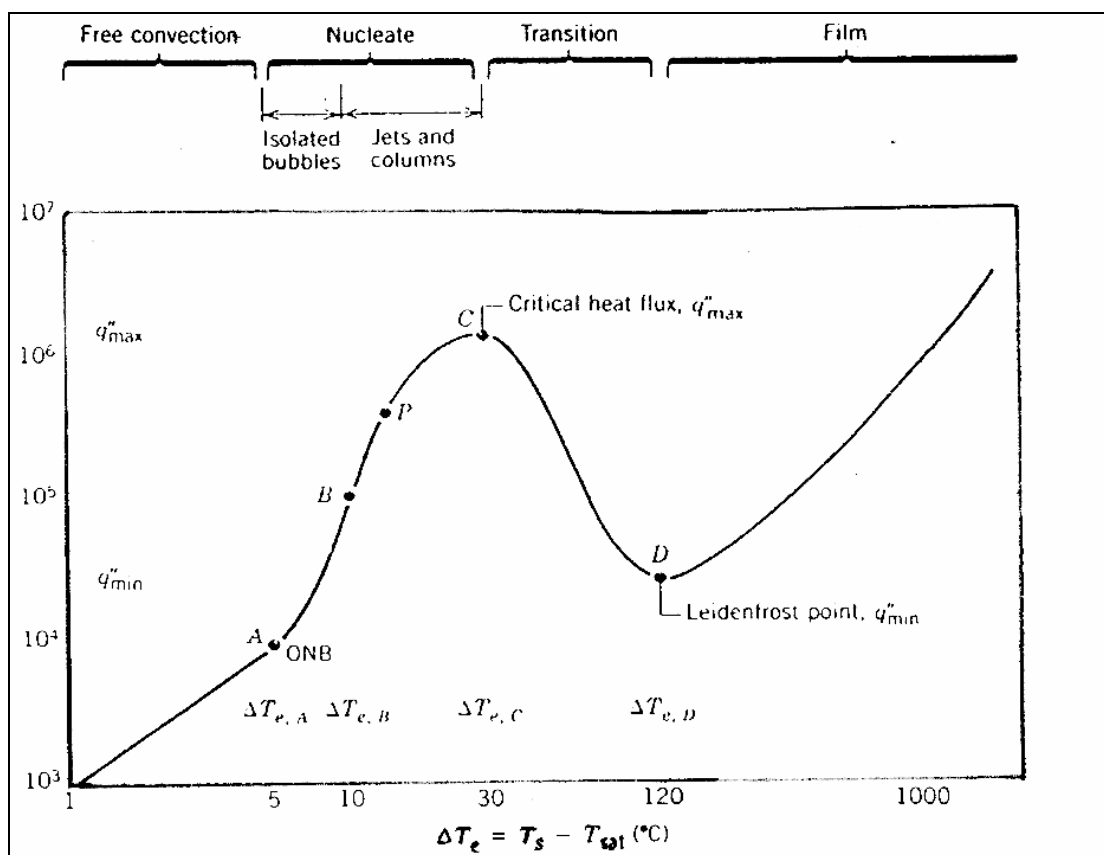
1. การเดือดแบบพาความร้อนธรรมชาติ (Free Convection Boiling) จะเกิดขึ้นเมื่อ $\Delta T_e < \Delta T_{e,A}$ ประมาณ 5 K ในช่วงนี้จะมีไอเกิดขึ้นไม่พอที่จะสัมผัสกับผิวของเหลวที่จะทำให้เกิดการเดือดได้ที่อุณหภูมิอิ่มตัวหากเพิ่มอุณหภูมิส่วนเกินไปอีกการเกิดการรวมตัวของไอก็เป็นฟองขึ้นแต่ที่ใต้จุด A ภายใต้นี้ (ซึ่งมักเรียกกันว่าจุดเกิดการเดือดแบบฟอง) นั้นจะเกิดความเคลื่อนไหวของไหล ได้โดยผลของการพาความร้อนธรรมชาติแล้วแต่ว่าจะเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) จะแปรกับกำลัง $1/4$ หรือ $1/3$ ของอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) จึงทำให้ ฟลักซ์ความร้อน (Q_s) แปรกับกำลัง $5/4$ หรือ $4/3$ ของอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) ตามลำดับ



ภาพที่ 4 เส้นโค้งการเดือดของ Nukiyama ในกรณีน้ำอิ่มตัว
ที่มา : ประดิษฐ์ เทิดทูน (2543)

2. การเดือดแบบฟอง (Nucleate Boiling) การเดือดแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $\Delta T_{e,A} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,C}$ โดยที่ $\Delta T_e \approx 30\text{ K}$ ในช่วงนี้จะมีการแยกชนิดการไหลเป็นอีก 2 ชนิด ในช่วง A-B นั้นจะมีการเกิดฟองเดี่ยวที่ตำแหน่งการเกิดฟองแยกกันอยู่ที่ผิวตามภาพที่ 3 การแยกนี้ จะทำให้เกิดการผสมกันของของไหลที่ใกล้ผิวทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) และค่าฟลักซ์ความร้อน (Q_s) เพิ่มขึ้นในช่วงนี้การถ่ายเทความร้อนจะผ่านผิวไปสู่ของเหลวโดยตรงไม่ได้ ผ่านฟองที่ลอยตัวขึ้นไปหากเพิ่มค่าอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) ไปจนถึง $\Delta T_{e,B}$ แล้วตำแหน่งการเกิดฟองอีกหลายตำแหน่งจะเริ่มเกิดฟองขึ้นทำให้ฟองไอบนเปกกันไปมาและรวมตัวกันเข้า ในช่วง B-C นั้นไอบจะลอยตัวขึ้นไปเป็นลำ (Jet) หรือเป็นเสา (Column) ซึ่งจะเข้าประสานเป็นก้อนไอบ การแทรกซ้อนของฟองที่หนาแน่นมากนี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวยของของเหลว จุด P ตามภาพที่ 5 นั้นจะสอดคล้องกับจุดหักเหของเส้นโค้งการเดือด ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) จะสูงสุดที่จุดนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงหากเพิ่มอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) ขึ้น ถึงแม้ว่าค่าฟลักซ์ความร้อนซึ่งเป็นผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิส่วนเกินนั้นจะเพิ่มขึ้นก็ตาม แนวโน้มนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากในช่วงที่ $\Delta T_e > \Delta T_{e,P}$ นั้น ค่าเพิ่มขึ้น สัมพัทธ์ ของอุณหภูมิส่วนเกินนั้นจะเกินค่าการลดสัมพัทธ์ ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่จุด C นั้น หากเพิ่มค่าอุณหภูมิส่วนเกินไปอีกจะสมดุลกับค่าลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนพอดีจะเกิดค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตขึ้น ในกรณีของน้ำนั้นจะมีค่าเกิน 1 MW/m^2 ที่จุดสูงสุดนี้ จะเกิดฟองมากมายทำให้ยากที่ของเหลวจะเข้าไปเปียกผิวถ่ายเทความร้อนได้ เนื่องจากมีฟลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงมาก ในขณะที่อุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) ต่ำมาก การเดือดแบบฟองนี้จะเป็นที่ต้องการประยุกต์ใช้งานในแง่วิศวกรรม ตามปกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะประมาณ $10^4\text{ W/m}^2\text{ K}$ ซึ่งสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนธรรมดาที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะมาก

3. การเดือดแปรเปลี่ยน (Transition Boiling) ช่วงนี้จะมี $\Delta T_{e,C} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,D}$ โดยที่ $\Delta T_e \approx 120\text{ K}$ เรียกกันว่าการเดือดแบบแปรเปลี่ยนหรือการเดือดฟิล์มไม่เสถียรหรือการเดือดแบบฟิล์มบางส่วน การเกิดฟองจะเร็วมากจนมีแผ่นฟิล์มไอบปกคลุมอยู่ที่ผิว ณ จุดใด ๆ ของผิวนั้น เงื่อนไขจะกลับไปมาระหว่างการเดือดแบบฟองกับการเดือดแบบฟิล์มแต่สัดส่วนของผิวน้ำที่ปกคลุมโดยฟิล์มนั้นจะเพิ่มขึ้นหากอุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการนำความร้อนของไอบจะน้อยกว่าของเหลวมากจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) และฟลักซ์ความร้อน (Q_s) ลดลงเมื่ออุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) เพิ่มขึ้น



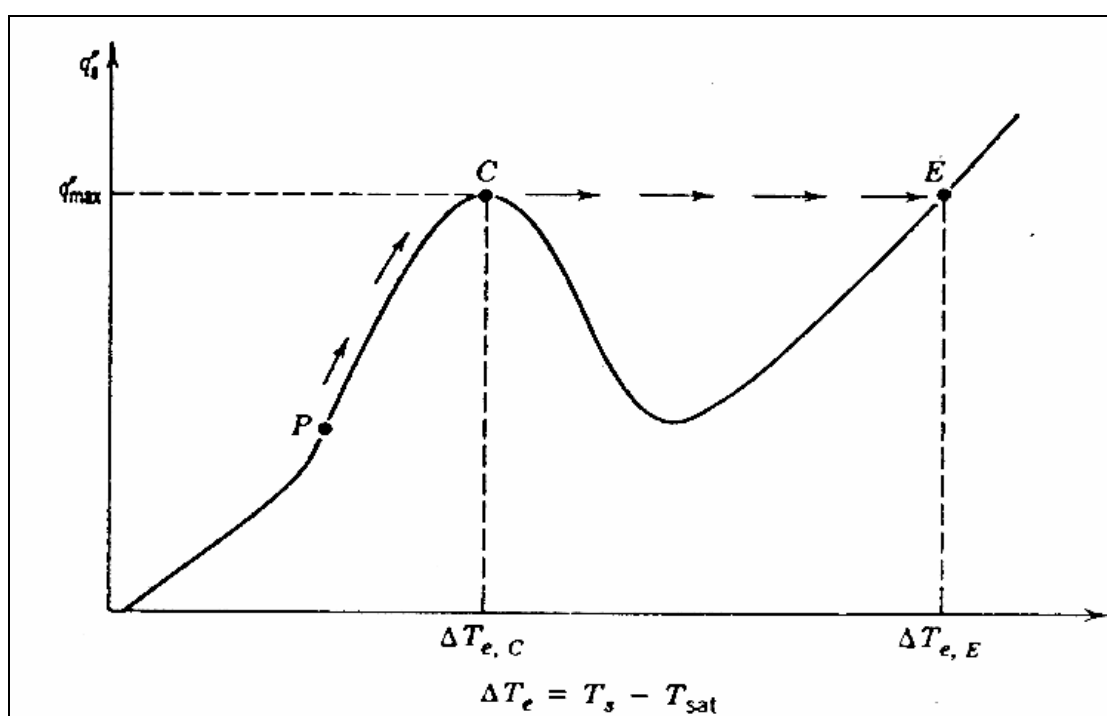
ภาพที่ 5 เส้นโค้งการเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศ

ที่มา : ประดิษฐ์ เทิดทูน (2543)

4. การเดือดแบบฟิล์ม ช่วงนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ $\Delta T_e > \Delta T_{e,D}$ ที่จุด D ของเส้นโค้งซึ่งเรียกว่า จุด ไคเดนฟรอสต์ นั้นจะมีค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำสุด $Q_s = Q_{min}$ และผิวจะปกคลุมด้วยแผ่นไอน์ การถ่ายเทความร้อนจากผิวไปสู่ของเหลวจะเกิดขึ้นโดยการนำผ่านแผ่นไอน์ซึ่งมีการค้นพบครั้งแรกโดย Leidenfrost ในปี 1756 ที่สังเกตหยดน้ำที่เคลื่อนตัวไปมาบนผิวร้อนหากเพิ่มอุณหภูมิผิวขึ้นอีกจะมีการแผ่รังสีผ่านฟิล์มไอน์มากขึ้นและฟลักซ์ความร้อน (Q_s) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิส่วนเกิน (ΔT_e) เพิ่มขึ้น

ถึงแม้ว่าการพิจารณาการเดือดที่ผ่านไปแล้วคิดว่าควบคุมอุณหภูมิที่ผิว (T_s) ได้ก็ตาม จะต้องระลึกถึงว่าการทดลองของ Nukiyama และการประยุกต์ต่าง ๆ นั้น จะควบคุมฟลักซ์ความร้อน (Q_s) ไว้ด้วยซึ่งหากเริ่มที่จุด P ในรูป 1.6 แล้วเพิ่มฟลักซ์ความร้อนไปเรื่อย ๆ ค่าของ ΔT_e

และ T_s จะเพิ่มขึ้นด้วยและเส้นโค้งการเดือดจะเพิ่มไปที่จุด C อย่างไรก็ตามการเพิ่มฟลักซ์ความร้อน (Q_s) เหนือจุดนี้จะทำให้เกิดการกระโดดจากเส้นโค้งไปอย่างรวดเร็วซึ่งจะทำให้เงื่อนไขผิวถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนกะทันหันจาก $\Delta T_{e,C}$ เป็น $\Delta T_{e,E} \equiv T_{s,E} - T_{sat}$ เนื่องจาก $T_{s,E}$ อาจเกินจุดหลอมเหลวของของแข็ง อาจเกิดการทำให้ลายของระบบได้ ด้วยเหตุนี้จึงมักจะเรียกจุด C ว่าจุดไหม้ (Burnout Point) หรือ วิกฤตการเดือด (Boiling Crisis) และความรู้เกี่ยวกับฟลักซ์ความร้อนวิกฤต (Critical Heat Flux, CHF) จึงเป็นสิ่งสำคัญมากเราต้องการหาพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนใกล้กับจุดนี้แต่ไม่ต้องการให้เกินจากจุดนี้ไป



ภาพที่ 6 จุดเริ่มต้นของวิกฤตการเดือด

ที่มา : ประดิษฐ์ เทิดทูน (2543)

รูปแบบของการไหลสองสถานะ

ท่อกลมในแนวดิ่ง

รูปแบบการไหลในท่อกลมแนวดิ่งมีการแสดงไว้ในภาพที่ 7 ซึ่งรูปแบบเหล่านี้จะมีการนิยามสำหรับการไหลแนวดิ่งดังต่อไปนี้

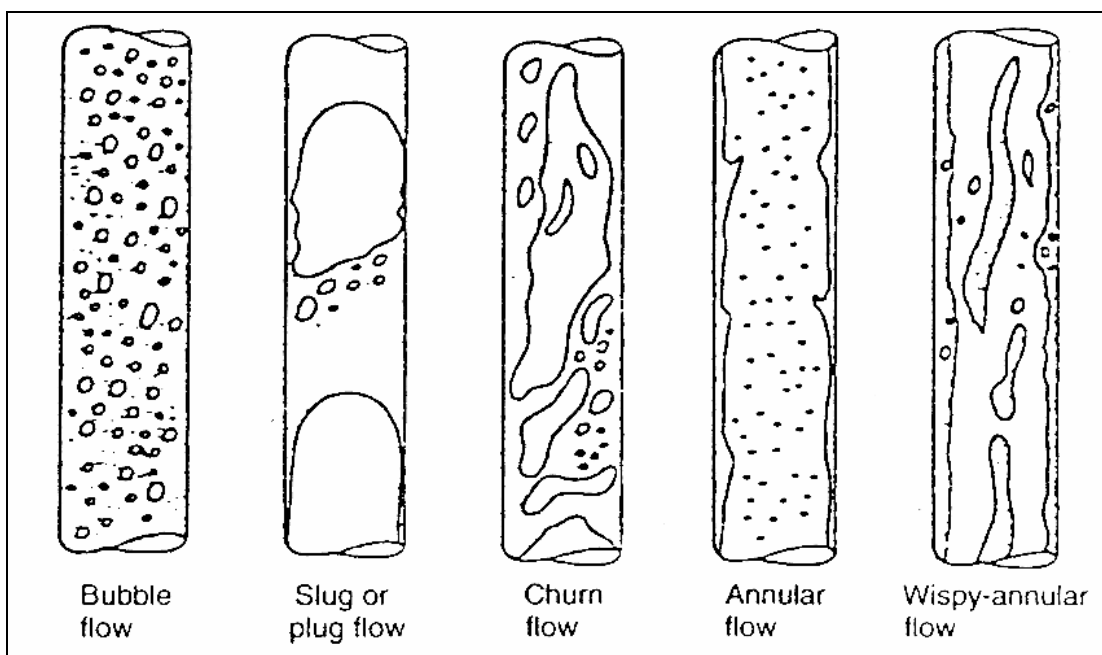
1.การไหลแบบเป็นฟอง (Bubble Flow) สถานะของเหลวจะต่อเนื่องและมีฟองก๊าซกระจายเป็นจุด ๆ

2.การไหลแบบเป็นก้อน (Slug or Plug Flow) ในการไหลแบบนี้จะมีฟองอากาศที่เกิดขึ้นเป็นรูปลูกปี่ซึ่งอาจจะแยกจากกันเป็นช่วง ๆ และมีฟองอากาศเล็ก ๆ แทรกอยู่มากมาย

3.การไหลแบบเป็นโพรง (Churn Flow) เมื่อความเร็วในการไหลมากขึ้น การไหลที่แบบเป็นก้อนนั้นจะมีการแปรเปลี่ยนไปโดยที่ฟองอากาศจะรวมเข้าหากันมากขึ้นและมีช่วงซึ่งไม่เสถียร หากเป็นท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากแล้วจะเกิดการเคลื่อนที่ที่มีการสั่นไหวของของเหลว ขึ้น ๆ ลง ๆ ในท่อนั้น ซึ่งเป็นชื่อของการไหลเป็นโพรงนั่นเองหากว่าเป็นท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อย ๆ แล้วอาจจะไม่มีการสั่นของของเหลวเกิดขึ้น แต่อาจสังเกตเห็นการแปรเปลี่ยนการไหลเป็นก้อนและการไหลแบบเป็นวงแหวนด้วย

4.การไหลแบบวงแหวน (Annular Flow) ในการไหลแบบนี้ของเหลวจะไหลตามผนังของท่อด้วยลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มและมีสถานะก๊าซที่ไหลในแนวแกนกลางโดยทั่วไปแล้วของเหลวบางส่วนจะถูกดึงขึ้นไปเป็นหยดเล็ก ๆ ในแนวแกนกลางที่เป็นแก๊สนั้น บางครั้งฟองอากาศจะถูกดึงเข้าไปในแผ่นฟิล์มของเหลวได้ด้วยเช่นกัน

5.การไหลแบบวงแหวนแทรก (Wispy Annular Flow) ถ้าหากว่าอัตราการไหลของแผ่นฟิล์มของเหลวนั้นเพิ่มมากขึ้นความเข้มข้นของเหลวภายในแกนกลางของก๊าซจะเพิ่มมากขึ้น และท้ายสุดหยดของเหลวจะรวมตัวกันกลายเป็นก้อนหรือแฉก ของเหลวอันใหญ่ภายในแกนกลางนั้นช่วงนี้จะเป็นช่วงที่สำคัญซึ่งเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแต่ละสถานะสูงมาก

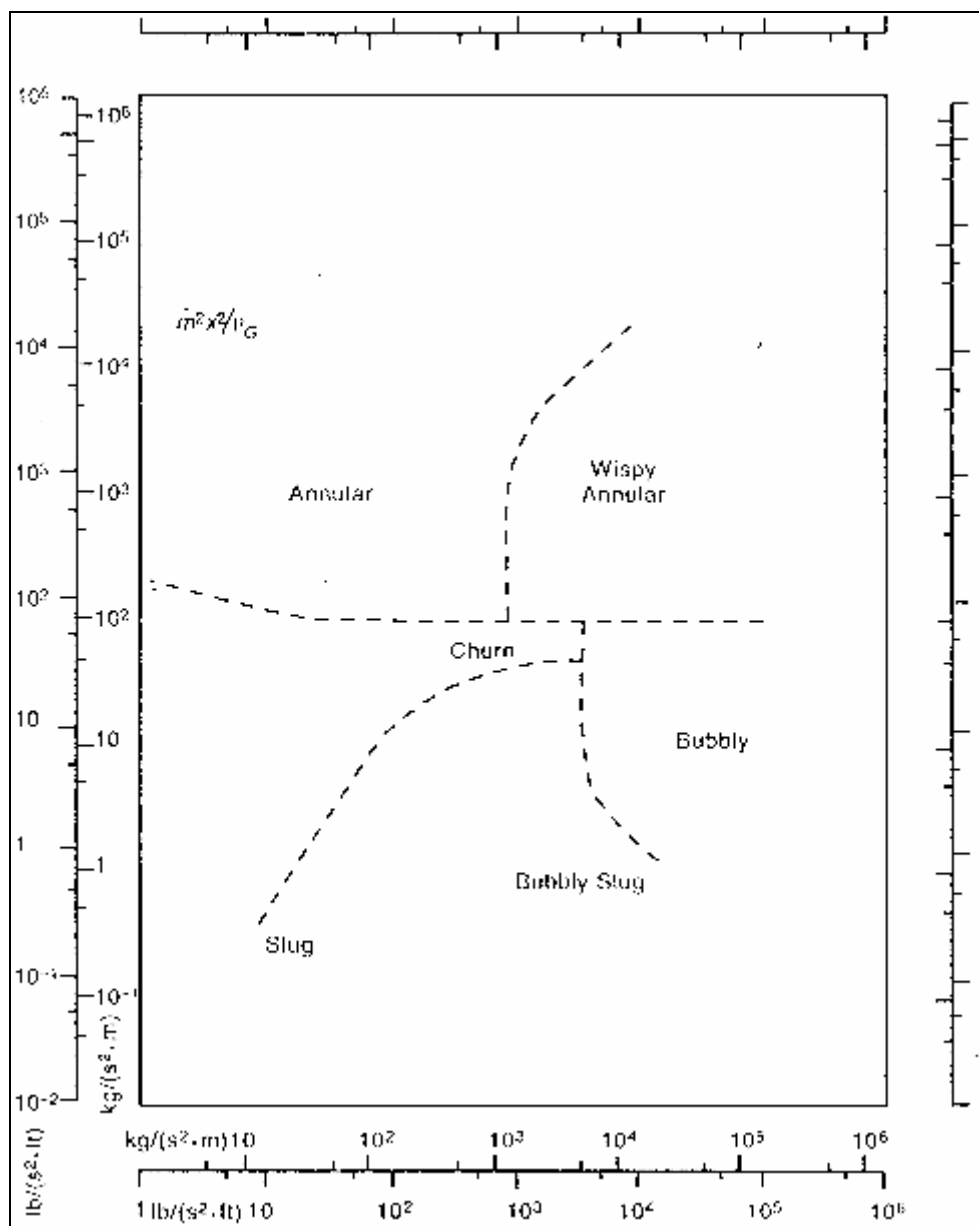


ภาพที่ 7 รูปแบบการไหลสองสถานะในท่อแนวดิ่ง

ที่มา : ประดิษฐ์ เทิดทูน (2543)

ข้อมูลของรูปแบบการไหลในแต่ละส่วนจะแสดงได้ในรูปของแผนภูมิ รูปแบบการไหลซึ่งในแผนภูมินี้จะแสดงถึงช่วงของการไหลชนิดต่าง ๆ ถึงแม้ว่าอาจจะมีการใช้ลักษณะแกนต่าง ๆ กัน แต่แผนภูมิที่นิยมกันทั่วไปนั้น เสนอโดย Hewitt and Roberts (1969) ดังภาพที่ 8 ซึ่งเขียนกราฟโดยให้แกนทั้งสองเป็นอัตราการส่งผ่านโมเมนต์ที่ผิวหน้าของแต่ละสถานะตามลำดับตัวแปรที่แสดงในภาพที่ 8 นั่นคือ อัตราการไหลของมวล ($\dot{m}$) ค่าคุณภาพ (x) ค่าความหนาแน่นของ ρ_v กับ ρ_l ของสถานะก๊าซและของเหลวตามลำดับ

แผนภูมิที่แสดงไว้ในภาพที่ 8 นั้นใช้กับการไหลลงไม่ได้และในกรณีนี้ก็จะมียลักษณะของการไหลแบบวงแหวนมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 8 แผนภูมิรูปแบบการไหลของการไหลขึ้นในท่อตั้ง
ที่มา : ประดิษฐ์ เทิดทูน (2543)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ Intel Pentium 4 (3.0 GHz)
2. เครื่องพิมพ์ชนิดใช้แสงเลเซอร์ (Laser Printer)
3. โปรแกรม Solidworks, Gambit, Fluent

วิธีการ

ขั้นตอนการทำวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมทฤษฎี ข้อมูล เอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ความร้อนวิกฤตและการถ่ายเทความร้อนของน้ำในท่อขนาดไมโคร
2. สร้างแบบจำลองท่อน้ำขนาดต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม Solidworks
3. สร้างตาข่ายข้อมูลสำหรับคำนวณในโปรแกรม โดยใช้โปรแกรม Gambit
4. คำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนโดยใช้โปรแกรม Fluent
5. รวบรวมผลการคำนวณและคุณลักษณะการไหล การกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิ
6. ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent กับผลการทดลอง
7. หาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
8. วิเคราะห์ผลกระทบจากลักษณะการไหล การกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต
9. สรุปผลการดำเนินงานโครงการวิจัยและจัดทำรายงาน

ขั้นตอนและวิธีการคำนวณ

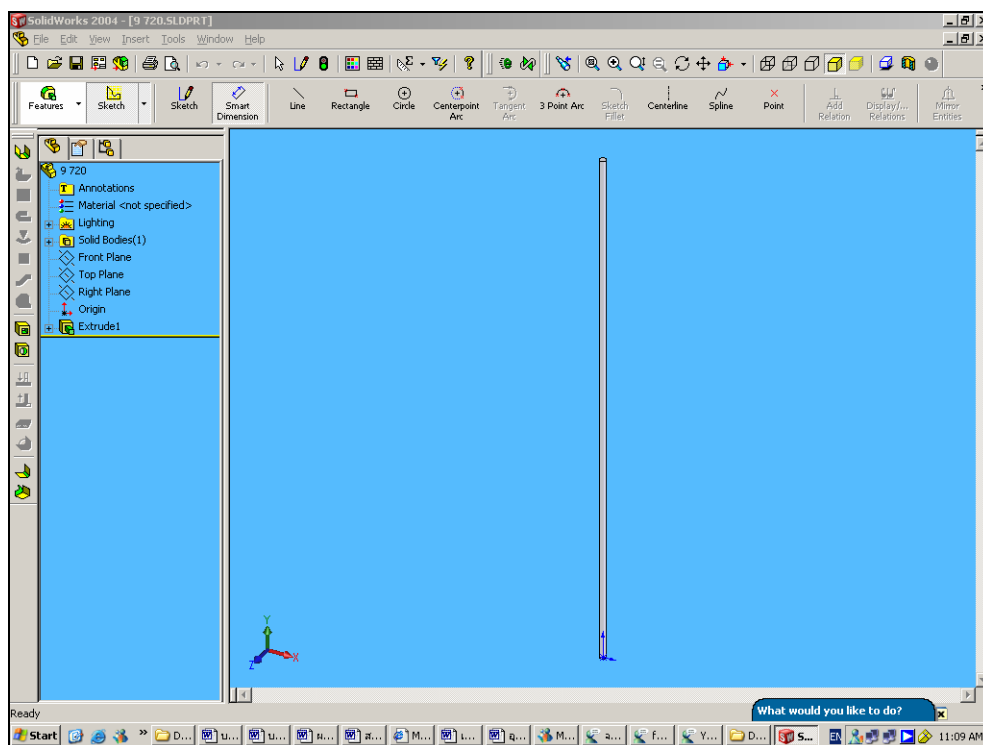
การคำนวณเพื่อหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดไมโครนั้นจะใช้โปรแกรม Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) มาใช้ในการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต จากการตรวจสอบเอกสารการทดลองหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อแนวดิ่งขนาดเล็กนั้นจะมีผลการทดลองอยู่ในช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1- 25 มิลลิเมตร ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตโดยใช้โปรแกรม Fluent แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง จากนั้นก็จะใช้โปรแกรม Fluent ในการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตสำหรับขนาดของท่อที่เล็กลงไปจนกระทั่งโปรแกรมไม่สามารถหาค่าได้โดยจะมีขั้นตอนและวิธีการดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองท่อน้ำขนาดต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม Solidworks

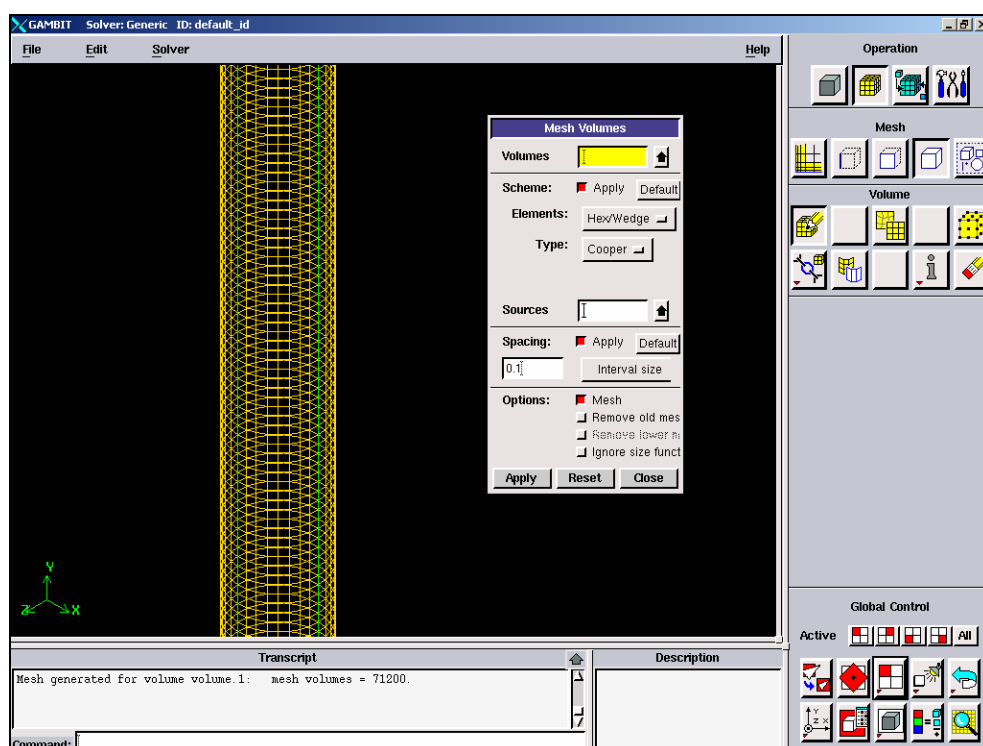
โปรแกรม Solidworks เป็นโปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อเตรียมที่จะคำนวณในโปรแกรม Fluent ซึ่งความสามารถของโปรแกรม Solidworks นี้ สามารถสร้างแบบจำลองขนาดเล็กสุดได้ที่ 0.0002 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงสร้างท่อแนวดิ่งที่มีช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.0002-40 มิลลิเมตร โดยให้อัตราส่วนระหว่างความยาวของท่อกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 80 เพื่อที่จะทำให้ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตไม่ขึ้นกับความยาวของท่อ ยกตัวอย่างท่อในภาพที่ 9 เป็นท่อในแนวดิ่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร มีความยาวของท่อเท่ากับ 80 มิลลิเมตร

2. สร้างตาข่ายข้อมูลสำหรับคำนวณในโปรแกรม Fluent โดยใช้โปรแกรม Gambit

โปรแกรม Gambit เป็นโปรแกรมสำหรับสร้างตาข่ายข้อมูลสำหรับคำนวณในโปรแกรม fluent โดยจะมีการส่งผ่านแบบจำลองของท่อที่ถูกสร้างในโปรแกรม Solidworks เพื่อนำมาสร้างตาข่ายข้อมูล ดังภาพที่ 10 เป็นภาพแสดงสร้างตาข่ายข้อมูลสำหรับคำนวณในโปรแกรม Fluent โดยใช้โปรแกรม Gambit ของท่อขนาดผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร โดยใช้ตาข่ายแบบ Hex/Wedge ขนาดตาข่าย 0.1มิลลิเมตร



ภาพที่ 9 แสดงแบบจำลองของท่อโดยใช้โปรแกรม Solidworks



ภาพที่ 10 แสดงตาข่ายข้อมูลสำหรับคำนวณในโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Gambit

3. คำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนโดยใช้โปรแกรม Fluent

โปรแกรม Fluent เป็นโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งสามารถที่จะคู่ลักษณะการไหล การกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลได้ นอกจากนี้ยังสามารถที่จะคำนวณฟลักซ์ความร้อนของของไหลในท่อขนาดไมโครได้อีกด้วยซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้คือ

3.1 นำแบบจำลองที่ได้ทำการสร้างตาข่ายข้อมูลสำหรับคำนวณในโปรแกรม Fluent โดยใช้โปรแกรม Gambit เข้ามาในโปรแกรม Fluent

3.2 กำหนดค่าต่างในโปรแกรม Fluent ในการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent เพื่อหาฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำสำหรับการไหลในท่อขนาดทรานซิชั่นนาโน ขนาดทรานซิชั่นไมโคร ขนาดไมโคร ขนาดมินิและขนาดเล็กนั้นมีการกำหนด Model ที่ใช้คำนวณ การกำหนดค่าขอบและกำหนด Solution Control ที่เหมือนกันในทุก ๆ ขนาดท่อ เพื่อที่จะได้นำผลมาเปรียบเทียบกับโดยมีการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

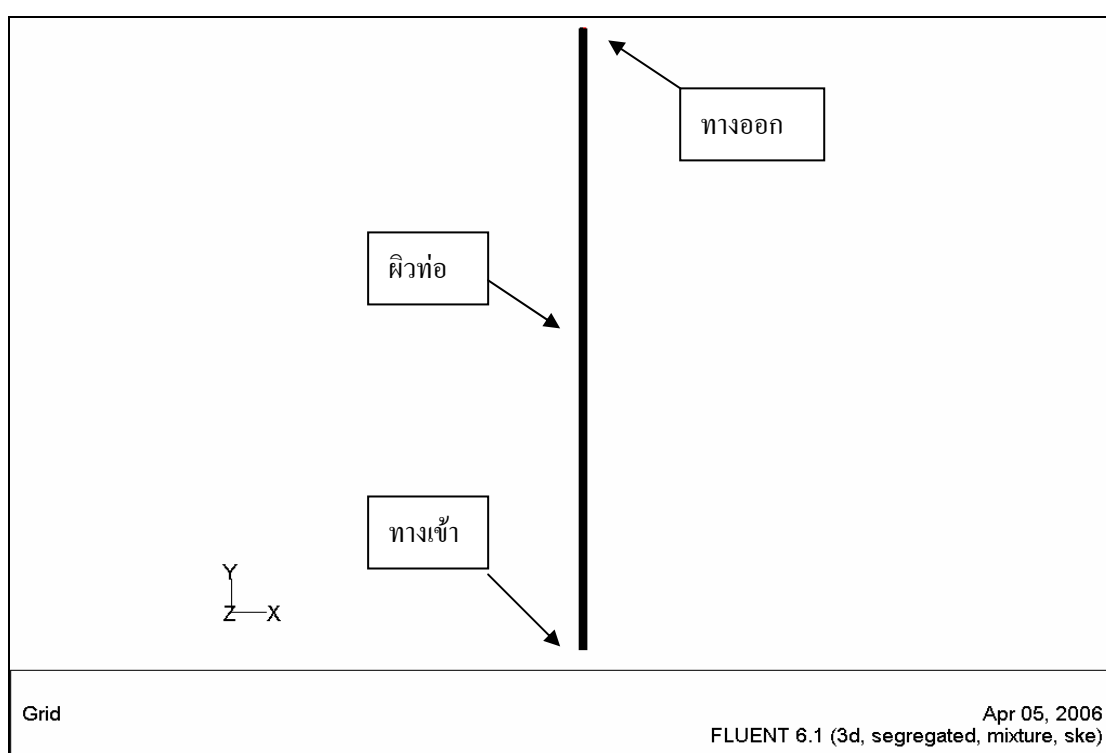
คำนวณโดยใช้	Multiphase Mixture Model Energy Equation Standard $k - \varepsilon$ Model -Non-Equilibrium Wall Functions
กำหนด	เฟสที่ 1 เป็นน้ำที่เป็นของเหลว เฟสที่ 2 เป็นน้ำที่เป็นก๊าซ อุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้าเท่ากับ 372.77 K ซึ่งเป็นอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่ความดัน 100 kPa ความดันของของไหลที่ทางเข้าเท่ากับ 100 kPa

กำหนดค่าขอบโดยในภาพที่ 11 แสดงการกำหนดค่าขอบของแบบจำลองที่จะนำไปคำนวณ โดยมีการกำหนดดังนี้

ที่ทางเข้า Mass Flux เท่ากับ $1000 \text{ kg/m}^2\text{-s}$

อุณหภูมิที่ผิวท่อเท่ากับ 900 K

ที่ทางออกเป็น Out Flow



ภาพที่ 11 แสดงการกำหนดค่าขอบของแบบจำลองที่จะนำไปคำนวณ

โดยการกำหนดค่า Mass Flux ที่ทางเข้าให้เท่ากันนั้นนั้หมายถึงการกำหนดความเร็วที่ทางเข้าของน้ำเท่ากันในทุก ๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ จะทำให้ค่าของตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเพียงอย่างเดียว โดยสมการเรย์โนลด์คือ

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (25)$$

$$V = \rho \dot{m} \quad (26)$$

โดยที่

Re	คือ ตัวเลขเรย์โนลด์
ρ	คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
V	คือ ความเร็วของของไหล (m/s)
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
μ	คือ ค่าความหนืด (kg/m-s)
$\dot{m}$	คือ Mass Flux ($\text{kg/m}^2\text{-s}$)

ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) นี้ จะเป็นตัวกำหนดรูปแบบการไหลของของไหลว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือการไหลแบบปั่นป่วน สำหรับการไหลในท่อนั้นจะกำหนดให้รูปแบบการไหลแบบราบเรียบตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) จะต้องน้อยกว่า 2100 และรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) จะต้องมากกว่า 2100 โดยจะสรุปรูปแบบการไหลในท่อสำหรับขนาดของท่อต่างไว้ในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงรูปแบบการไหลสำหรับขนาดของท่อต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (มิลลิเมตร)	ชนิดของท่อ (ท่อขนาด)	Mass Flux ($\text{kg/m}^2\text{-s}$)	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์	รูปแบบของการไหล
0.0002	ทรานซิชั่นนาโน	1000	0.7082	ราบเรียบ
0.0005	ทรานซิชั่นนาโน	1000	1.77	ราบเรียบ
0.001	ทรานซิชั่นนาโน	1000	3.54	ราบเรียบ
0.005	ทรานซิชั่นไมโคร	1000	17.7	ราบเรียบ
0.01	ทรานซิชั่นไมโคร	1000	35	ราบเรียบ
0.025	ไมโคร	1000	89	ราบเรียบ

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ (มิลลิเมตร)	ชนิดของท่อ (ท่อขนาด)	Mass Flux (kg/m ² -s)	ค่าตัวเลข เรย์โนลด์	รูปแบบของ การไหล
0.05	ไมโคร	1000	177	ราบเรียบ
0.075	ไมโคร	1000	266	ราบเรียบ
0.1	ไมโคร	1000	354	ราบเรียบ
0.5	มินิ	1000	1,770	ราบเรียบ
1	มินิ	1000	3,541	ปั่นป่วน
2	มินิ	1000	7,082	ปั่นป่วน
3	มินิ	1000	10,622	ปั่นป่วน
4	เล็ก	1000	14,163	ปั่นป่วน
5	เล็ก	1000	17,704	ปั่นป่วน
6	เล็ก	1000	21,245	ปั่นป่วน
7	เล็ก	1000	24,785	ปั่นป่วน
8	เล็ก	1000	28,326	ปั่นป่วน
9	เล็ก	1000	31,867	ปั่นป่วน
10	เล็ก	1000	35,408	ปั่นป่วน
11	เล็ก	1000	38,949	ปั่นป่วน
12	เล็ก	1000	42,489	ปั่นป่วน
13	เล็ก	1000	46,031	ปั่นป่วน
14	เล็ก	1000	49,571	ปั่นป่วน
15	เล็ก	1000	53,112	ปั่นป่วน
16	เล็ก	1000	56,653	ปั่นป่วน
17	เล็ก	1000	60,194	ปั่นป่วน
20	เล็ก	1000	70,816	ปั่นป่วน
24	เล็ก	1000	84,980	ปั่นป่วน
25	เล็ก	1000	88,520	ปั่นป่วน

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (มิลลิเมตร)	ชนิดของท่อ (ท่อขนาด)	Mass Flux (kg/m ² -s)	ค่าตัวเลข เรย์โนลด์	รูปแบบของ การไหล
28	เล็ก	1000	99,143	ปั่นป่วน
32	เล็ก	1000	113,306	ปั่นป่วน
36	เล็ก	1000	127,469	ปั่นป่วน
40	เล็ก	1000	141,632	ปั่นป่วน

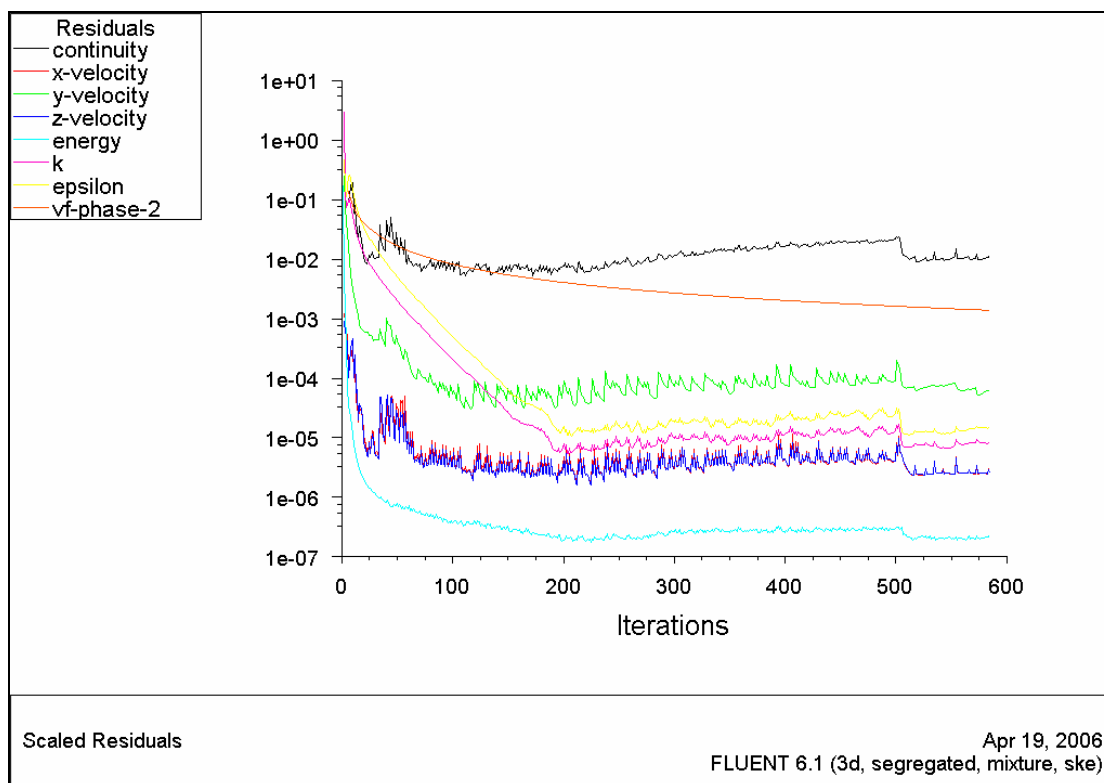
กำหนด Solution Control

Discretization

- Pressure เป็นแบบ Standard
- Pressure-Velocity Coupling เป็นแบบ SIMPLE
- สมการ โมเมนตัม เป็นแบบ First Order Upwind
- Volume Fraction เป็นแบบ First Order Upwind
- สมการ k เป็นแบบ First Order Upwind
- สมการ ε เป็นแบบ First Order Upwind
- สมการพลังงาน เป็นแบบ First Order Upwind

3.3 เริ่มทำการคำนวณในโปรแกรม Fluent

หลังจากได้ทำการกำหนดค่าต่าง ๆ ในโปรแกรม Fluent แล้วก็เริ่มทำการคำนวณโดยตั้งค่าความถูกต้องของทุก ๆ สมการที่ใช้คำนวณไว้ที่ 1×10^{-6} โดยในภาพที่ 12 แสดงกราฟการลู่เข้าของสมการในการคำนวณสำหรับท่อขนาด 0.005 มิลลิเมตร



ภาพที่ 12 แสดงกราฟการลู่เข้าของสมการในการคำนวณสำหรับท่อขนาด 0.005 มิลลิเมตร

3.4 การเช็ค Grid Independent

การเช็ค Grid Independent คือการตรวจสอบว่าจำนวนของตาข่ายข้อมูลเพียงพอต่อการคำนวณหรือไม่ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่าฟลักซ์ความร้อนเป็นตัวตรวจสอบว่าจำนวนของตาข่ายข้อมูลที่น้อยที่สุดที่ไม่ทำให้ค่าฟลักซ์ความร้อนเปลี่ยนแปลงโดยจะสรุปออกมาเป็นตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ตารางแสดงรูปแบบและขนาดของตาข่ายข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (มิลลิเมตร)	ชนิดของท่อ (ท่อขนาด)	ความยาวของท่อ (มิลลิเมตร)	รูปแบบของตาข่ายข้อมูล	ขนาดของตาข่ายข้อมูล (Spacing)
0.0002	ทราซิชันนาโน	0.016	Hex/Wedge	0.00002
0.0005	ทราซิชันนาโน	0.04	Hex/Wedge	0.00005

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางท่อ (มิลลิเมตร)	ชนิดของท่อ (ท่อขนาด)	ความยาวของ ท่อ (มิลลิเมตร)	รูปแบบของ ตาข่าย ข้อมูล	ขนาดของตา ข่ายข้อมูล (Spacing)
0.001	ทรานซิชั่นนาโน	0.08	Hex/Wedge	0.0001
0.005	ทรานซิชั่นไมโคร	0.4	Hex/Wedge	0.0005
0.01	ทรานซิชั่นไมโคร	0.8	Hex/Wedge	0.001
0.025	ไมโคร	2	Hex/Wedge	0.0025
0.05	ไมโคร	4	Hex/Wedge	0.005
0.075	ไมโคร	6	Hex/Wedge	0.0075
0.1	ไมโคร	8	Hex/Wedge	0.01
0.5	มินิ	40	Hex/Wedge	0.05
1	มินิ	80	Hex/Wedge	0.1
2	มินิ	160	Hex/Wedge	0.2
3	มินิ	240	Hex/Wedge	0.3
4	เล็ก	320	Hex/Wedge	0.4
5	เล็ก	400	Hex/Wedge	0.5
6	เล็ก	480	Hex/Wedge	0.6
7	เล็ก	560	Hex/Wedge	0.7
8	เล็ก	640	Hex/Wedge	0.8
9	เล็ก	720	Hex/Wedge	0.9
10	เล็ก	800	Hex/Wedge	1.0
11	เล็ก	880	Hex/Wedge	1.1
12	เล็ก	960	Hex/Wedge	1.2
13	เล็ก	1,040	Hex/Wedge	1.3
14	เล็ก	1,120	Hex/Wedge	1.4
15	เล็ก	1,200	Hex/Wedge	1.5
16	เล็ก	1,280	Hex/Wedge	1.6

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (มิลลิเมตร)	ชนิดของท่อ (ท่อขนาด)	ความยาวของท่อ (มิลลิเมตร)	รูปแบบของตาข่ายข้อมูล	ขนาดของตาข่ายข้อมูล (Spacing)
17	เล็ก	1,360	Hex/Wedge	1.7
20	เล็ก	1,600	Hex/Wedge	2.0
24	เล็ก	1,920	Hex/Wedge	2.4
25	เล็ก	2,000	Hex/Wedge	2.5
28	เล็ก	2,240	Hex/Wedge	2.8
32	เล็ก	2,560	Hex/Wedge	3.2
36	เล็ก	2,880	Hex/Wedge	3.6
40	เล็ก	3,200	Hex/Wedge	4.0

ขั้นตอนการอ่านผลการคำนวณ

หลังจากคำนวณโดยโปรแกรม Fluent แล้ว จะทำการอ่านผลการคำนวณของโปรแกรมโดยแบ่งวิธีการออกดังนี้

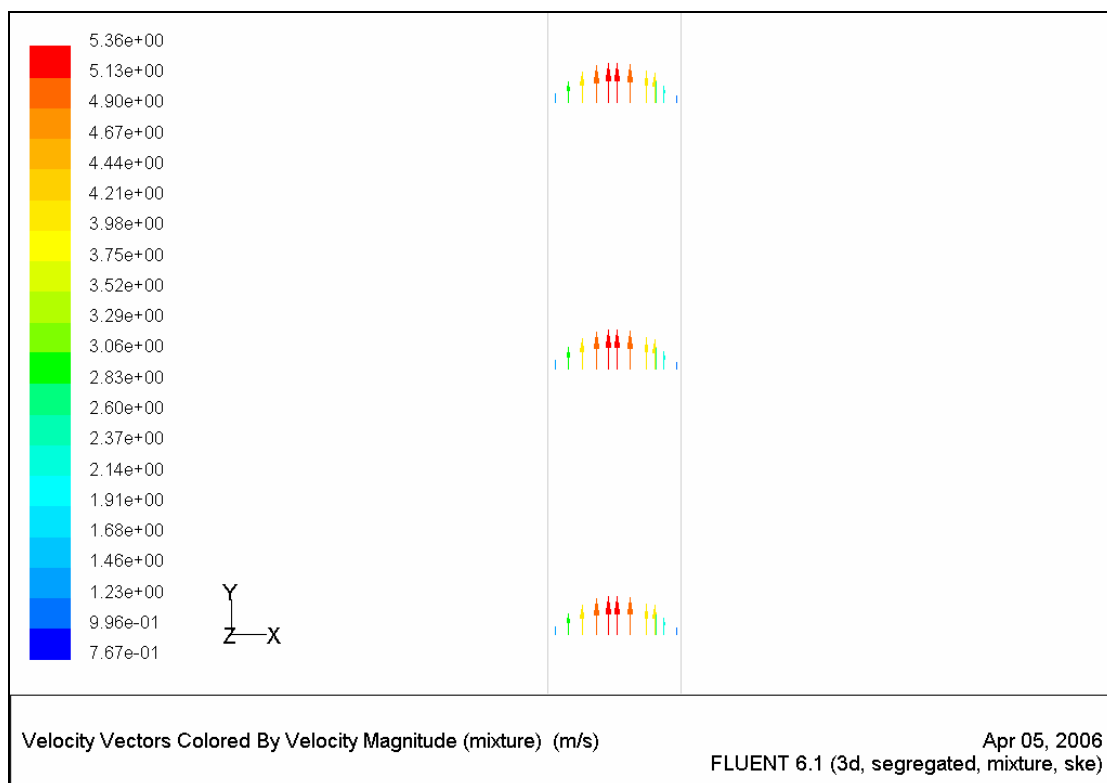
1. คุณลักษณะการไหลของน้ำในท่อโดยดูจากเวกเตอร์ความเร็ว จากโปรแกรม Fluent ดังแสดงในภาพ 12 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างเวกเตอร์ความเร็วของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร วิธีการคือ Display $\Rightarrow$ Vectors $\Rightarrow$ Velocity $\Rightarrow$ เลือกส่วนที่จะดู $\Rightarrow$ แล้วกด Display

2. คุณลักษณะการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในท่อ จากโปรแกรม Fluent ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในท่อ ขนาด 0.0005 มิลลิเมตร วิธีการคือ Display $\Rightarrow$ Contours $\Rightarrow$ Velocity $\Rightarrow$ เลือกส่วนที่จะดู $\Rightarrow$ แล้วกด Display

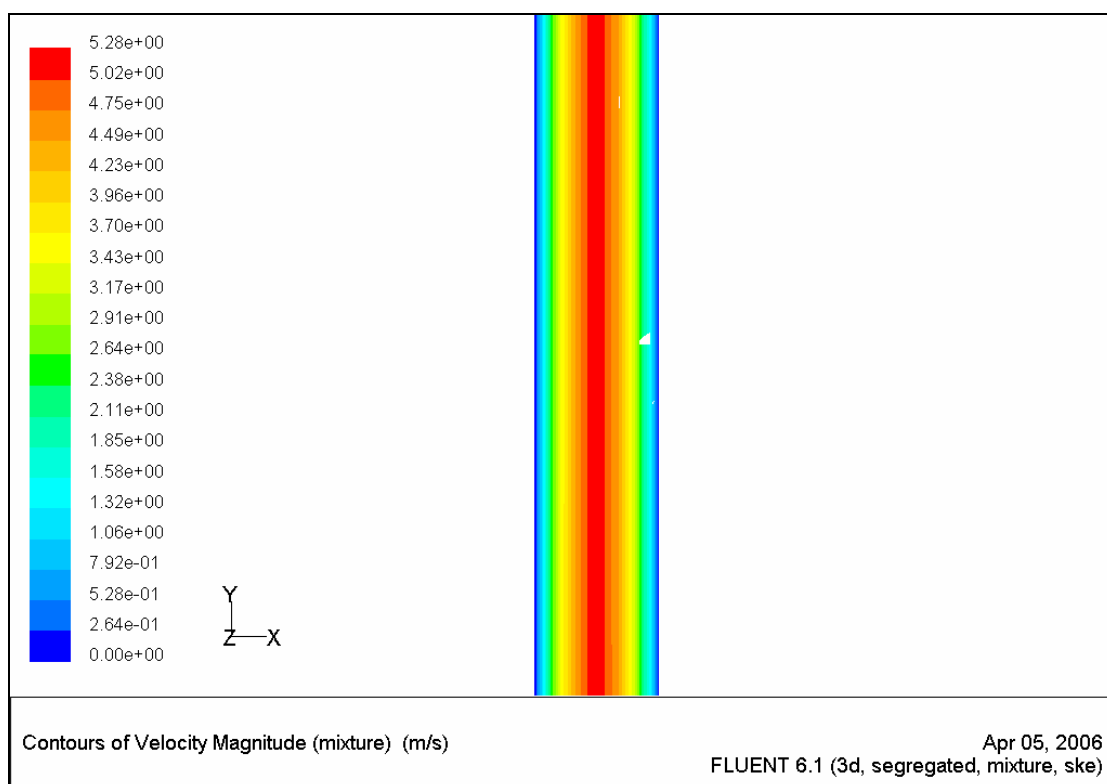
3. สัญลักษณ์การกระจายตัวของความดันของน้ำในท่อ จากโปรแกรม Fluent ดังแสดงในภาพที่ 14 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างการกระจายตัวของความดันของน้ำในท่อ ขนาด 0.0005 มิลลิเมตร วิธีการคือ Display $\Rightarrow$ Contours $\Rightarrow$ Pressure $\Rightarrow$ เลือกส่วนที่จะดู $\Rightarrow$ แล้วกด Display

4. สัญลักษณ์การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในท่อจากโปรแกรม Fluent ดังแสดงในภาพที่ 15 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในท่อ ขนาด 0.0005 มิลลิเมตร วิธีการคือ Display $\Rightarrow$ Contours $\Rightarrow$ Temperature $\Rightarrow$ เลือกส่วนที่จะดู $\Rightarrow$ แล้วกด Display

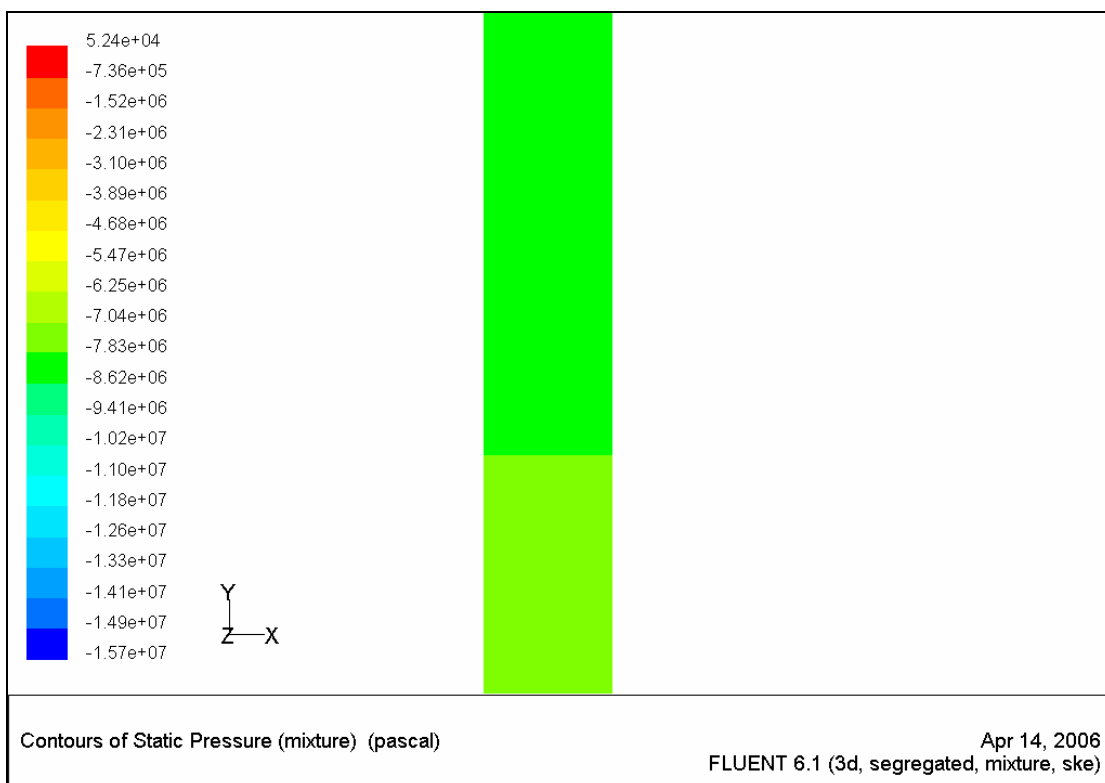
5. ค่าฟลักซ์ความร้อนของน้ำในท่อจากโปรแกรม Fluent ดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างที่แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อของท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร วิธีการคือ Reports $\Rightarrow$ Fluxes $\Rightarrow$ Total Heat Transfer Rate $\Rightarrow$ Wall $\Rightarrow$ แล้วกด Compute ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 0.00082514057 วัตต์ การหาค่าฟลักซ์ความร้อนจะต้องนำค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อหารด้วยพื้นที่ผิว จะได้เป็นฟลักซ์ความร้อนออกมา ยกตัวอย่างคือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อของท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร เท่ากับ 0.00082514057 วัตต์ พื้นที่ผิวท่อเท่ากับ 0.00006283185307 ตารางมิลลิเมตร จะได้ฟลักซ์ความร้อน 13.13252005 วัตต์ต่อตารางมิลลิเมตร หรือเท่ากับ 13132.52 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร



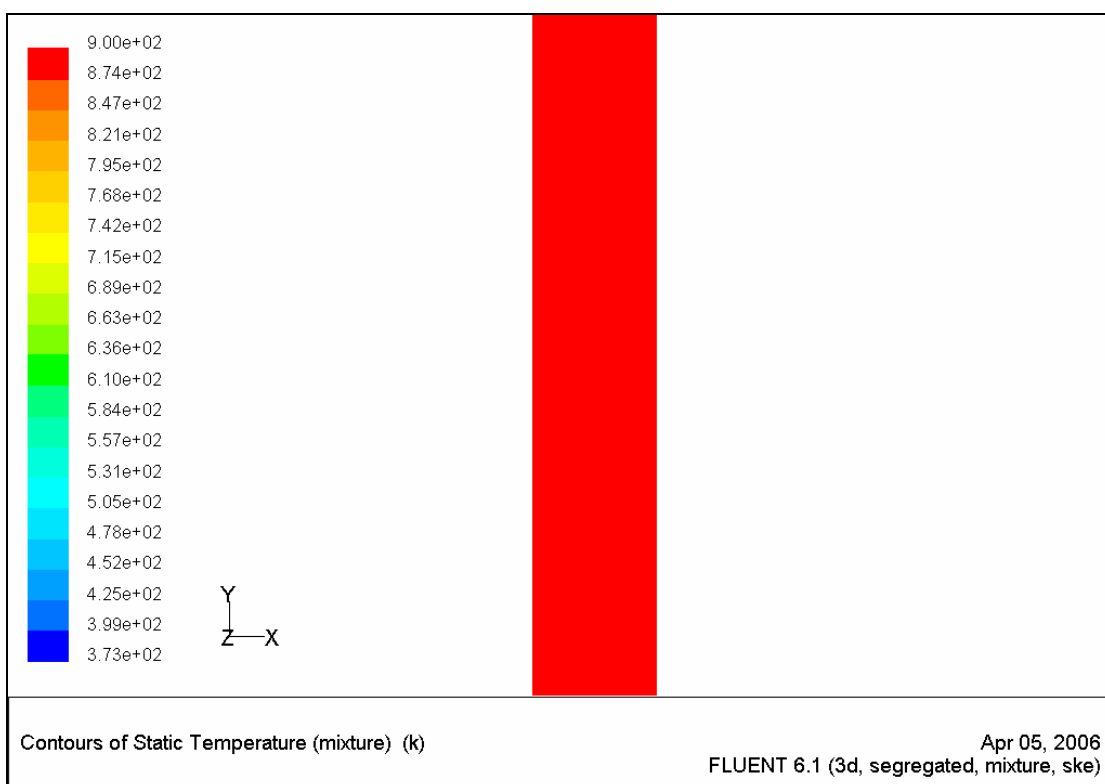
ภาพที่ 13 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



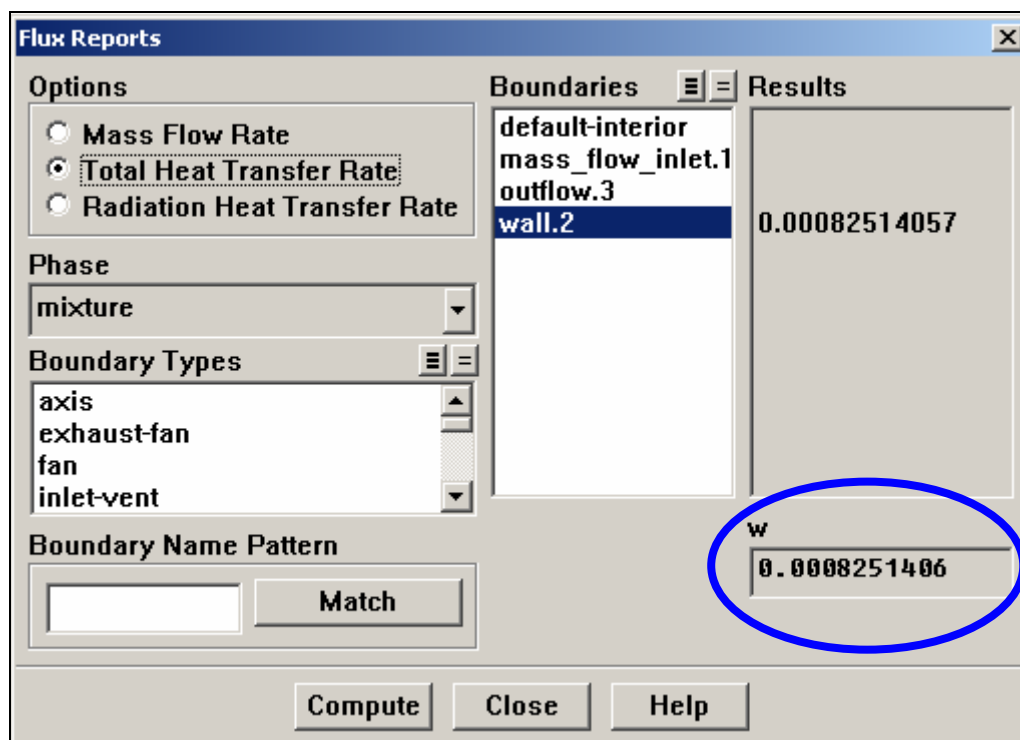
ภาพที่ 14 แสดงการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



ภาพที่ 15 แสดงการกระจายตัวของความดันของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



ภาพที่ 16 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร

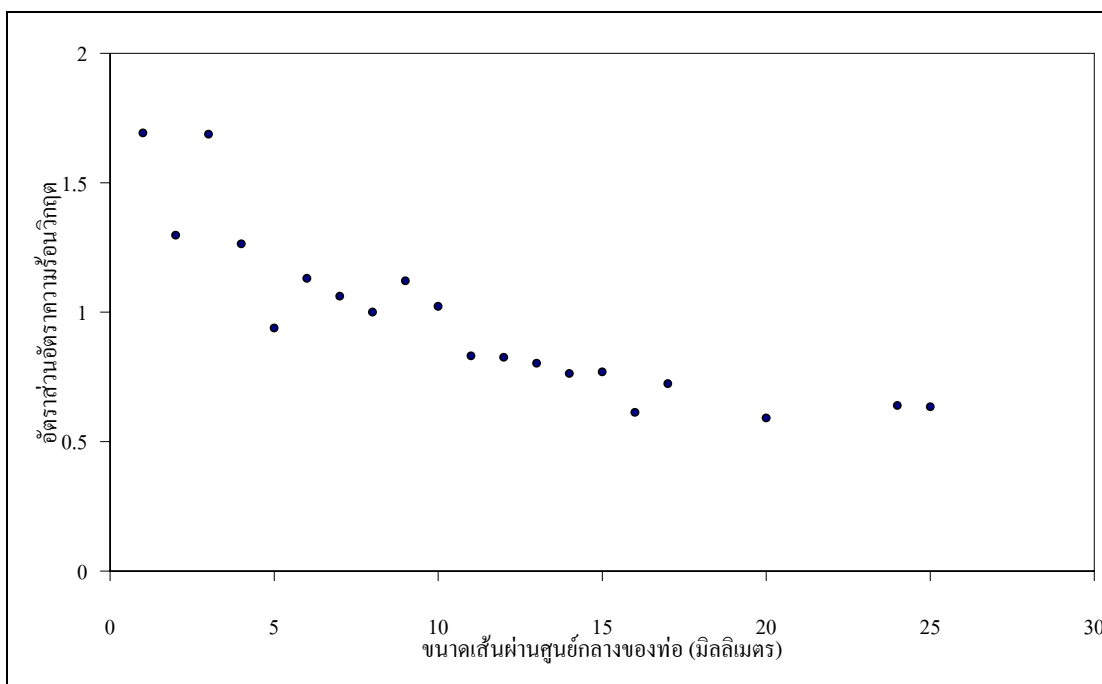


ภาพที่ 17 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อของท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร

ขั้นตอนการเปรียบเทียบผลและหาสมการความสัมพันธ์

1. การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง

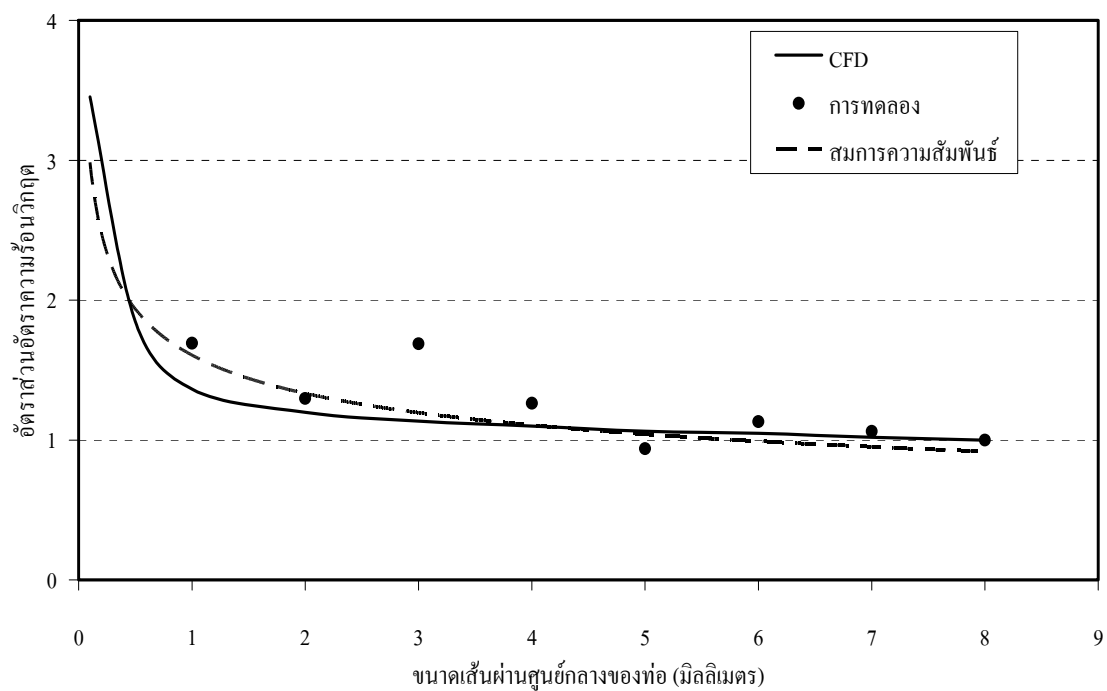
หลังจากหาค่าฟลักซ์ความร้อนของน้ำในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ได้แล้วก็นำผลที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในภาพที่ 17 ซึ่งเป็นภาพแสดงผลการทดลองค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-25 มิลลิเมตร เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณได้จากโปรแกรม Fluent



ภาพที่ 18 แสดงผลการทดลองค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำ

2. การหาสมการความสัมพันธ์

หลังจากตรวจสอบผลการคำนวณกับผลการทดลองให้มีค่าใกล้เคียงกันแล้วก็ทำการคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนของน้ำในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ ที่เล็กลงไป แล้วนำผลที่ได้มาเขียนกราฟโดยใช้โปรแกรม Excel เพื่อที่จะดูความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ความร้อนของน้ำในท่อกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ แล้วแบ่งช่วงเส้นกราฟให้แต่ละช่วงเส้นกราฟมีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกัน หลังจากนั้นก็หาความสัมพันธ์ของเส้นกราฟแต่ละช่วงโดยใช้โปรแกรม Excel หาเส้นแนวโน้ม ดังแสดงในภาพที่ 18 แสดงสมการความสัมพันธ์ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.1-8 มิลลิเมตร



ภาพที่ 19 แสดงสมการความสัมพันธ์ของท่อขนาด 0.1-8 มิลลิเมตร

ผลและการวิเคราะห์ผลการคำนวณ

ผลการคำนวณการกระจายตัวของความดัน ความเร็ว อุณหภูมิ และเวกเตอร์ความเร็ว

จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) นั้นสามารถคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตในท่อขนาดต่างๆได้และสามารถที่จะเห็นลักษณะการไหลของของไหล การกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของความเร็ว และการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ ดังแสดงในภาพ 20-47 แสดงการกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความเร็วและเวกเตอร์ของความเร็วของน้ำในท่อขนาด 0.0005, 0.05, 1, 12 มิลลิเมตร

ผลการคำนวณการกระจายตัวของความดัน

ผลการคำนวณการกระจายตัวของความดันโดยแสดงในภาพที่ 20, 27, 34, 41 เป็นภาพการกระจายตัวของความดันของน้ำ ในท่อขนาด 0.0005, 0.05, 1, 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของความดันของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร มีช่วงการกระจายตัวของความดันที่สูงที่สุด และจะค่อยๆลดช่วงการกระจายตัวของความดันลงมาเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่า ทั้ง 4 ภาพนั้น ความดันที่บริเวณทางเข้าท่อจะมีความดันสูงและค่อยๆลดลงตามความยาวของท่อโดยท่อขนาดเล็กกว่าความดันจะลดลงมากกว่า

ผลการคำนวณการกระจายตัวของความเร็ว

ผลการคำนวณการกระจายตัวของความเร็วโดยแสดงในภาพที่ 22, 29, 36, 43 เป็นภาพการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0005, 0.05, 1, 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรจะมีช่วงของความเร็วมากที่สุดคือ 0-7.8 เมตรต่อวินาที รองลงมาคือท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีช่วงของความเร็ว 0-6.58 เมตรต่อวินาที รองลงมาอีกคือท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0005 มิลลิเมตร มีช่วงของความเร็ว 0-5.28 เมตรต่อวินาที และท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 มิลลิเมตร จะมีช่วงของความเร็วที่น้อยที่สุดคือ 0-3.87 เมตรต่อวินาที ส่วนการกระจายตัวของความเร็วนั้นโดยจะแสดงในภาพ 25, 32, 39, 46 เป็นภาพการกระจายตัวของความเร็วของน้ำที่กลางท่อของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0005,

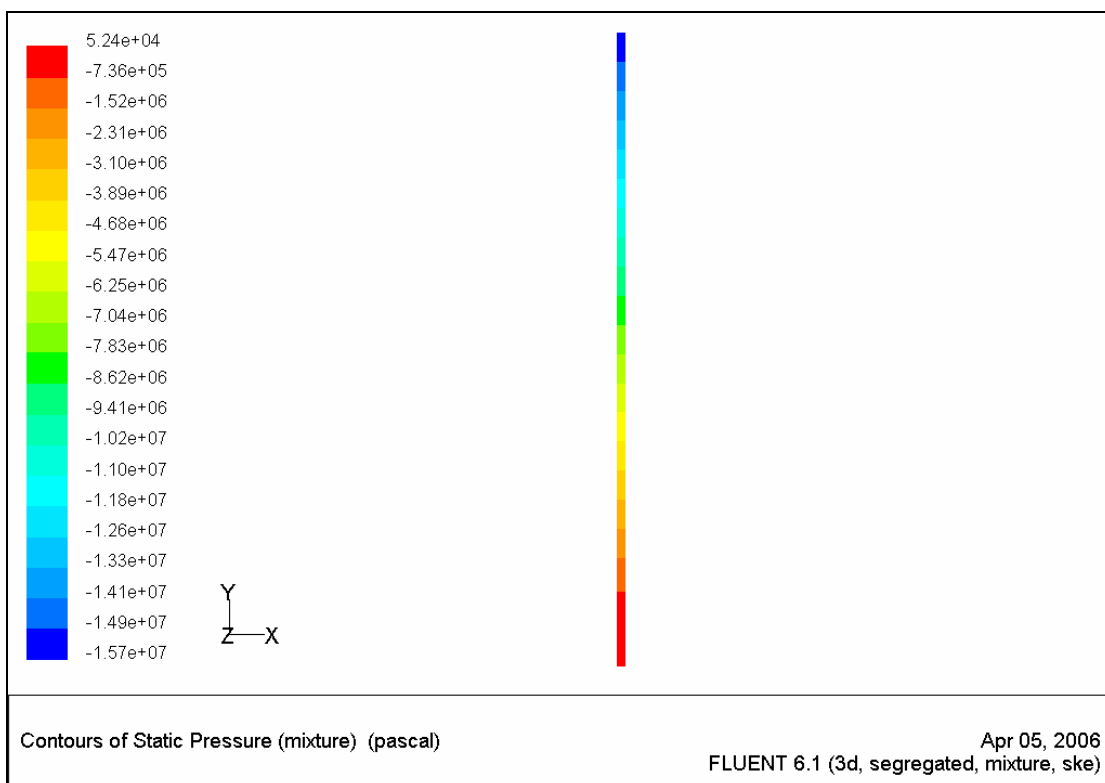
0.05, 1, 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0005 มิลลิเมตรจะมีการกระจายตัวได้มากที่สุด ส่วนท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05, 1 และ 12 มิลลิเมตรนั้น การกระจายตัวของความเร็วใกล้เคียงกัน

ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิ

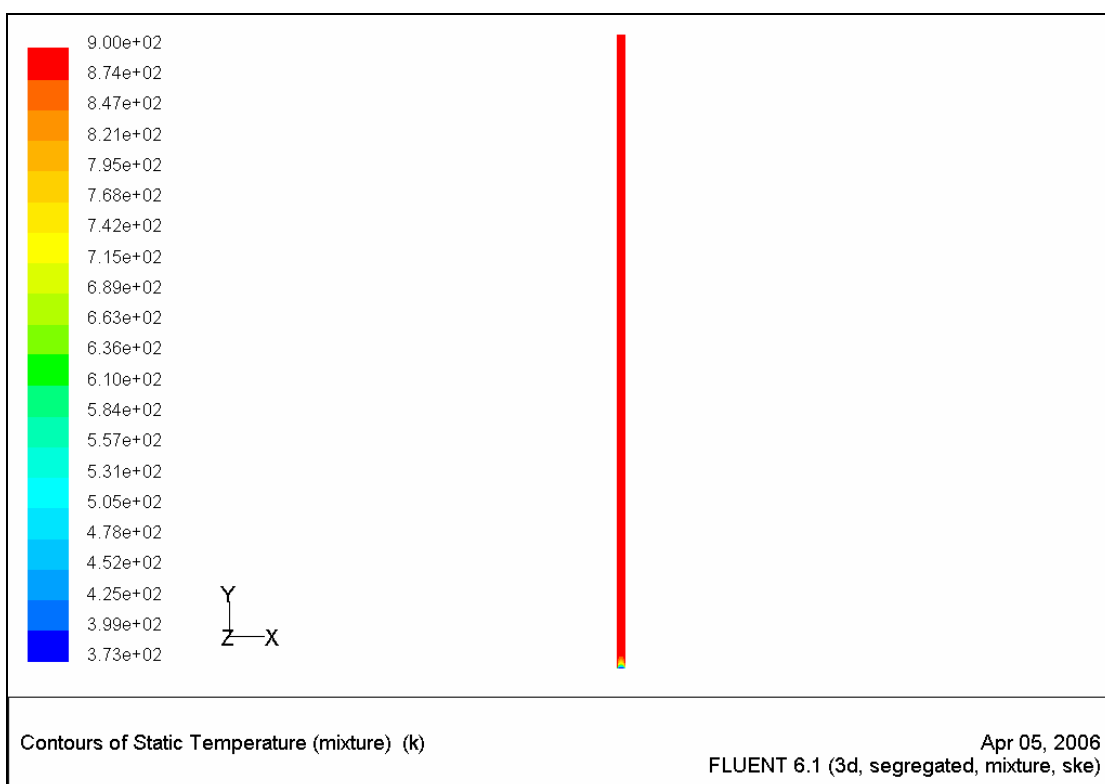
ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยแสดงในภาพที่ 21, 28, 35, 42 เป็นภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0005, 0.05, 1, 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0005 มิลลิเมตรจะมีการกระจายตัวได้มากที่สุด และจะค่อย ๆ ลดการกระจายตัวของอุณหภูมิลงมาเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้น จากภาพที่ 23, 30, 37, 44 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.0005, 0.05, 1, 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระจายตัวของอุณหภูมิที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.0005 และ 0.05 มิลลิเมตร กระจายตัวของอุณหภูมิสามารถกระจายอุณหภูมิได้เท่ากับ อุณหภูมิที่ผิว ส่วนกระจายตัวของอุณหภูมิที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 1 และ 12 มิลลิเมตรนั้นไม่สามารถกระจายอุณหภูมิได้เท่ากับอุณหภูมิที่ผิว จากภาพที่ 24, 31, 38, 45 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางเข้าท่อของน้ำในท่อขนาด 0.0005, 0.05, 1, 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางเข้าท่อของน้ำในท่อจะกระจายตัวเป็นรูปพาราโบลาซึ่งเป็นไปตามลักษณะการไหลของน้ำในท่อ

ผลการคำนวณเวกเตอร์ความเร็ว

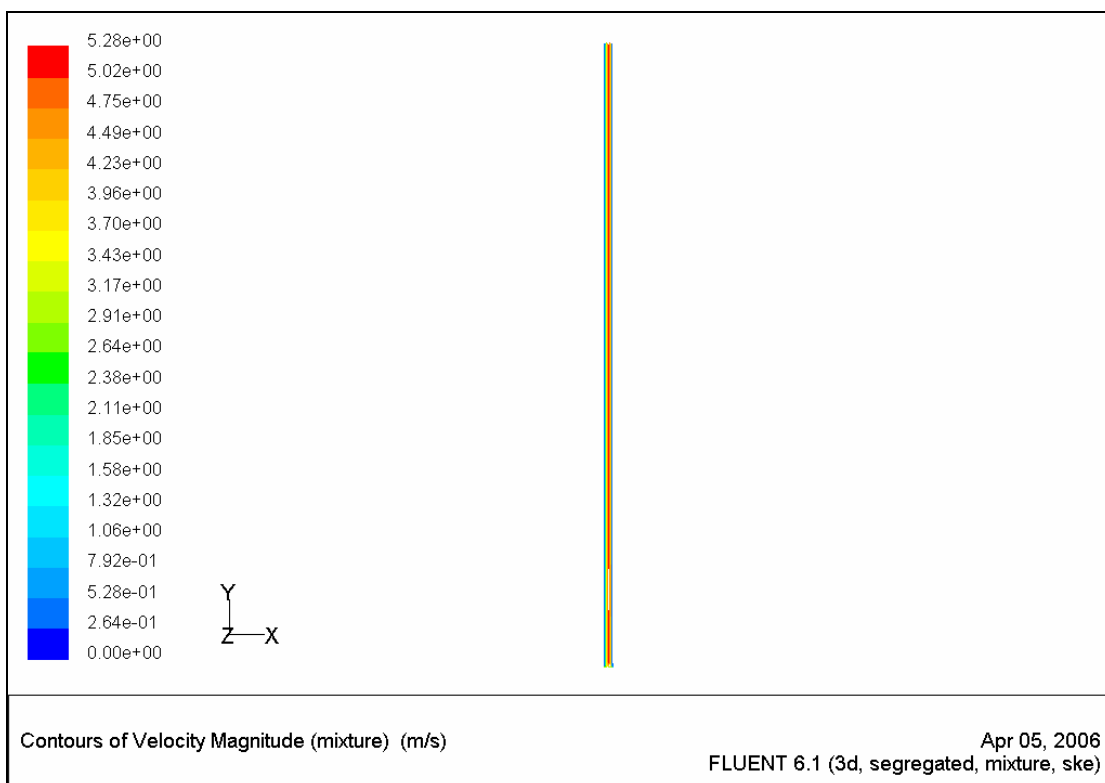
ผลการคำนวณเวกเตอร์ความเร็วของน้ำโดยแสดงในภาพที่ 26, 33, 40, 47 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วกึ่งกลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.0005, 0.05, 1, 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าลักษณะเวกเตอร์ความเร็วของน้ำจะเป็นรูปพาราโบลาซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปสำหรับเวกเตอร์ความเร็วของการไหลของน้ำในท่อ และเมื่อพิจารณาความชันของเวกเตอร์ความเร็วสำหรับท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร จะมีความชันมากที่สุดนั่นคือจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วมากที่สุดนั่นเอง และความชันจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้น



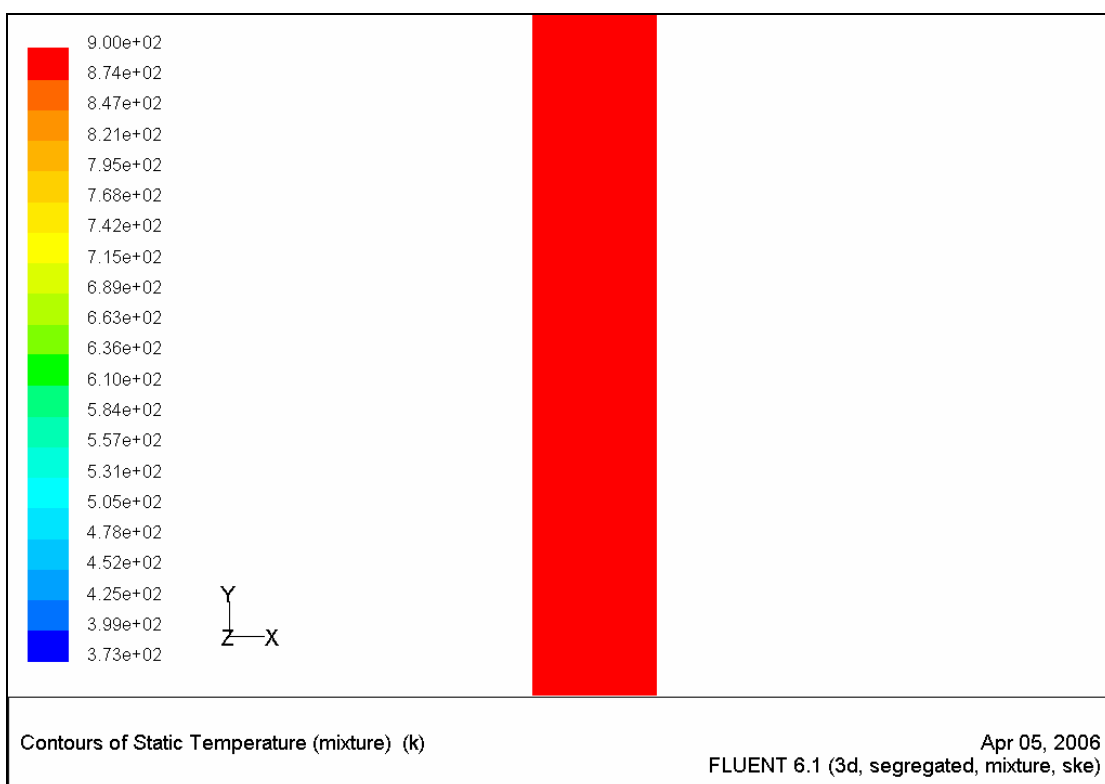
ภาพที่ 20 แสดงการกระจายตัวของความดันของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



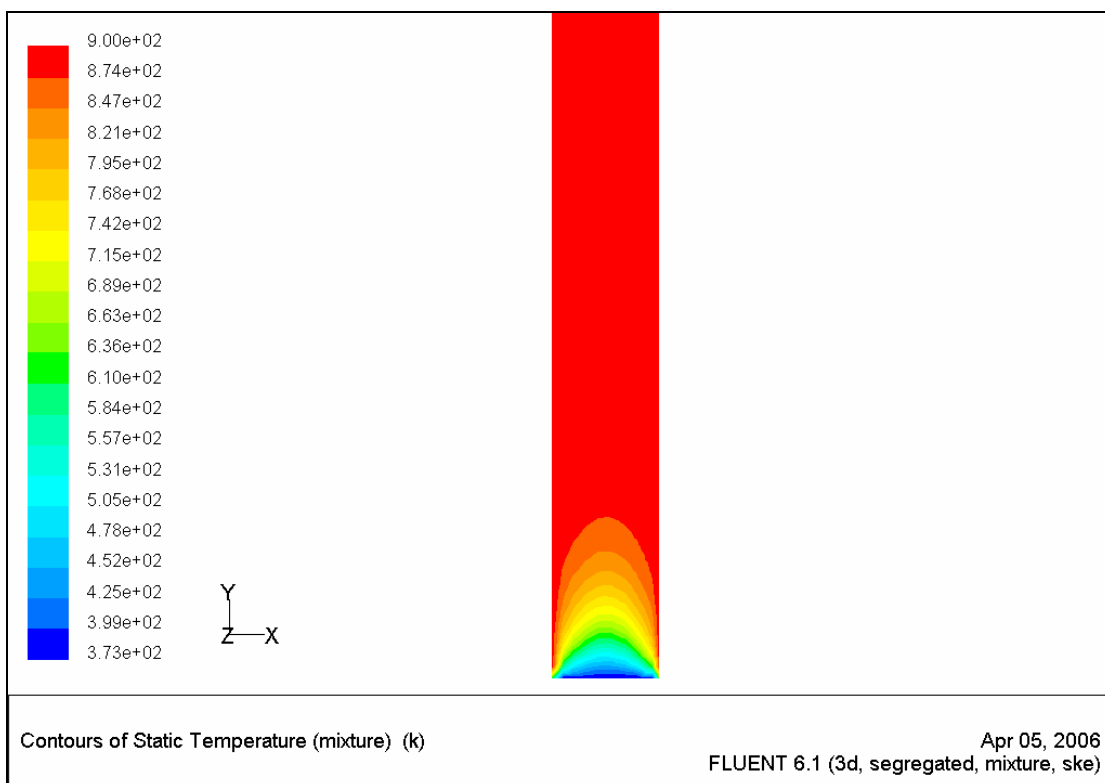
ภาพที่ 21 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



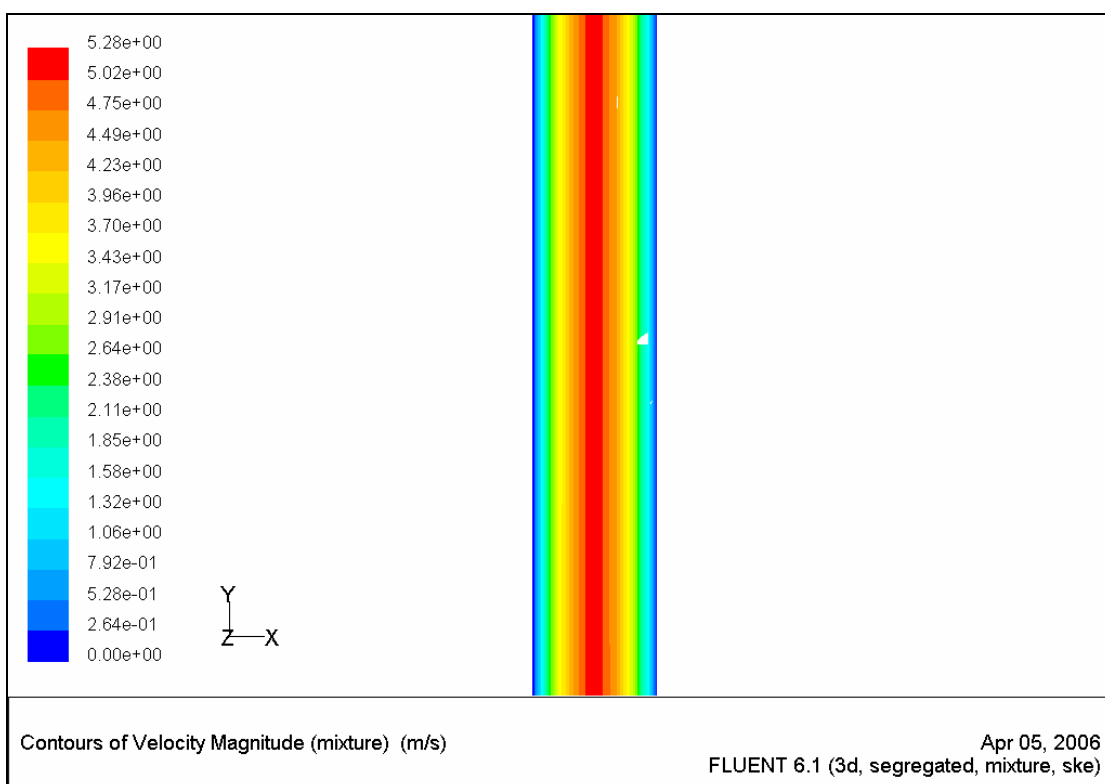
ภาพที่ 22 แสดงการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



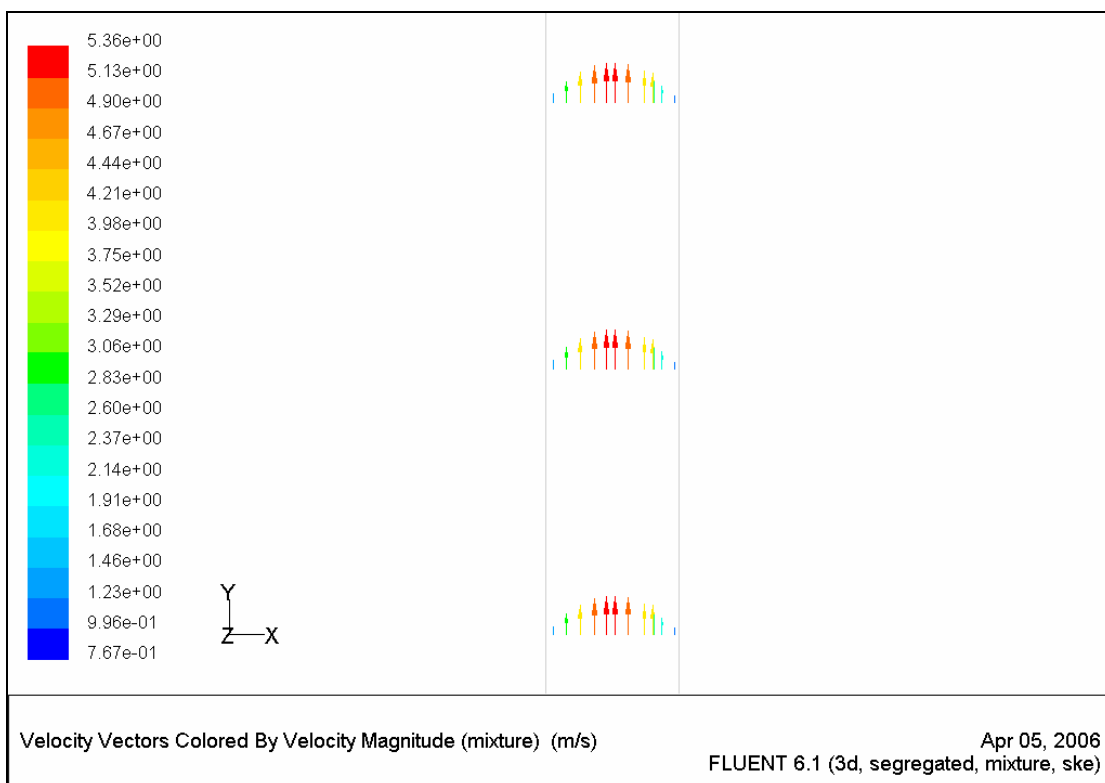
ภาพที่ 23 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



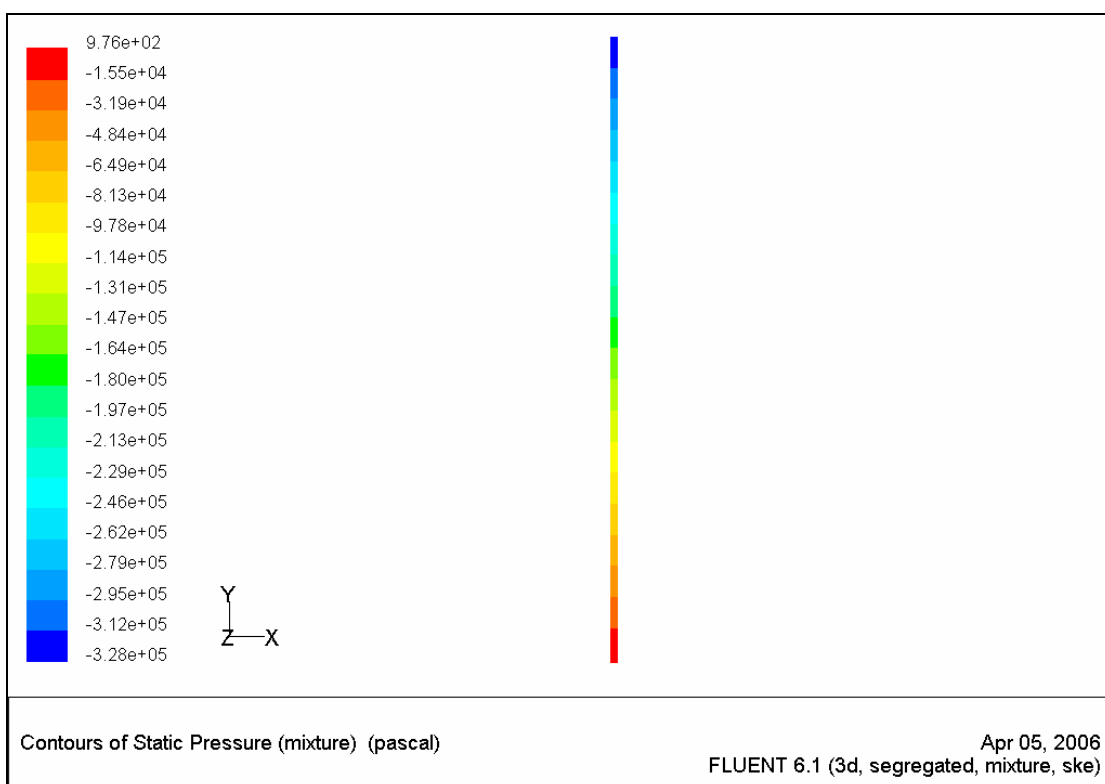
ภาพที่ 24 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางเข้าท่อของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



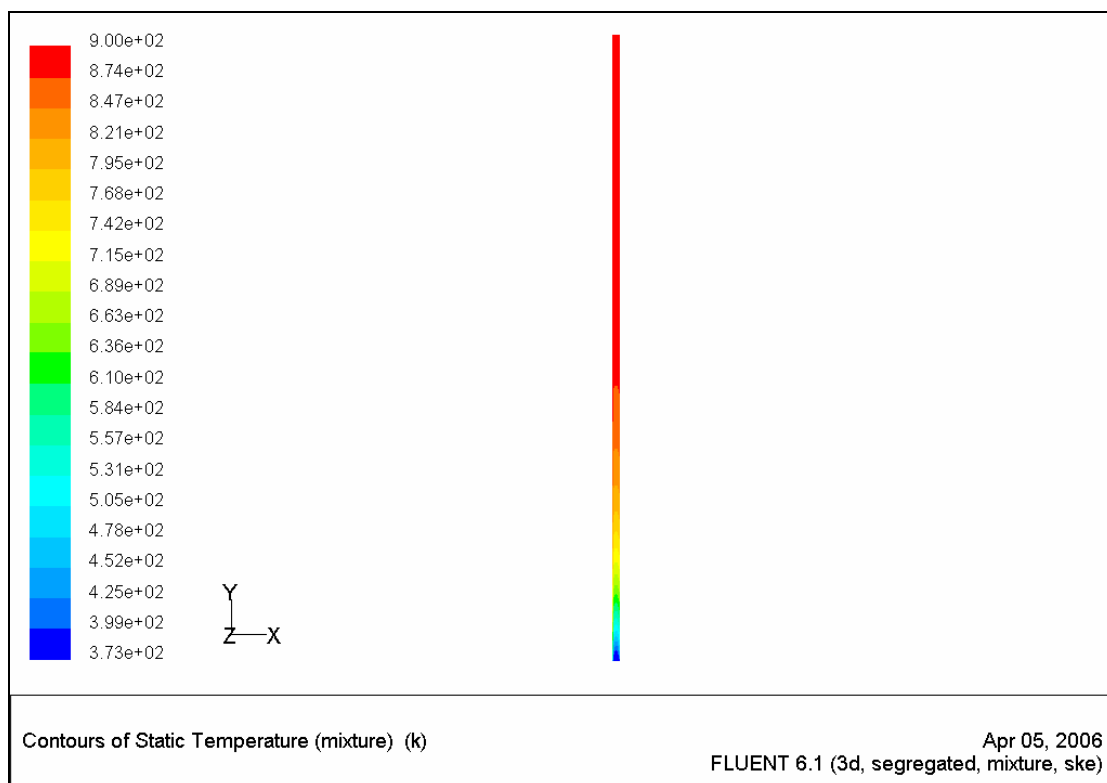
ภาพที่ 25 แสดงการกระจายตัวของความเร็วที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



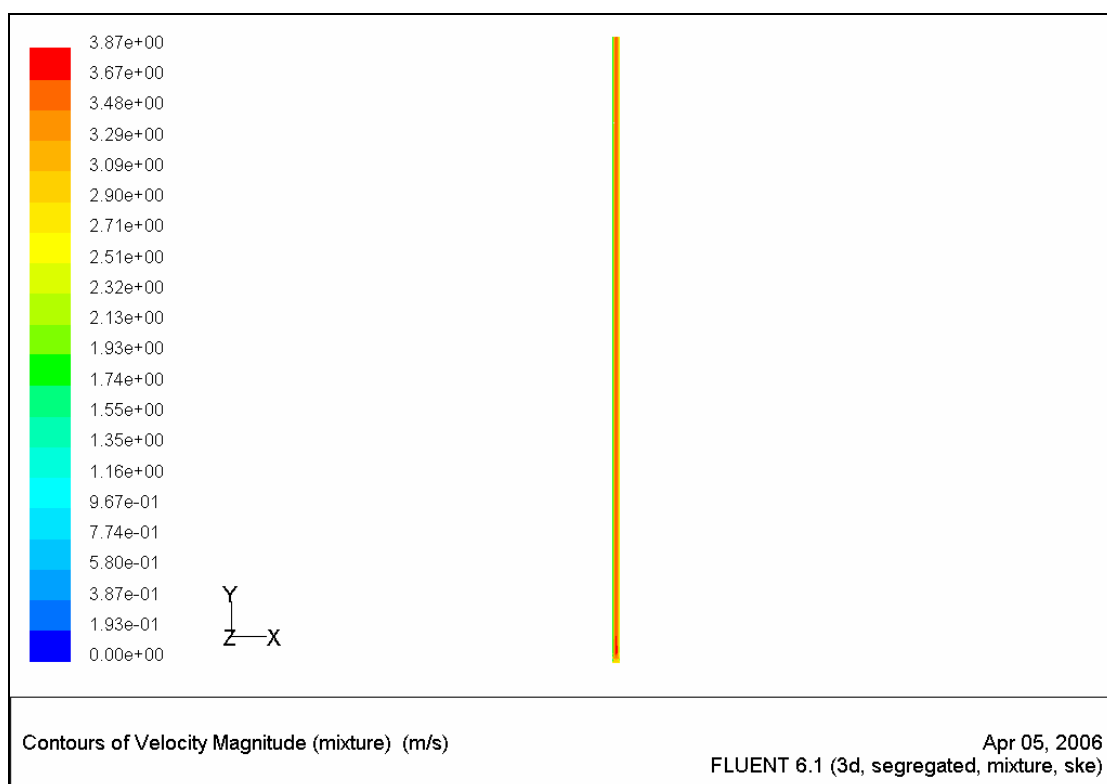
ภาพที่ 26 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.0005 มิลลิเมตร



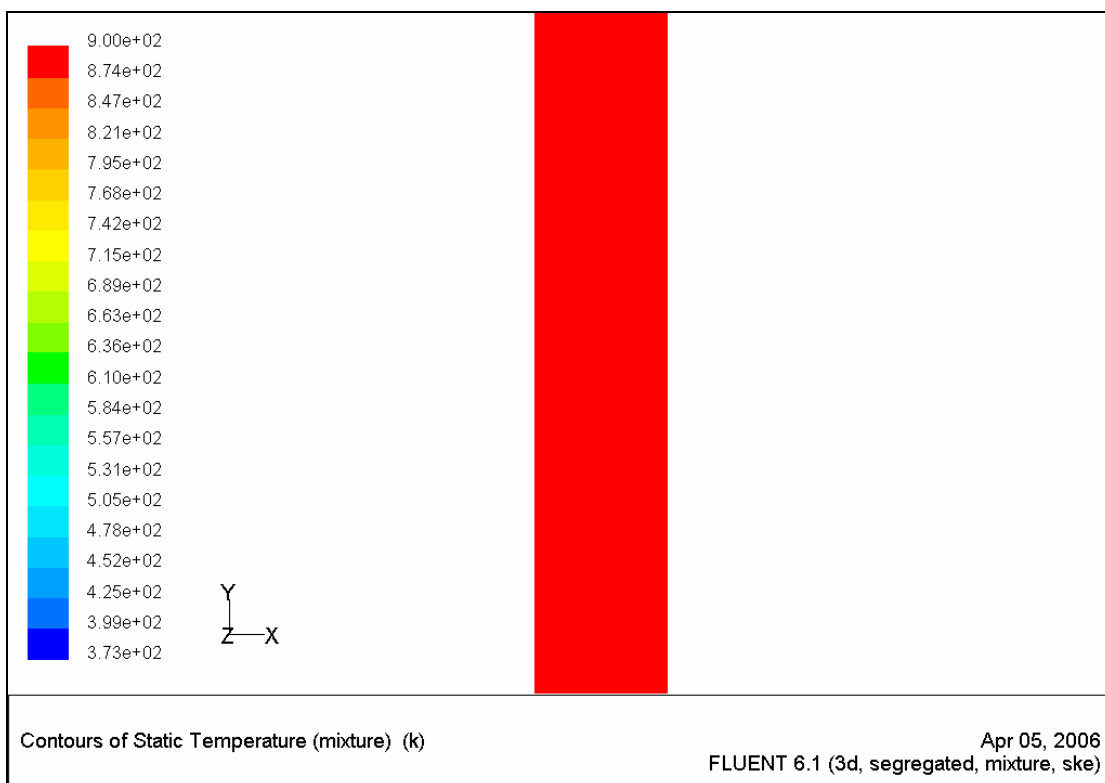
ภาพที่ 27 แสดงการกระจายตัวของความดันของน้ำในท่อขนาด 0.05 มิลลิเมตร



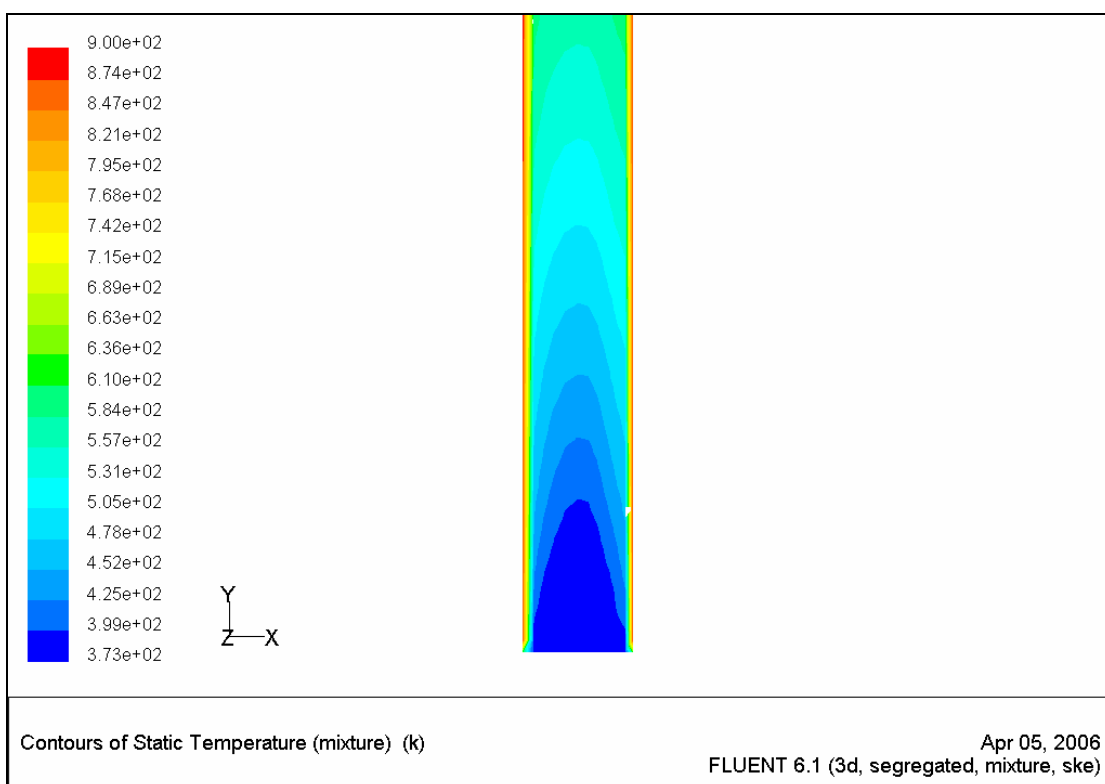
ภาพที่ 28 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในท่อขนาด 0.05 มิลลิเมตร



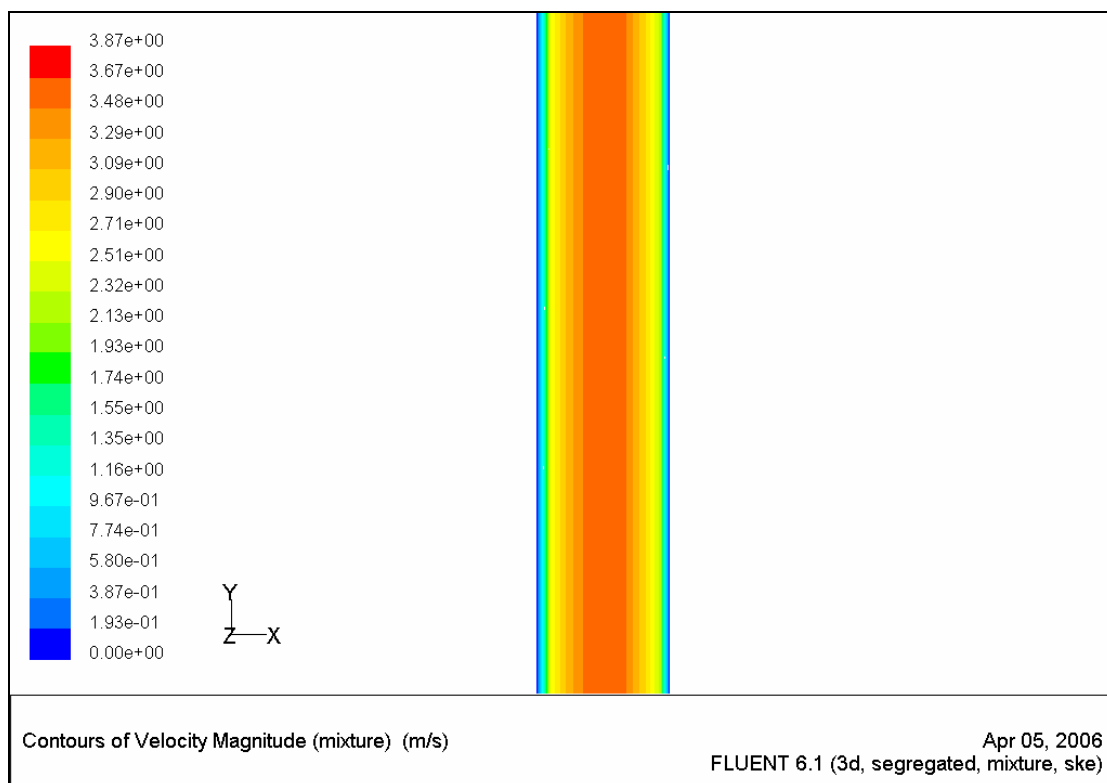
ภาพที่ 29 แสดงการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในท่อขนาด 0.05 มิลลิเมตร



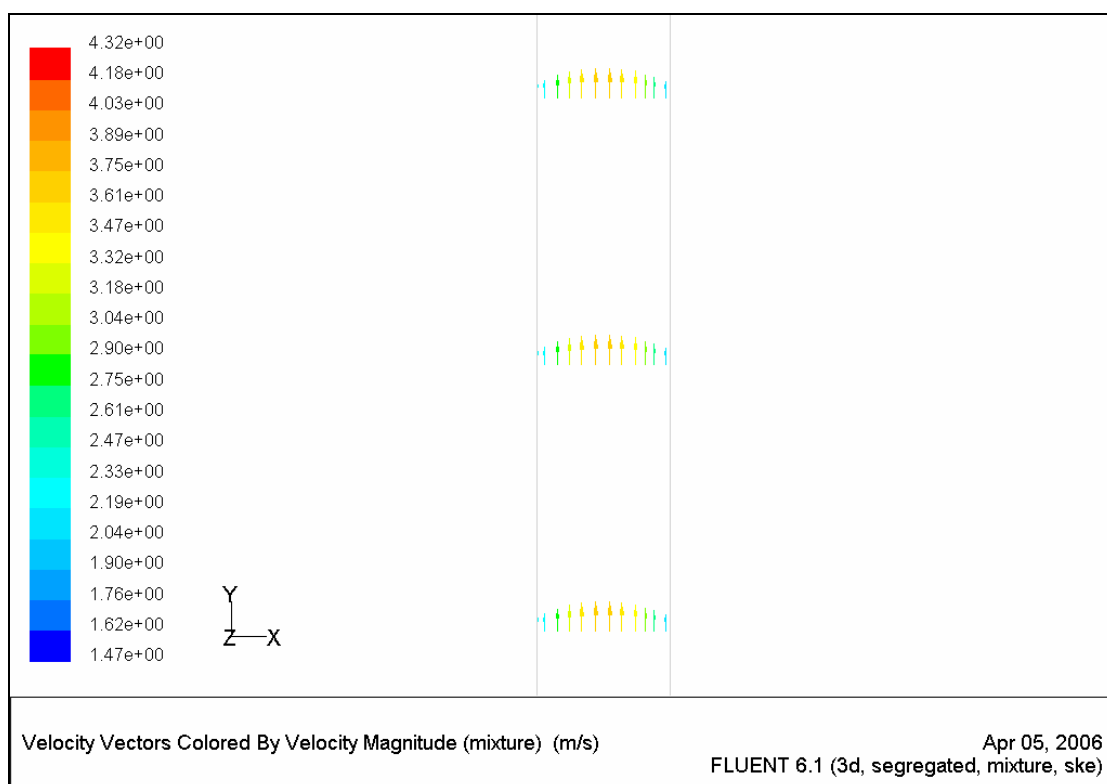
ภาพที่ 30 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.05 มิลลิเมตร



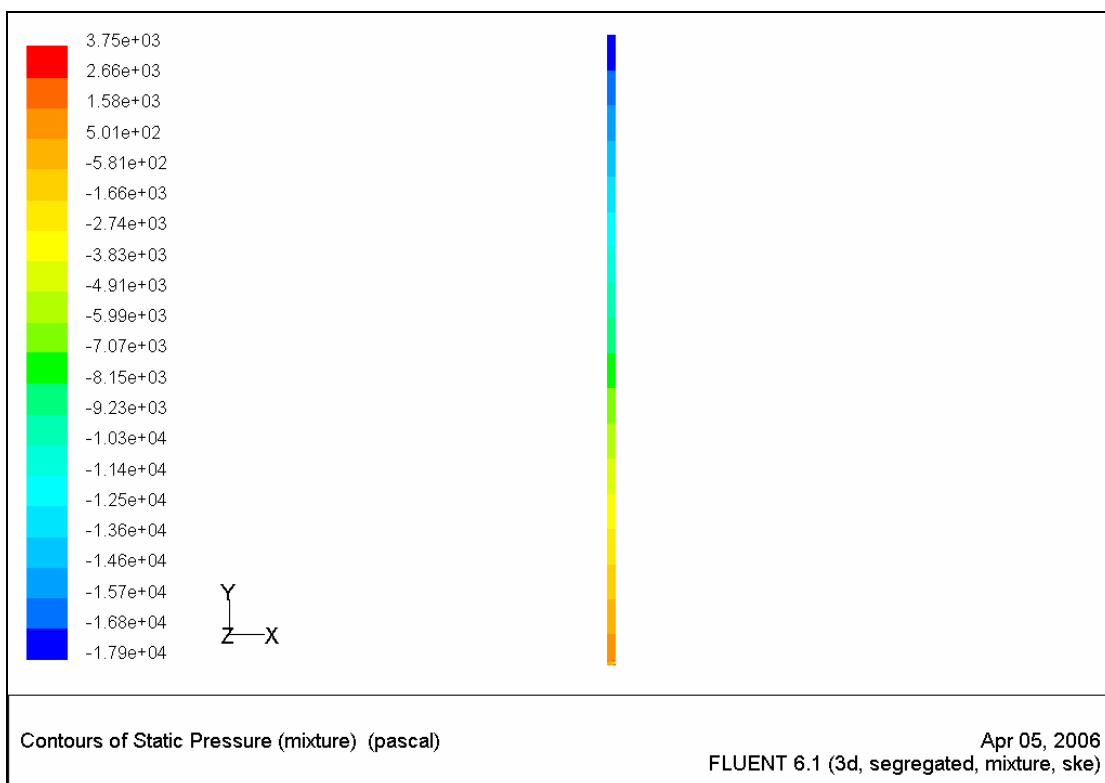
ภาพที่ 31 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางเข้าท่อของน้ำในท่อขนาด 0.05 มิลลิเมตร



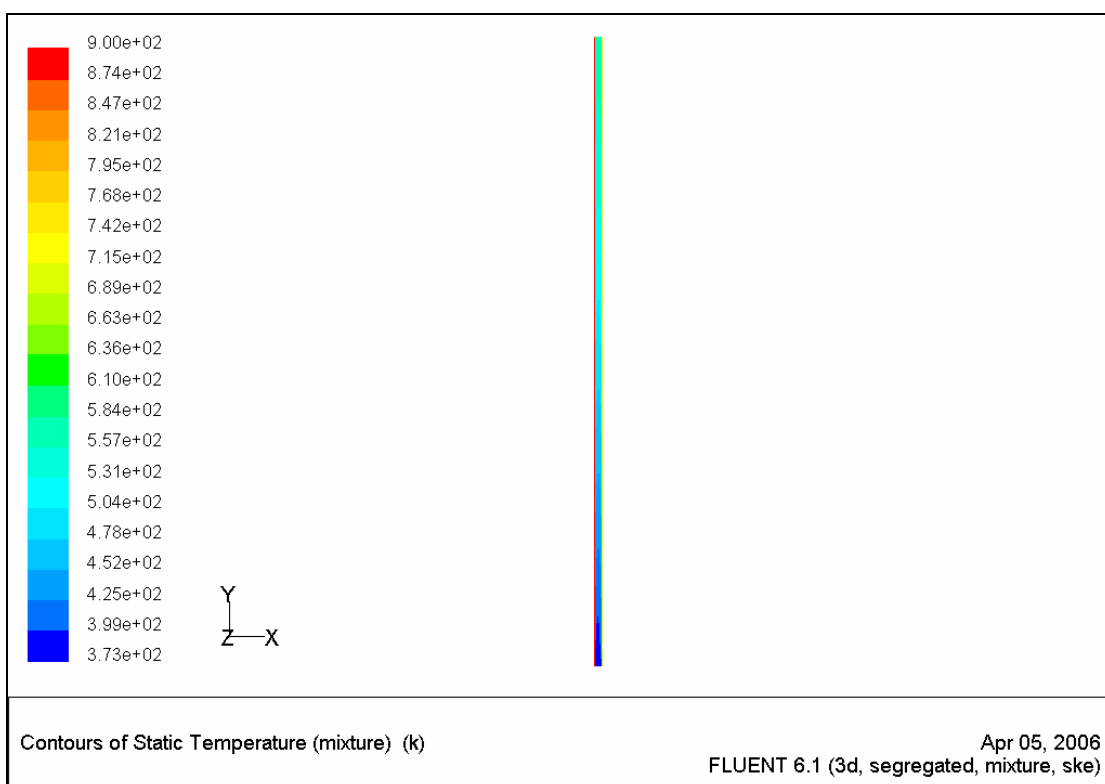
ภาพที่ 32 แสดงการกระจายตัวของความเร็วที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.05 มิลลิเมตร



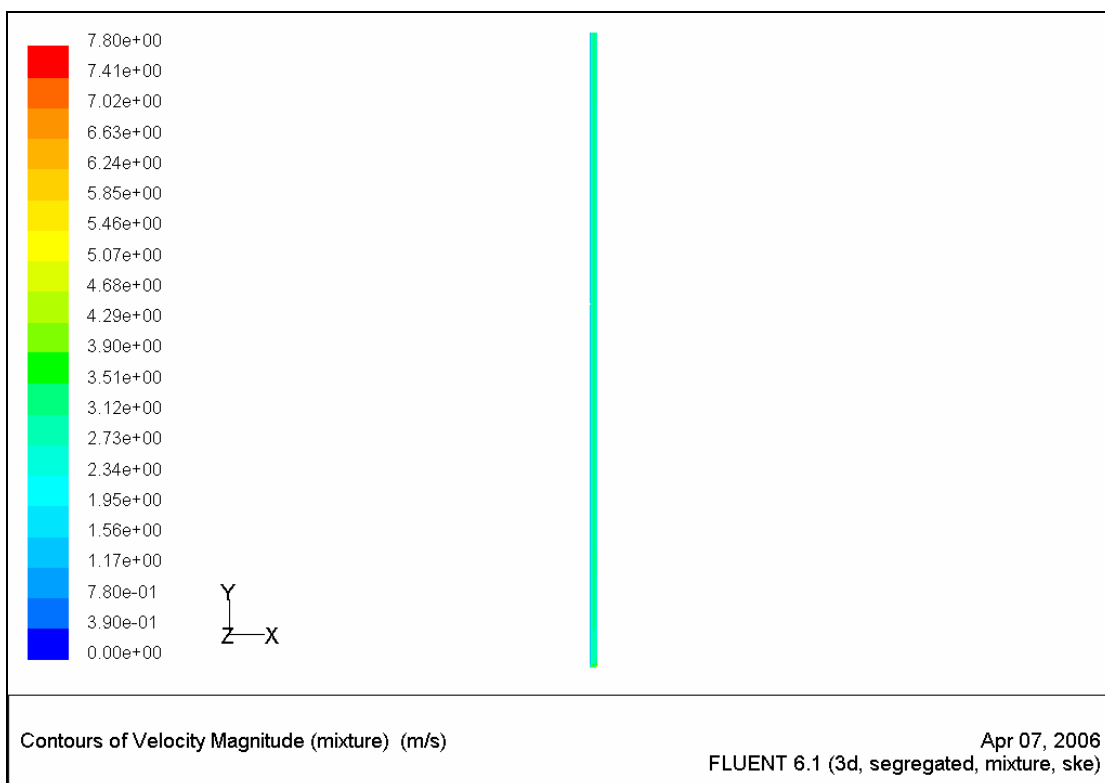
ภาพที่ 33 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 0.05 มิลลิเมตร



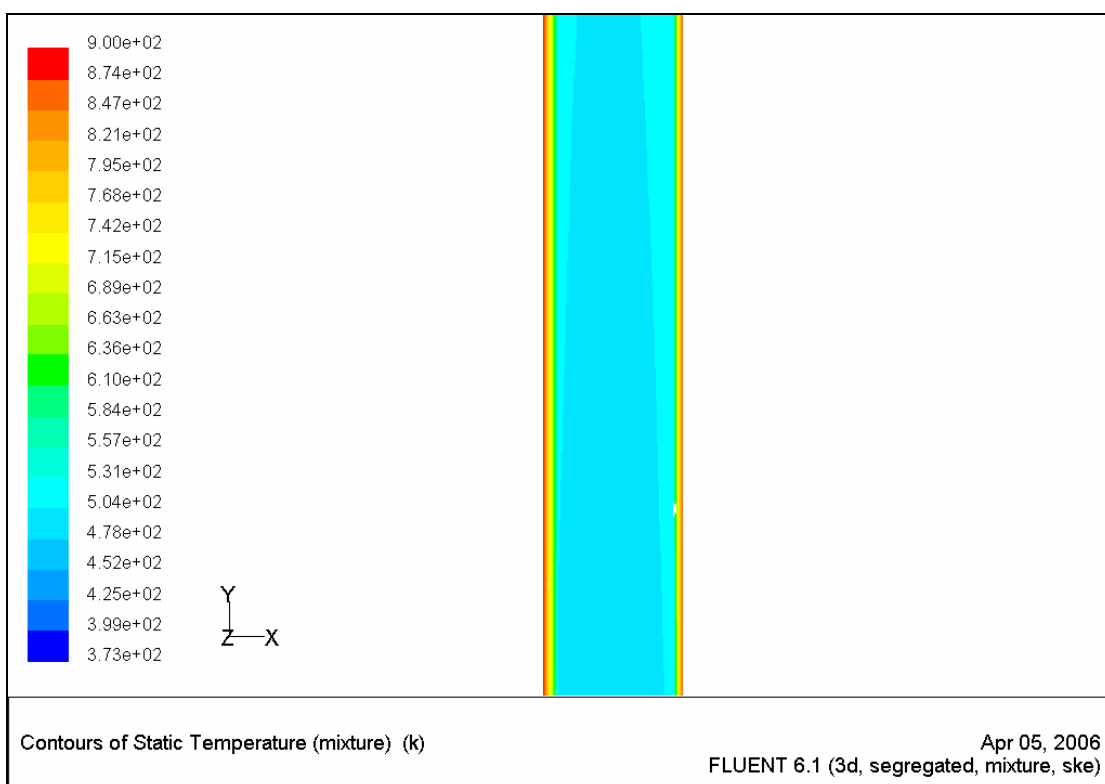
ภาพที่ 34 แสดงการกระจายตัวของความดันของน้ำในท่อขนาด 1 มิลลิเมตร



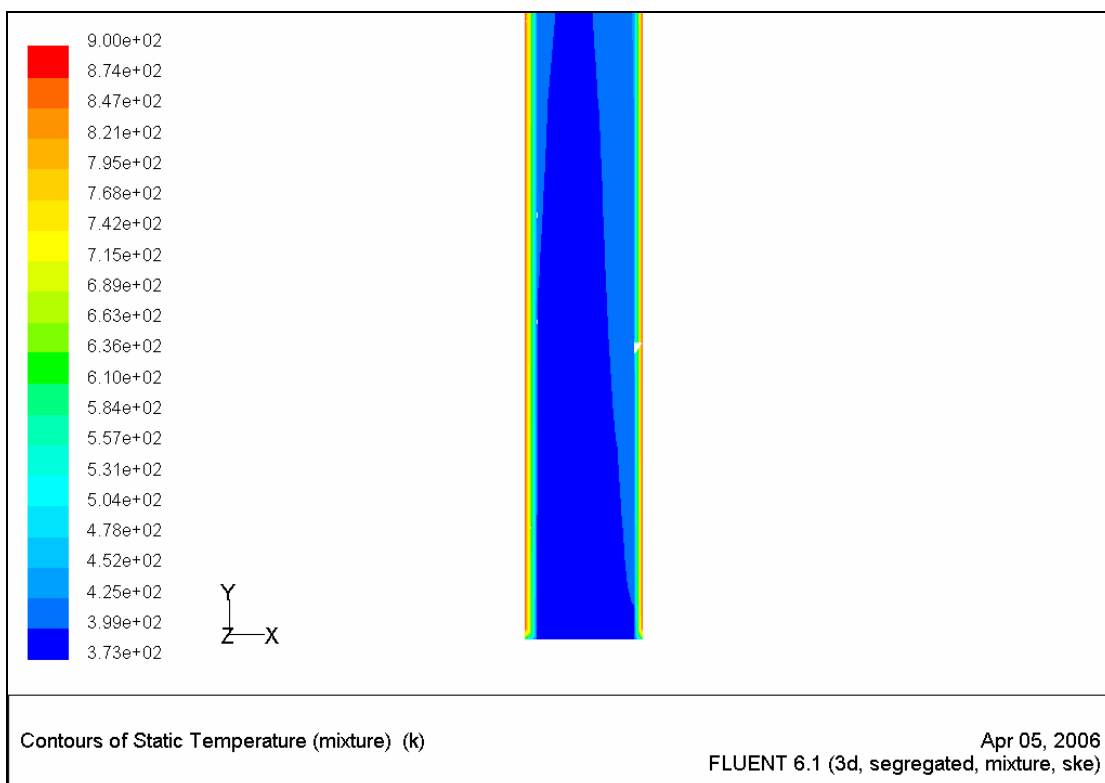
ภาพที่ 35 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในท่อขนาด 1 มิลลิเมตร



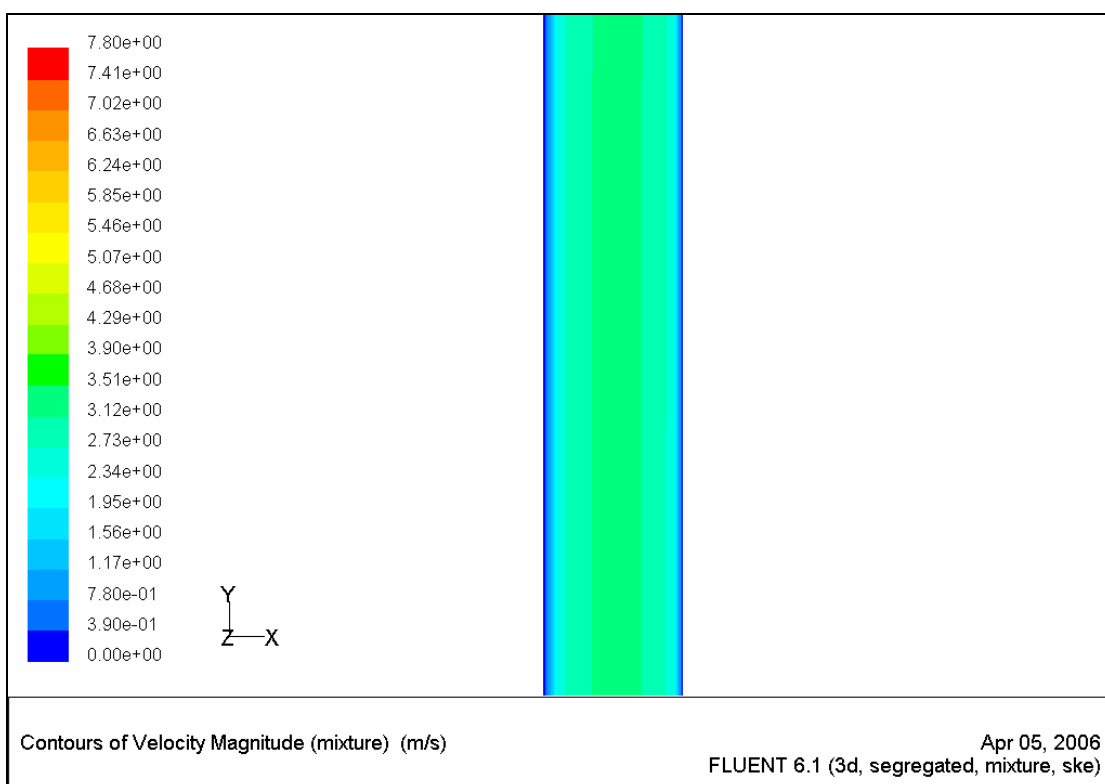
ภาพที่ 36 แสดงการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในท่อขนาด 1 มิลลิเมตร



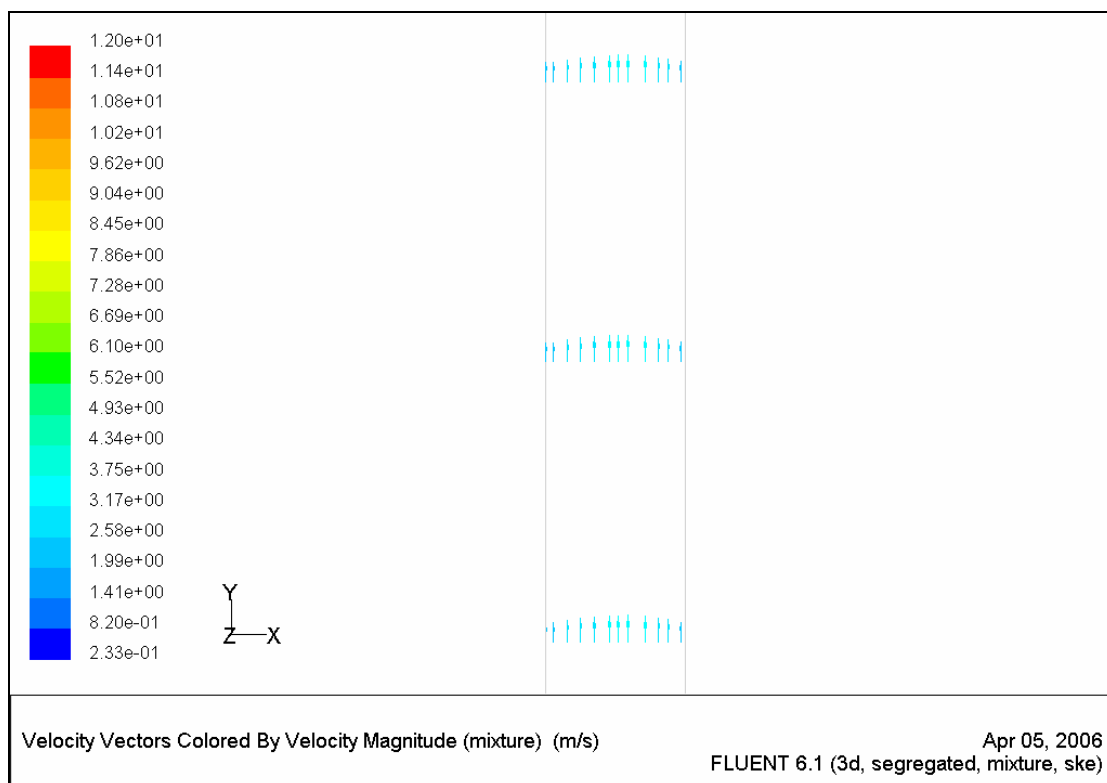
ภาพที่ 37 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 1 มิลลิเมตร



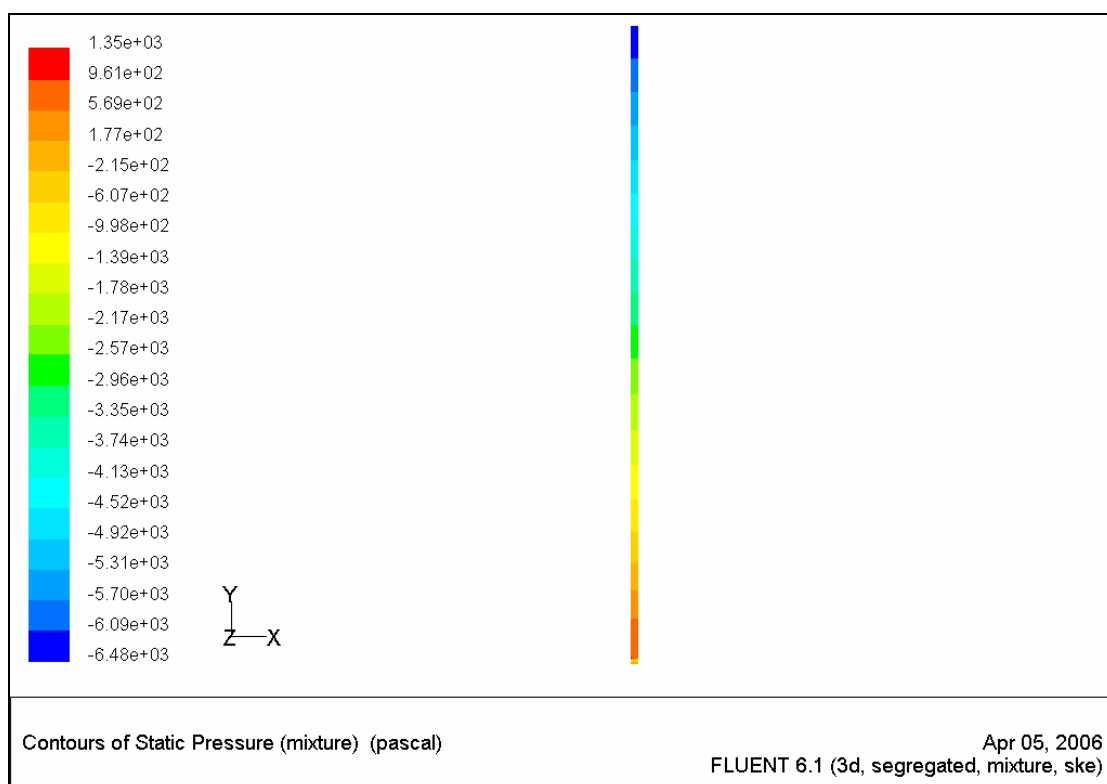
ภาพที่ 38 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางเข้าท่อของน้ำในท่อขนาด 1 มิลลิเมตร



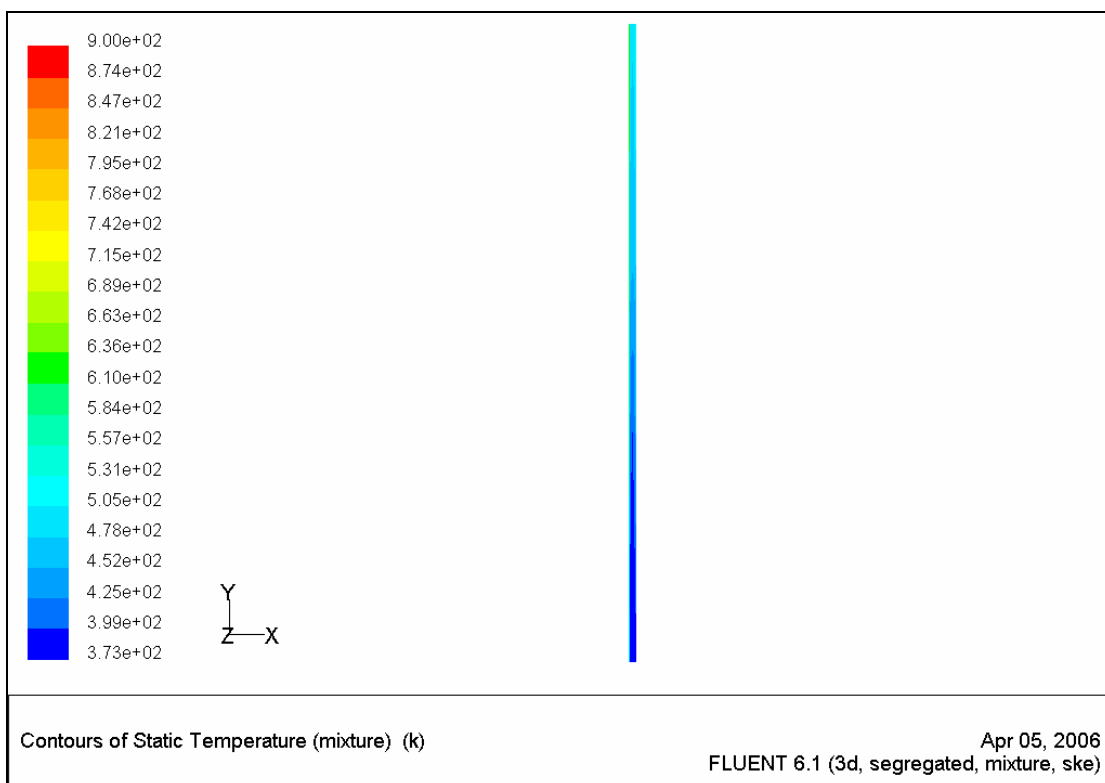
ภาพที่ 39 แสดงการกระจายตัวของความเร็วที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 1 มิลลิเมตร



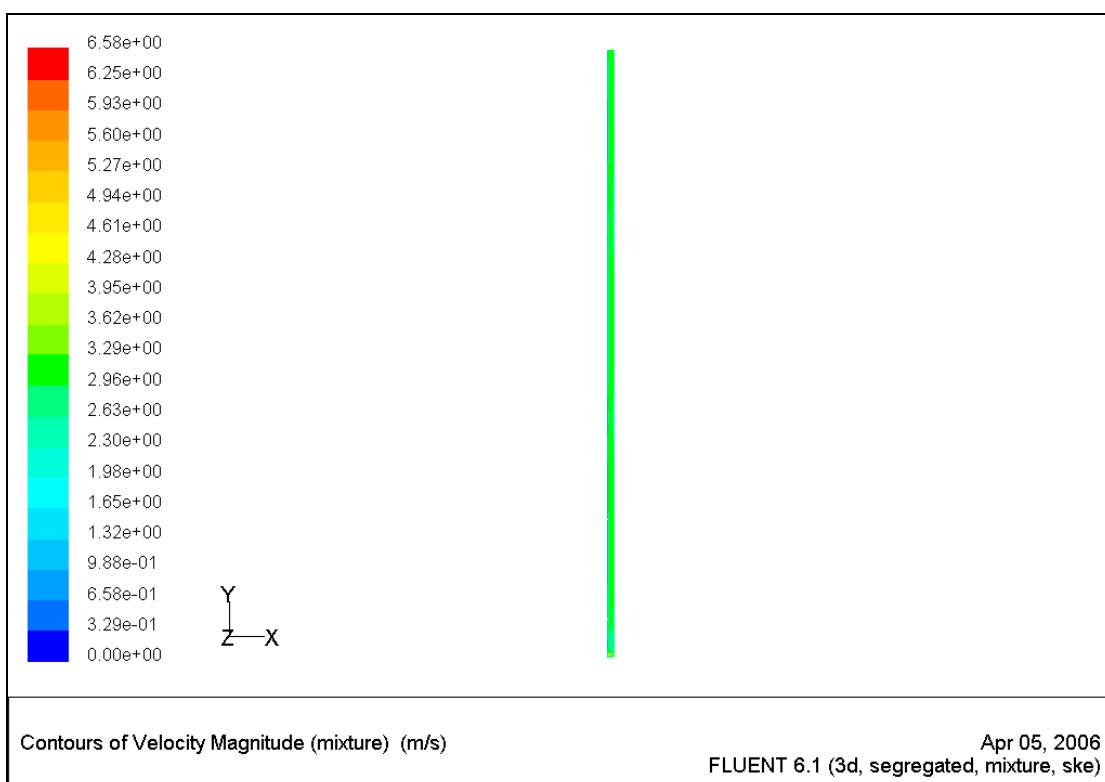
ภาพที่ 40 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 1 มิลลิเมตร



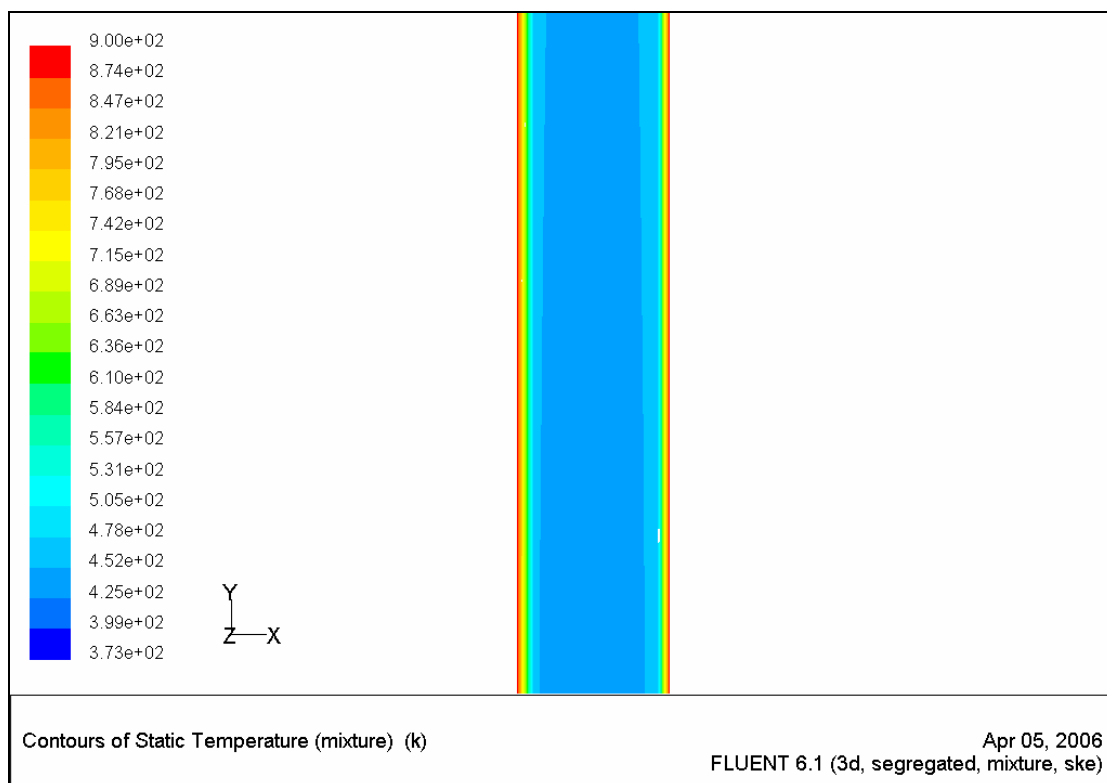
ภาพที่ 41 แสดงการกระจายตัวของความดันของน้ำในท่อขนาด 12 มิลลิเมตร



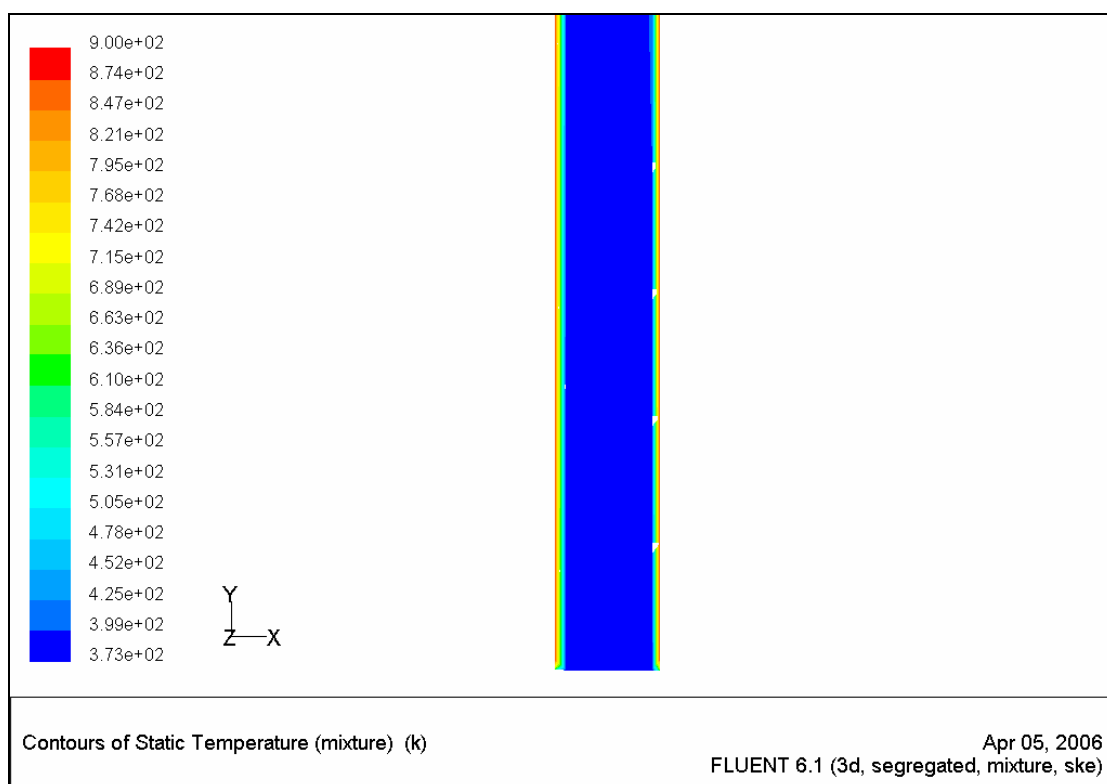
ภาพที่ 42 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในท่อขนาด 12 มิลลิเมตร



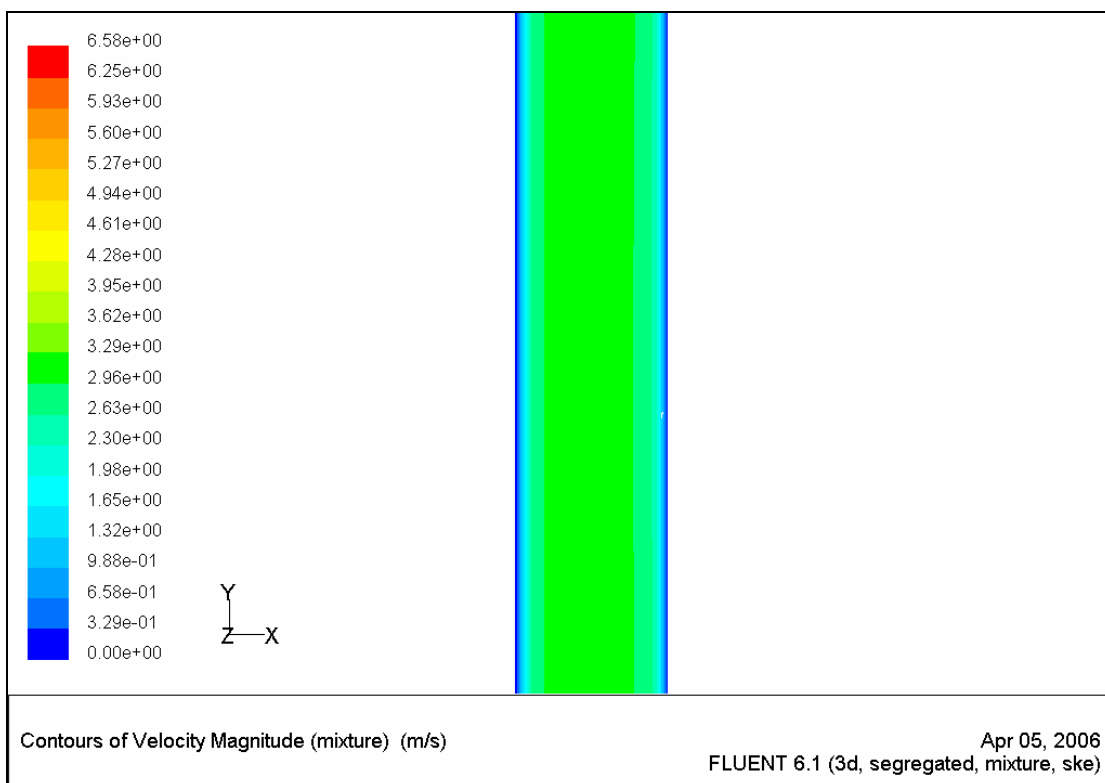
ภาพที่ 43 แสดงการกระจายตัวของความเร็วของน้ำในท่อขนาด 12 มิลลิเมตร



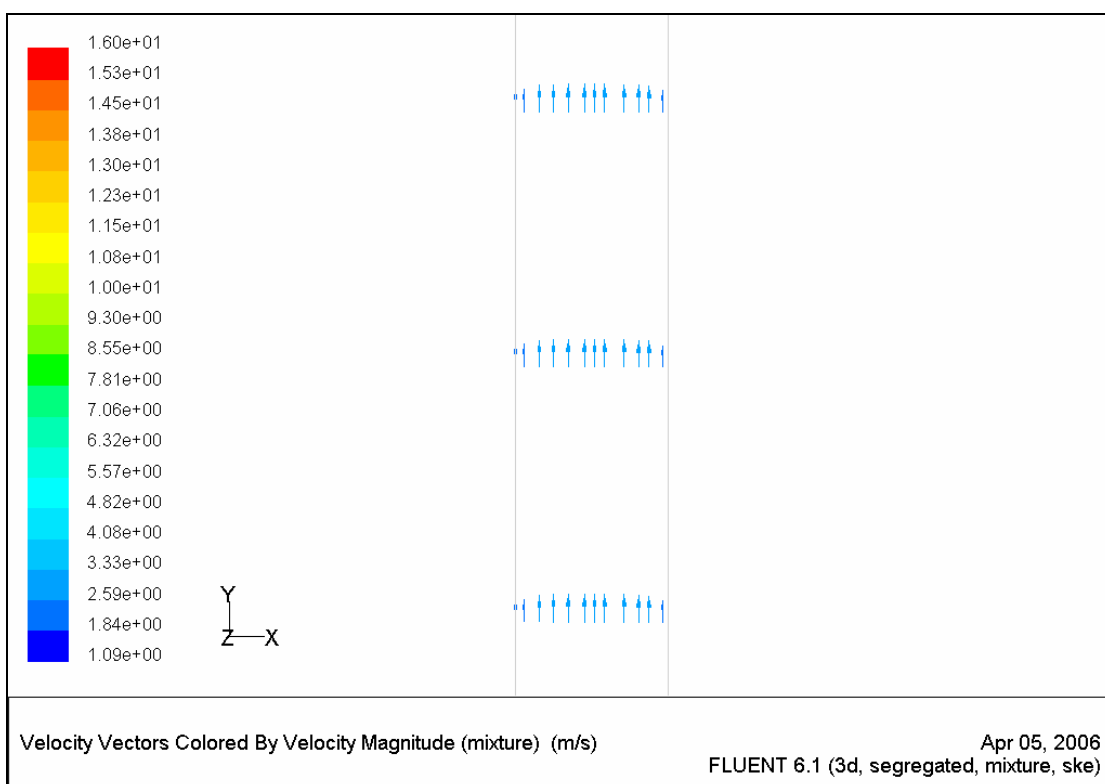
ภาพที่ 44 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 12 มิลลิเมตร



ภาพที่ 45 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ทางเข้าท่อของน้ำในท่อขนาด 12 มิลลิเมตร



ภาพที่ 46 แสดงการกระจายตัวของความเร็วที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 12 มิลลิเมตร



ภาพที่ 47 แสดงเวกเตอร์ของความเร็วที่กลางท่อของน้ำในท่อขนาด 12 มิลลิเมตร

ผลการคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต

โปรแกรม Fluent เป็นโปรแกรมทางด้านพลศาสตร์เชิงคำนวณ ซึ่งสามารถที่จะดูลักษณะการไหล การกระจายตัวของความดัน การกระจายตัวของความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลได้ นอกจากนี้ยังสามารถที่จะคำนวณฟลักซ์ความร้อนของของไหลในท่อขนาดไมโครได้อีกด้วย ซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ โดยจะทำการหาค่าฟลักซ์ความร้อนตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของวิธีการ แล้วนำผลที่ได้มาเขียนเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองและดูความสัมพันธ์ของเส้นกราฟแล้วหาสมการความสัมพันธ์นั้น

การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง

จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent จะได้ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำสำหรับการไหลของท่อขนาดต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 48 ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่คำนวณได้โดยใช้โปรแกรม Fluent กับผลการทดลอง โดยกราฟที่แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนฟลักซ์ความร้อนวิกฤต $\frac{CHF_D}{CHF_{D=8\text{ mm}}}$ กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ จะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตจากผลการทดลองซึ่งอยู่ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 1-25 มิลลิเมตร มีความใกล้เคียงกันกับผลการคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตโดยใช้โปรแกรม Fluent

การคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent เพื่อหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำสำหรับการไหลของท่อที่แสดงผลในภาพที่ 48 นั้น เป็นการคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0002-40 มิลลิเมตร ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0002-5 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ส่วนค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-25 มิลลิเมตร มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย กล่าวคือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย และค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-40 มิลลิเมตร ค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อจะคงที่

การแบ่งช่วงความสัมพันธ์และหาสมการความสัมพันธ์

การคำนวณโดยใช้โปรแกรม Fluent เพื่อหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำสำหรับการไหลในท่อ โดยงานวิจัยนี้คำนวณในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.0002-40 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อดูจากลักษณะของเส้นกราฟที่แสดงในภาพที่ 48 แล้ว จะสามารถแบ่งช่วงความสัมพันธ์จากลักษณะความสัมพันธ์ของเส้นกราฟซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงด้วยกัน โดยจะแบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ดังนี้คือ

1. $0.0002 \leq D \leq 0.01$ มิลลิเมตร (ท่อขนาดทรานซิสชันนาโนและท่อขนาดทรานซิสชันไมโคร)
2. $0.01 < D \leq 0.1$ มิลลิเมตร (ท่อขนาดไมโคร)
3. $0.1 < D \leq 8$ มิลลิเมตร (ท่อขนาดมินิและท่อขนาดเล็ก)
4. $8 < D \leq 25$ มิลลิเมตร (ท่อขนาดเล็ก)

โดยจะแสดงผลการคำนวณและผลจากการสร้างสมการความสัมพันธ์ในช่วงต่าง ๆ ในภาพที่ 49-52 ที่แสดงกราฟฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8-25, 0.1-8, 0.01-0.1 และ 0.0002-0.01 มิลลิเมตร ตามลำดับ และจะมีเส้นกราฟของสมการความสัมพันธ์โดยเส้นกราฟดังกล่าวมีสมการดังนี้คือ

1. $0.0002 \leq D \leq 0.01$ มิลลิเมตร

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8 \text{ mm}}} = 0.3432 D^{-0.2689} \quad (27)$$

2. $0.01 < D \leq 0.1$ มิลลิเมตร

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8 \text{ mm}}} = -520.49 D^2 + 79.816 D + 0.613 \quad (28)$$

3. $0.1 < D \leq 8$ มิลลิเมตร

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8 \text{ mm}}} = 1.6066D^{-0.2691} \quad (29)$$

4. $8 < D \leq 25$ มิลลิเมตร

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8 \text{ mm}}} = -2 \times 10^{-5} D^4 + 0.0015 D^3 - 0.0343 D^2 + 0.2655 D + 0.443 \quad (30)$$

โดยที่

CHF_D คือ ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่ต้องการทราบ (kW/m^2)

$CHF_{D=8 \text{ mm}}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 8 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากตาราง (kW/m^2)

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (มิลลิเมตร)

การหาค่าความคลาดเคลื่อนของสมการความสัมพันธ์

เนื่องจากการหาสมการความสัมพันธ์นั้นได้มาจากการหาเส้นแนวโน้มของกราฟของผลการทดลองและกราฟของผลการคำนวณ โดยในช่วงท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8-25 มิลลิเมตร สมการความสัมพันธ์ได้มาจากการหาเส้นแนวโน้มของกราฟของผลการทดลอง ส่วนท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-8, 0.01-0.1 และ 0.0002-0.01 มิลลิเมตร สมการความสัมพันธ์ได้มาจากการหาเส้นแนวโน้มของกราฟของผลการคำนวณ ซึ่งแต่ละช่วงจะมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่เป็นจริงโดยมีวิธีหาค่าความคลาดเคลื่อนดังนี้คือ

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ค่าจากผลการทดลองหรือผลการคำนวณ} - \text{ค่าจากสมการความสัมพันธ์}}{\text{ค่าจากผลการทดลองหรือผลการคำนวณ}}$$

โดยจะทำการแบ่งค่าความคลาดเคลื่อนออกเป็นช่วง ๆ ตามช่วงของความสัมพัทธ์และจะนำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มาเฉลี่ยเป็นช่วง ๆ ได้ผลดังนี้คือ

ค่าความคลาดเคลื่อนในช่วง $0.0002 \leq D \leq 0.01$ มิลลิเมตร เท่ากับ -0.59 %

ค่าความคลาดเคลื่อนในช่วง $0.01 < D \leq 0.1$ มิลลิเมตร เท่ากับ -1.41 %

ค่าความคลาดเคลื่อนในช่วง $0.1 < D \leq 8$ มิลลิเมตร เท่ากับ 6.53 %

ค่าความคลาดเคลื่อนในช่วง $8 < D \leq 25$ มิลลิเมตร เท่ากับ -3.20 %

การนำสมการความสัมพัทธ์ไปใช้

สำหรับการนำสมการความสัมพัทธ์ไปใช้เพื่อหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อขนาดต่าง ๆ ที่ความดัน อัตราการถ่ายเทมวล ค่าคุณภาพไอ ต่าง ๆ นั้น จะต้องใช้สมการความสัมพัทธ์ควบคู่ไปกับตารางค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตสำหรับการไหลของน้ำในท่อ ขนาด 8 มิลลิเมตร ในแนวดิ่งของ Groeneveld et al. ซึ่งจะแสดงไว้ในภาคผนวก

ตัวอย่างการหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤต

ตัวอย่างที่ 1. จงหาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำสำหรับการไหลของน้ำในท่อนแนวดิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.05 มิลลิเมตร ที่ความดัน 100 kPa อัตราการถ่ายเทมวล $1000 \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ค่าคุณภาพไอต่เท่ากับ 0.2

วิธีทำ

หาค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำในท่อในแนวดิ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.05 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในช่วง $0.01 < D \leq 0.1$ มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นใช้สมการความสัมพัทธ์

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8 \text{ mm}}} = -520.49 D^2 + 79.816 D + 0.613$$

เปิดตาราง ของ Groeneveld et al. หาค่า $CHF_{D=8\text{ mm}}$ ที่ความดัน 100 kPa อัตราการถ่ายเทมวล 1000 $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ค่าคุณภาพไอเท่ากับ 0.2 ได้เท่ากับ 2211 kW m^{-2}

แทนค่า $D = 0.05$, $CHF_{D=8\text{ mm}} = 2211$ ในสมการ

$$\frac{CHF_D}{2211} = -520.49(0.05)^2 + 79.816(0.05) + 0.613$$

จะได้

$$CHF_D = 7301.99 \text{ kW m}^{-2}$$

เพราะฉะนั้นค่าฟลักซ์ความร้อนวิกฤตของน้ำสำหรับการไหลของน้ำในท่อในแนวดิ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.05 มิลลิเมตร ที่ความดัน 100 kPa อัตราการถ่ายเทมวล 1000 $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ค่าคุณภาพไอเท่ากับ 0.2 เท่ากับ 7301.99 kW m^{-2}

ตัวอย่างที่ 2. วิศวกรผู้หนึ่งต้องการออกแบบท่อระบายความร้อนด้วยน้ำในแนวดิ่ง ที่ความดัน 100 kPa อัตราการถ่ายเทมวล 1000 $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ค่าคุณภาพไอเท่ากับ 0.2 โดยให้มีฟลักซ์ความร้อนวิกฤต 5000 kW m^{-2} วิศวกรผู้นี้จะต้องใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าไร

วิธีทำ

เมื่อเปิดตาราง ของ Groeneveld et al. หาค่า $CHF_{D=8\text{ mm}}$ ที่ความดัน 100 kPa อัตราการถ่ายเทมวล 1000 $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ค่าคุณภาพไอเท่ากับ 0.2 ได้เท่ากับ 2211 kW m^{-2}

สำหรับในกรณีนี้จะต้องออกแบบให้ฟลักซ์ความร้อนวิกฤตเท่ากับ 5000 kW m^{-2} แต่ไม่ทราบขนาดของท่อจึงต้องคำนวณทุกสมการเพื่อหาค่าขนาดของท่อและเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ในช่วง $8 < D \leq 25$ มิลลิเมตร ค่า CHF_D จะต้องน้อยกว่า $CHF_{D=8\text{ mm}}$ แต่ในกรณีนี้

ค่า CHF_D มากกว่า $CHF_{D=8\text{ mm}}$ ดังนั้นจึงไม่ต้องคำนวณสมการนี้ เพราะฉะนั้นจะคำนวณทั้งหมด 3 สมการ

กรณีที่ 1 $0.0002 \leq D \leq 0.01$ มิลลิเมตร

สมการคือ

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8\text{ mm}}} = 0.3432 D^{-0.2689}$$

แทนค่า

$$\frac{5000}{2211} = 0.3432 D^{-0.2689}$$

จะได้

$$D = 0.0009 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

กรณีที่ 2 $0.01 < D \leq 0.1$ มิลลิเมตร

สมการคือ

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8\text{ mm}}} = -520.49 D^2 + 79.816 D + 0.613$$

แทนค่า

$$\frac{5000}{2211} = -520.49 D^2 + 79.816 D + 0.613$$

จะได้

$$D = 0.0246 \quad \text{มิลลิเมตร}$$

กรณีที่ 3 $0.1 < D \leq 8$ มิลลิเมตร

สมการคือ

$$\frac{CHF_D}{CHF_{D=8\text{ mm}}} = 1.6066D^{-0.2691}$$

แทนค่า

$$\frac{5000}{2211} = 1.6066D^{-0.2691}$$

จะได้

$$D = 0.2807$$

มิลลิเมตร

จากการคำนวณทั้ง 3 กรณีจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 0.009, 0.0246 และ 0.2807 มิลลิเมตรซึ่งการเลือกใช้นั้นก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมต่าง ๆ เช่นพื้นที่การติดตั้ง ราคา และอื่น ๆ