

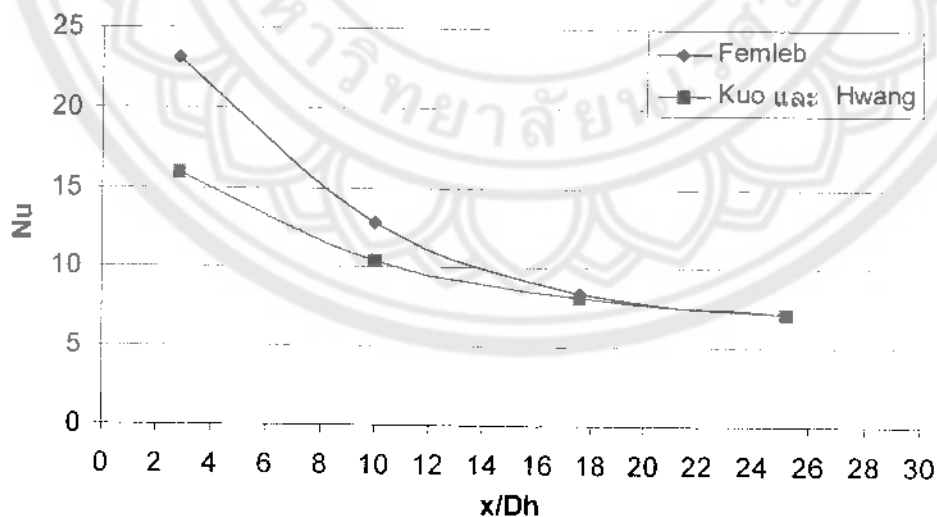
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการใช้เทคนิคทางไฟในตัดีเลเมนต์

บทนี้กล่าวถึงผลของการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นผิวของช่องการไหล โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกแสดงผลการทดลองโดยพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของความยาวและความสูงของช่องการไหล (H/L) ส่วนที่สองแสดงผลการทดลองจากผลกระทบของความสูงสำหรับรอยนูนและความลึกสำหรับรอยบุ๋ม (d/D_0)

4.1 เปรียบเทียบผลจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม FEMLAB กับผลการทดลองของ Kuo และ Hwang (1994)

รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม FEMLAB กับผลการทดลองของ Kuo และ Hwang (1994) ที่ $Re = 1000$, $H/L = 1.0$ พบว่าผลการถ่ายเทความร้อนที่ทางเข้าช่องการไหลมีค่าสูงที่สุด และลดลงเรื่อยๆอย่าง Exponential และเข้าสู่ค่าหนึ่งที่ $x/D_0 = 17.5$ นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างระหว่างการใช้เทคนิคทางไฟในตัดีเลเมนต์และของ Kuo และ Hwang (1994) พบว่าที่ $x/D_0 = 2.5$ ผลการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เทคนิคไฟในตัดีเลเมนต์สูงกว่าที่ได้จากการทดลอง คิดเป็น 40% ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายความเร็วของการทดลองเป็นการพัฒนาอย่างเต็มที่ (Fully Developed) ในขณะที่การศึกษาทางตัวเลข เรากำหนดให้ทางเข้ามีความเร็วคงที่ (Uniform Flow) ดังนั้นการกำหนดโปรไฟล์ความเร็วที่ทางเข้าที่ต่างกันนี้เองส่งผลให้ Nu ที่ $x/D_0 = 10$ ต่างกัน 18.76%

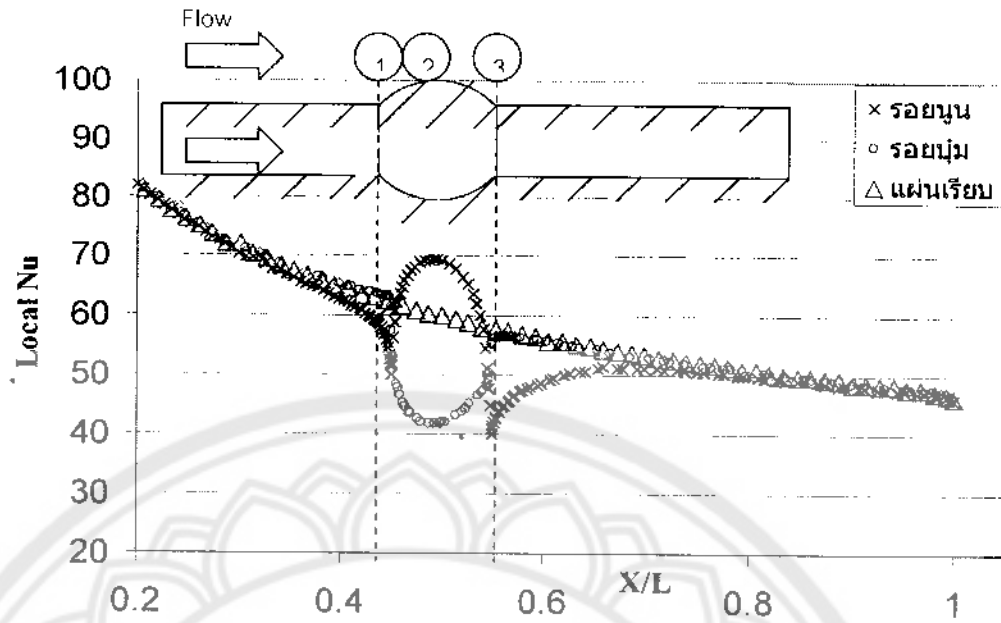


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ FEMLAB กับผลการทดลองที่ $Re = 1000$, $H/L = 1.0$

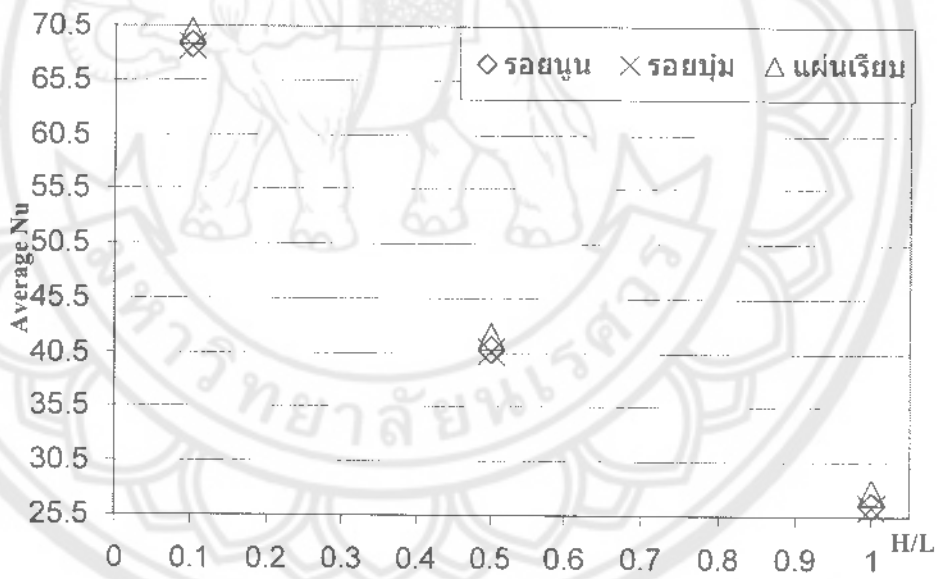
4.2 เปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นที่มีรอยบุ๋ม รอยนูนและแผ่นเรียบ

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนของรอยบุ๋ม รอยนูนและแผ่นเรียบ โดยพิจารณาจากตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number, Nu) รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของทั้งสามพื้นผิวข้างต้น สำหรับช่องการไหลที่มีอัตราส่วนความสูงและความยาว (H/L) เป็น 0.1 และขนาดของอัตราส่วนความลึกและความกว้างของรอยบุ๋มหรือรอยนูน (d/D_d) เป็น 0.1 สำหรับรอยนูนและรอยบุ๋มเมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ พบว่าค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉพาะที่ (Local Nu) ของรอยนูนมีค่าสูงกว่ารอยบุ๋มและแผ่นเรียบ และรอยบุ๋มให้การถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ต่ำที่สุด ทั้งนี้การเพิ่มพื้นผิวแบบรอยนูนนั้นทำให้ช่องการไหลแคบลง ส่งผลให้ความเร็วในการไหลบริเวณนี้มากขึ้นดังแสดงในรูปของเวกเตอร์ความเร็ว (ดูรูป 4.4ข) การถ่ายเทความร้อน ณ บริเวณนี้จึงมีค่าสูงแต่บริเวณที่เป็นรอยบุ๋มทำให้ช่องการไหลกว้างขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ (ดูรูป 4.4ค) ทำให้โมเมนต์การไหลลดลงดังแสดงในรูปของเวกเตอร์ความเร็ว จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลงตาม นอกจากนี้รูปที่ 4.2 ยังสังเกตได้ว่า ก่อนถึงรอยนูน (บริเวณ 1 รูป 4.2) เมื่อของไหลไหลมาถึงบริเวณนี้พลังงานจลน์จะลดลงเพื่อใช้ในการเพิ่มพลังงานศักย์ ทำให้โมเมนต์การไหลบริเวณนี้ลดลงและที่บริเวณรอยนูน (บริเวณ 2 รูป 4.2) ทำให้ช่องการไหลแคบลงโมเมนต์การไหลบริเวณนี้เพิ่มขึ้นการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อออกจากรอยนูน (บริเวณ 3 รูป 4.2) การถ่ายเทความร้อนเกิด Hot spot เป็นไปได้ว่าการไหลเข้าไปไม่ถึงบริเวณนี้เนื่องรอยนูนบังอยู่

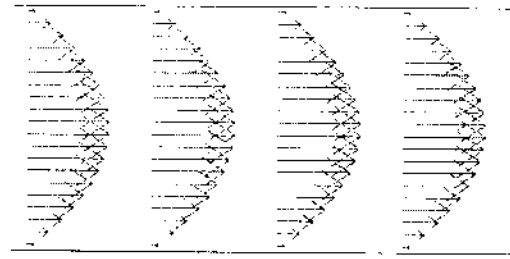
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับรอยนูน รอยบุ๋มและแผ่นเรียบที่ $d/D_d = 0.1$, $Re = 1000$, $H/L = 0.1, 0.5$ และ 1.0 ที่ $H/L = 0.1$ พบว่ารอยบุ๋มมีผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยลดลง 1.92% เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ และรอยนูนลดลง 1.73% เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ สำหรับที่ $H/L = 0.5$ ผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของแผ่นเรียบในรูปของ Nusselt Number เฉลี่ยมีค่าเป็น 41.99 รอยบุ๋มเป็น 40.66 และรอยนูนเป็น 40.78 พบว่าผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของรอยบุ๋มน้อยกว่าแผ่นเรียบอยู่ 3.17% และรอยนูนน้อยกว่าแผ่นเรียบอยู่ 2.97% สำหรับที่ $H/L = 1.0$ ผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของแผ่นเรียบเป็น 27.71 รอยบุ๋มเป็น 26.30 และรอยนูนเป็น 26.52 พบว่าผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของรอยบุ๋มน้อยกว่าแผ่นเรียบอยู่ 5.08% และรอยนูนน้อยกว่าแผ่นเรียบอยู่ 4.29%



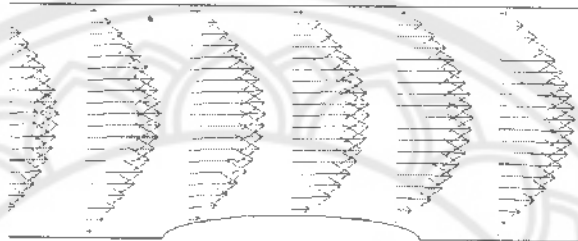
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนสำหรับแผ่นที่มีรอยบุ๋ม รอยนูนและแผ่นเรียบที่ $Re = 1000, H/L = 0.1, d/D_d = 0.1$



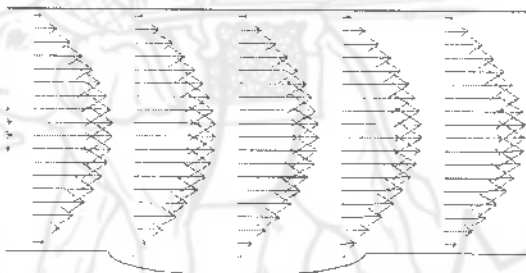
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับรอยนูน รอยบุ๋ม และแผ่นเรียบที่ $Re = 1000, d/D_d = 0.1$



(ก).แผ่นเรียบ



(ข).รอยขนุน



(ค).รอยปุ่ม

รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบการไหลในช่องการไหลที่ $Re = 1000$, $H/L = 0.1$ และ $d/D_0 = 0.1$

4.3 ผลกระทบของอัตราส่วนความสูงและความยาวของช่องการไหล (H/L)

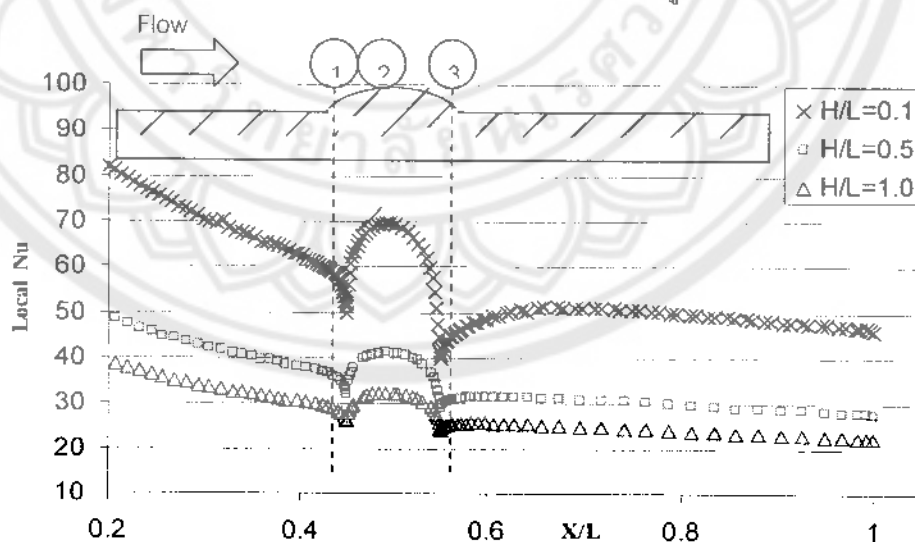
ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการถ่ายเทความร้อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความสูงและความยาว (H/L) โดยทดสอบที่ $H/L = 0.1, 0.5$ และ 1.0 และกำหนดให้ $d/D_0 = 0.1$ คงที่สำหรับทั้งรอยขนุนและรอยปุ่ม นอกจากนี้ยังมีการแสดงการไหลผ่านช่องการไหลอันได้มาจากการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ ทั้งนี้เพื่อใช้ในการอธิบายผลของการถ่ายเทความร้อน จากผลการคำนวณสำหรับรอยขนุนและรอยปุ่มตามลำดับ

4.3.1 ช่องการไหลที่มีพื้นผิวเป็นรอยนูน

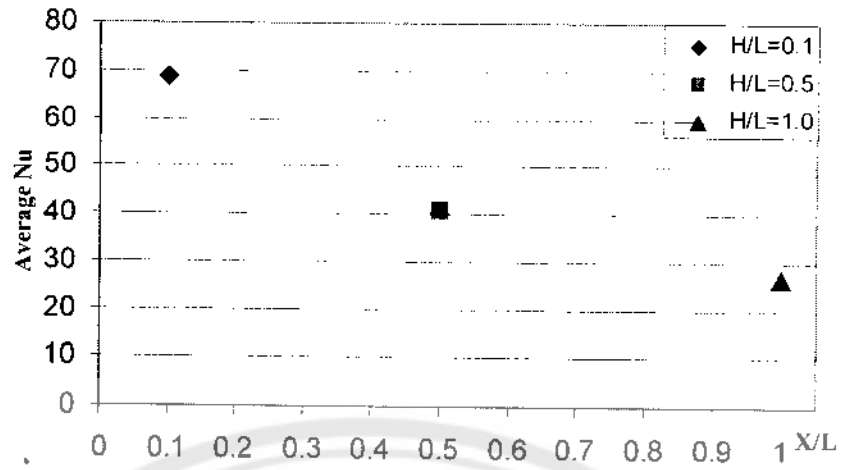
รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงผลของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ (Local) และเฉลี่ย (Average) ตามลำดับพบว่าที่ H/L น้อยๆ โดยมีอัตราการไหลสูงกว่าที่ H/L สูงๆ ดังแสดงในรูป 4.7 ที่ $H/L = 0.1$ แสดงความเร็วสูงกว่าที่ $H/L = 0.5$ และ 1.0 เมื่อพิจารณาบริเวณรอยนูนนั้นทำให้ช่องการไหลแคบลง (ดูบริเวณ 2 ในรูป 4.2) ผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่จะเพิ่มขึ้น และในบริเวณก่อนถึงรอยนูนเมื่อกระแสอิสระไหลมาถึงจุดนี้ (ดูบริเวณ 1 ในรูป 4.2) กระแสการไหลต้องใช้พลังงานจนเกินไปเพื่อเพิ่มพลังงานศักย์ ส่งผลให้โมเมนตัมการไหลลดลง ความเร็วจึงลดลงดังแสดงในรูปของเวกเตอร์ความเร็ว ผลการถ่ายเทความร้อนบริเวณนี้จึงลดลงด้วย แต่เมื่อออกจากรอยนูน (บริเวณ 3 ในรูป 4.2) ผลการถ่ายเทความร้อนบริเวณนี้ลดลง เป็นไปได้ว่าเกิดบริเวณ Hot spot คือการไหลเข้าไปไม่ถึงเนื่องจากรอยนูนบังอยู่

นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณก่อนถึงรอยนูนผลการถ่ายเทความร้อนของ $H/L = 0.1$ มากกว่า $H/L = 0.5$ คิดเป็น 36% และ $H/L = 1.0$ น้อยกว่า $H/L = 0.5$ อยู่ 12.5% (บริเวณ 1 รูป 4.2) ส่วนบริเวณรอยนูนที่ผลการถ่ายเทความร้อนสูงสุดพบว่า $H/L = 0.5$ มีผลการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่า $H/L = 0.1$ อยู่ 40% และ $H/L = 1.0$ น้อยกว่า $H/L = 0.5$ อยู่ 23.81% (บริเวณ 2 รูป 4.2) และเมื่อสังเกตบริเวณหลังรอยนูนผลการถ่ายเทความร้อนที่ $H/L = 0.5$ น้อยกว่า $H/L = 0.1$ คิดเป็น 27.5% และ $H/L = 1.0$ น้อยกว่า $H/L = 0.5$ อยู่ 17.24%

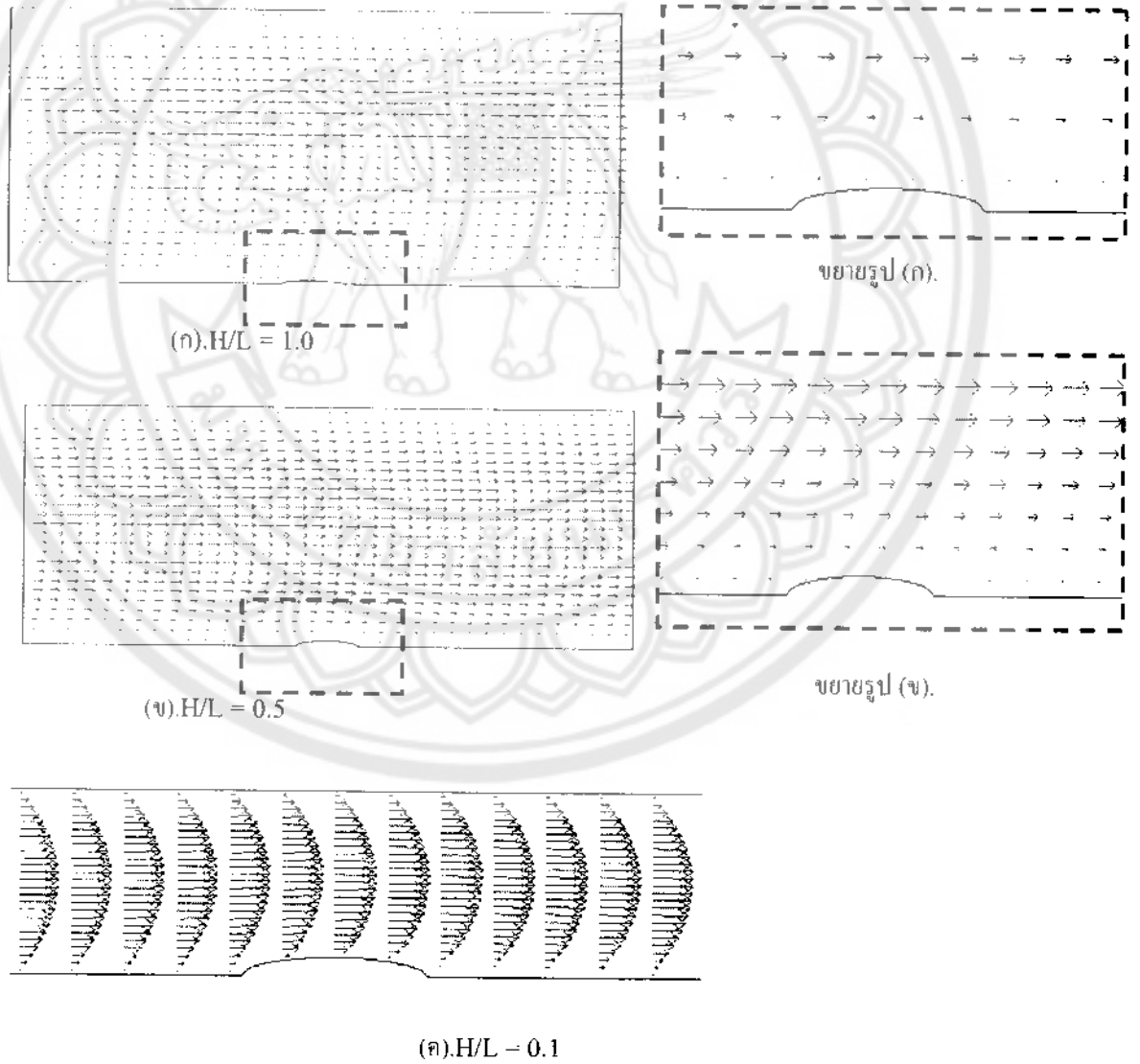
รูปที่ 4.6 แสดงผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับรอยนูน ที่ $H/L = 0.1$ มีผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเป็น 68.7 ที่ $H/L = 0.5$ เป็น 40.78 และที่ $H/L = 1.0$ เป็น 26.51 แสดงให้เห็นว่าที่ H/L น้อยๆ ให้การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าที่ H/L สูงๆ คือที่ $H/L = 0.1$ มีผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าที่ $H/L = 0.5$ คิดเป็น 40% และที่ $H/L = 1.0$ น้อยกว่า $H/L = 0.5$ อยู่ 35%



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนสำหรับรอยนูนที่ $Re = 1000, d/D_d = 0.1$



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับรอยวนที่ $Re = 1000$, $d/D_0 = 0.1$



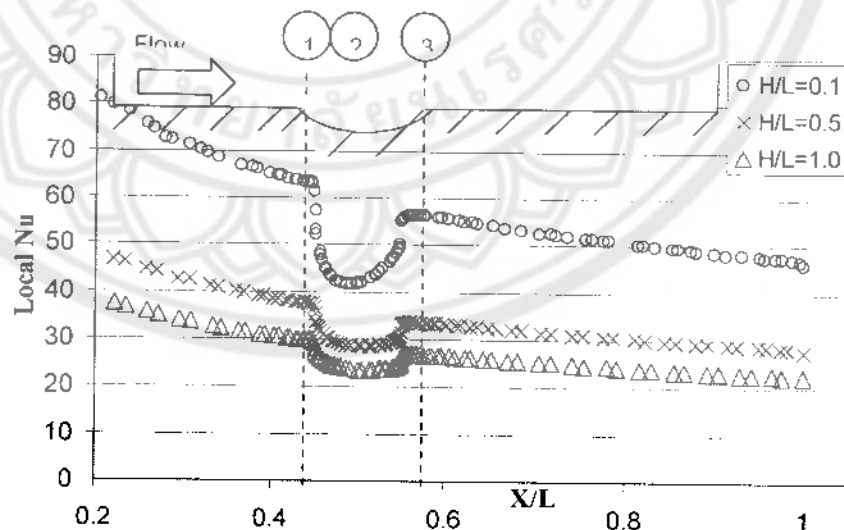
รูปที่ 4.7 การไหลสำหรับช่องการไหลที่มีรอยวนที่ $d/D_0 = 0.1$

4.3.2 ช่องการไหลที่มีพื้นผิวเป็นรอยนูน

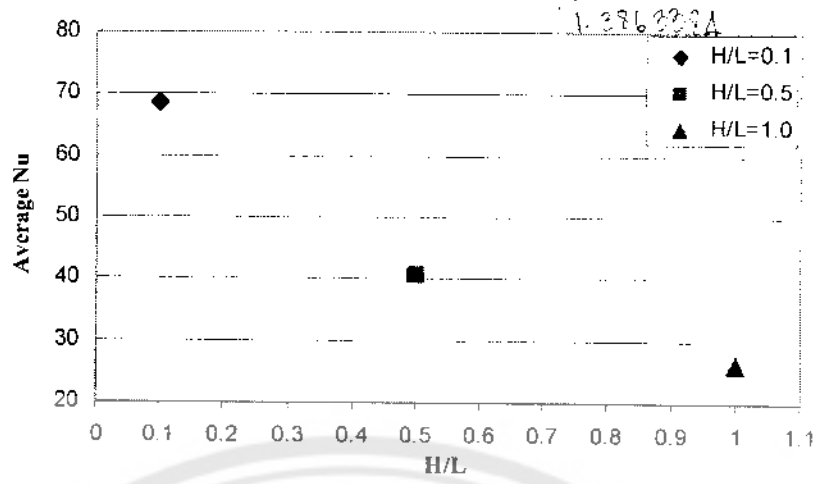
รูปที่ 4.8 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนความสูงและความยาวของช่องการไหล (H/L) พบว่าที่ $H/L = 0.1$ ผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ดีกว่า $H/L = 0.5$ และ 1.0 เนื่องจากช่องทางการไหลบริเวณรอยนูนกว้างขึ้น (ดูรูป 4.10) ทำให้ความเร็วในการไหลลดลงดังแสดงในรูปของเวกเตอร์ความเร็ว จึงทำให้ผลการถ่ายเทความร้อนลดลง (ดูรูปขยาย ก. และ ข. 4.10) ที่ $H/L = 0.5$ และ 1.0 บริเวณรอยนูนที่มีความลึกมากๆจะมีโมเมนตัมการไหลน้อยกว่ารอยนูนที่ตื้นกว่าดังแสดงในรูปของเวกเตอร์ความเร็ว ความเร็ว เนื่องจากยิ่งความลึกของรอยนูนมากเท่าไรก็จะทำให้ช่องการไหลยิ่งกว้างขึ้น ความเร็วจึงลดลง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลง

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าบริเวณก่อนถึงรอยนูน (บริเวณ 1 รูป 4.8) เมื่อของไหลไหลมาถึงบริเวณนี้ความเร็วในการไหลจะเริ่มลดลงเนื่องจากช่องการไหลเริ่มกว้างขึ้น พบว่าที่ $H/L = 0.5$ มีผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่น้อยกว่าที่ $H/L = 0.1$ อยู่ 38% และที่ $H/L = 1.0$ น้อยกว่า 25.64% ส่วนบริเวณรอยนูนซึ่งมีผลการถ่ายเทความร้อนต่ำสุด (บริเวณ 2 รูป 4.8) พบว่าที่ $H/L = 0.5$ มีผลการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าที่ $H/L = 0.1$ อยู่ 29.27% และที่ $H/L = 1.0$ น้อยกว่าที่ $H/L = 0.5$ อยู่ 24.14% และบริเวณออกจากรอยนูน(บริเวณ รูป 4.8) ที่ $H/L = 0.5$ มีผลการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าที่ $H/L = 0.1$ อยู่ 41.38% และที่ $H/L = 1.0$ น้อยกว่าที่ $H/L = 0.5$ อยู่ 17.65%

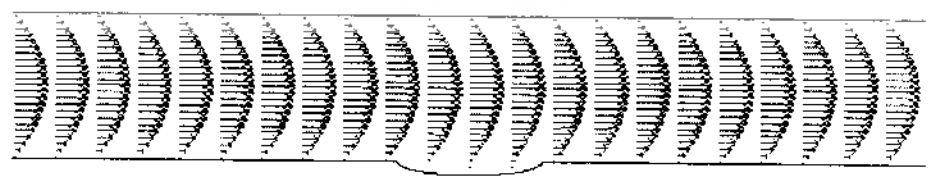
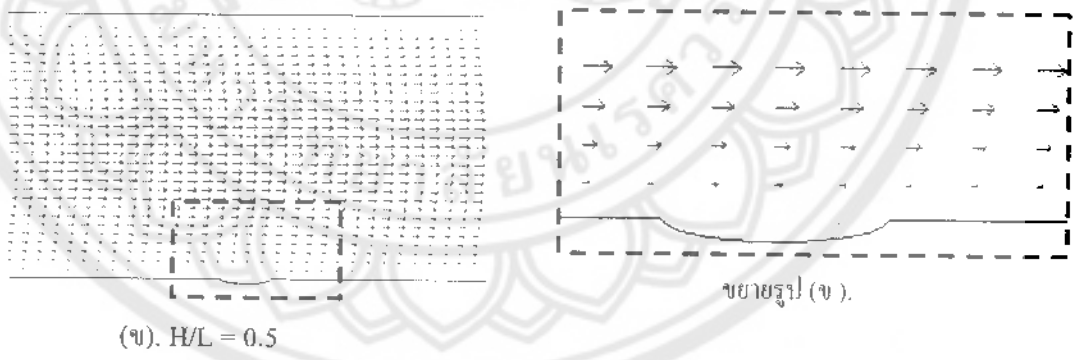
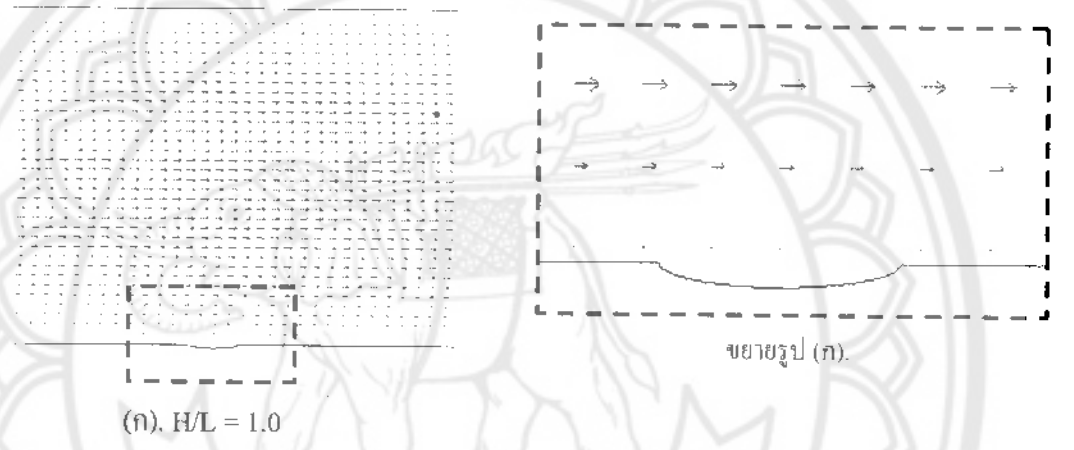
รูปที่ 4.9 แสดงผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับรอยนูนที่มี $d/D_n = 0.1$ พบว่าที่ $H/L = 0.1$ มีผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเป็น 68.63 ที่ $H/L = 0.5$ เป็น 40.66 และที่ $H/L = 1.0$ เป็น 26.30 สังเกตได้ว่าที่ $H/L = 0.1$ มีผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุดคือที่ $H/L = 0.1$ มากกว่าที่ $H/L = 0.5$ อยู่ 40.75% และมากกว่าที่ $H/L = 1.0$ อยู่ 61.68%



รูปที่ 4.8 ผลกระทบของ H/L ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สำหรับรอยนูนที่ $d/D_n = 0.1$



รูปที่ 4.9 ผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับรอยบุ๋มที่ $d/D_j = 0.1$ ที่ค่า H/L ต่างๆ



(ค). H/L = 0.1

รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบการไหลในช่องการไหลที่มีรอยบุ๋ม $d/D_j = 0.1$

4.4 ผลกระทบของความลึกหรือความสูง (d/D_d)

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความสูงของรอยนูนและความลึกของรอยนูน (d/D_d) ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยทำการทดสอบที่ $d/D_d = 0.05, 0.1$ และ 0.3 โดยที่ $H/L = 0.1$ คงที่ ซึ่งผลการคำนวณแสดงในรูปของผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ (Local Nu), ผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (Average Nu) และการไหลซึ่งได้มาจากสมการนาเวียร์-สโตกส์

4.4.1 ผลกระทบของความสูงสำหรับรอยนูน

รูปที่ 4.11 แสดงผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ (Local Nu) สำหรับการไหลผ่านพื้นผิวรอยนูนที่มีความสูงต่างๆ ที่ $Re = 1000$ และ $H/L = 0.1$ พบว่าลักษณะของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่คล้ายคลึงกันสำหรับแต่ละค่า d/D_d แต่ระดับของการถ่ายเทความร้อนต่างกัน กล่าวคือ การถ่ายเทความร้อนจะลดลงจากทางเข้าจนกระทั่งถึงบริเวณก่อนการไหลจะขึ้นรอยนูนและสูงขึ้นบริเวณรอยนูน จากนั้นตกลงไปจนต่ำสุดเมื่อการไหลลงรอยนูน และขึ้นมาจนกระทั่งถึง x/L ประมาณ 0.88 ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของทั้งสามกรณีดูเข้าสู่ค่าเดียวกันที่ Nu ประมาณ 48 ที่ d/D_d สูงๆ เช่น $d/D_d = 0.3$ การถ่ายเทความร้อนที่ยอดของรอยนูนจะสูงกว่าของ $d/D_d = 0.05$ และ 0.1 อย่างเห็นได้ชัด โดยที่จุดสูงสุดของการถ่ายเทความร้อนสำหรับ $d/D_d = 0.3$ สูงกว่า $d/D_d = 0.05$ คิดเป็น 28% และ $d/D_d = 0.1$ คิดเป็น 22%

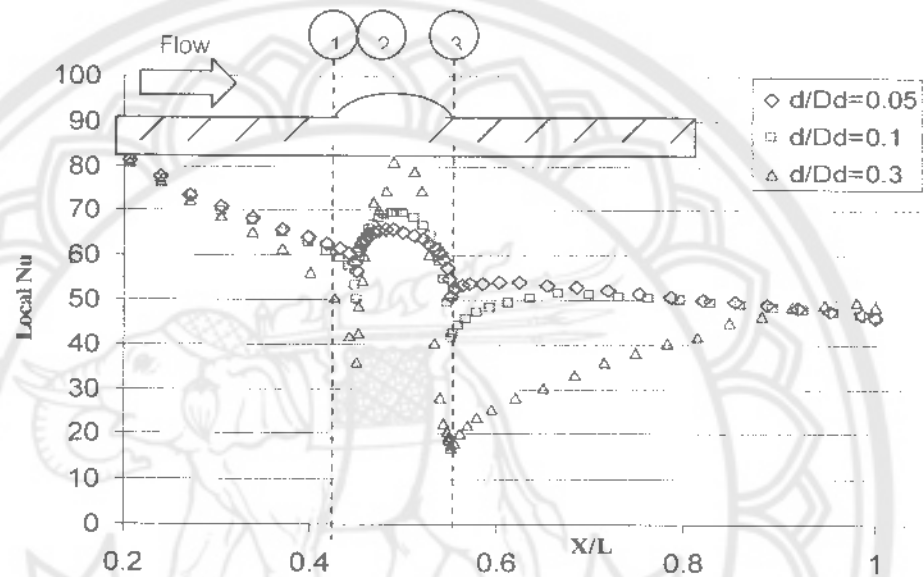
อย่างไรก็ตามสำหรับบริเวณก่อนการไหลจะไหลขึ้นรอยนูนของ $d/D_d = 0.3$ กลับมีค่าต่ำสุดคือก่อนการไหลขึ้นรอยนูนผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของ $d/D_d = 0.3$ มีค่าต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่าของ $d/D_d = 0.05$ อยู่ 36% และน้อยกว่า $d/D_d = 0.1$ อยู่ 30% (บริเวณ 1 รูป 4.11) ส่วนบริเวณหลังรอยนูนผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของ $d/D_d = 0.3$ มีค่าต่ำสุดโดยมีค่าน้อยกว่าของ $d/D_d = 0.05$ อยู่ 68 % และน้อยกว่า $d/D_d = 0.1$ อยู่ 62% (บริเวณ 3 รูป 4.11)

รูปที่ 4.12 แสดงผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับการไหลผ่านรอยนูน พบว่าที่ d/D_d น้อยๆ ให้ผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยดีกว่าที่ d/D_d สูงๆ กล่าวคือ ที่ $d/D_d = 0.05$ มีผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเป็น 71.7 ที่ $d/D_d = 0.1$ เป็น 68.7 และที่ $d/D_d = 0.3$ เป็น 64 สังเกตว่าที่ $d/D_d = 0.3$ มีผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่ำสุด คือน้อยกว่าที่ $d/D_d = 0.1$ อยู่ 6.84% และน้อยกว่า $d/D_d = 0.05$ อยู่ 10.74%

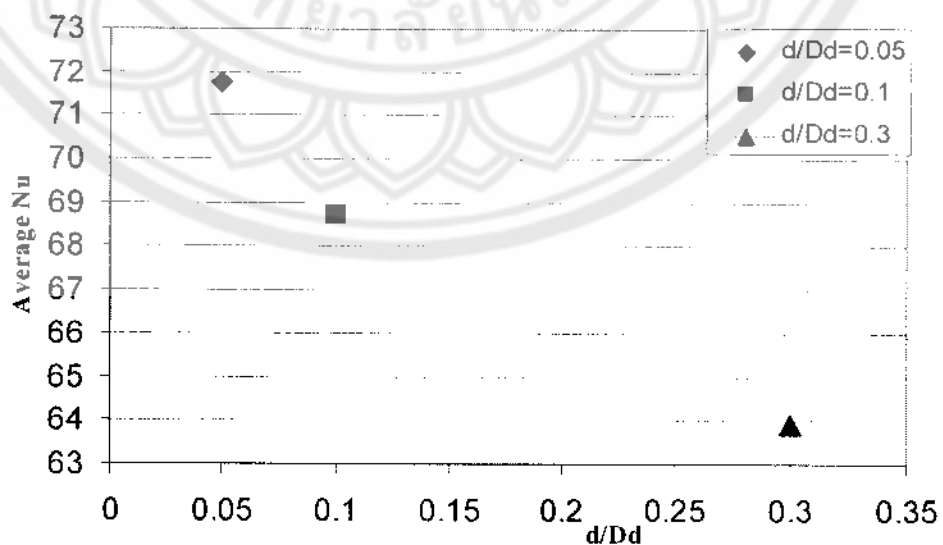
รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายความเร็วของการไหลผ่านช่องการไหลที่มีรอยนูน พบว่ารอยนูนที่ยื่นออกมาทำให้ช่องการไหลแคบลง และเมื่อ d/D_d มากก็ทำให้ช่องการไหลแคบลงมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้ความเร็วในการไหลสูงขึ้นนอกจากนั้นหลังรอยนูนยังเกิด Hot spot ที่การไหลเข้าไปไม่ถึง รูปที่ 4.13 ค.พบว่าที่ d/D_d สูงๆคือ $d/D_d = 0.3$ เกิดการไหลย้อนกลับ (BackFlow) สวนกับทิศการไหลอิสระเนื่องจากการไหลผ่านบริเวณผิวโค้งนี้ทำให้เกิดการไหลหน่วงขึ้น สำหรับบริเวณนี้ความดันของของไหลจะเพิ่มขึ้น ในทิศการไหลของกระแสอิสระ หรือเกรเดียนต์ความดันมีเครื่องหมาย

เป็นบวก dp/dx มากกว่า 0 ในบริเวณนี้พบว่าแรงเนื่องจากความดันสุทธิกระทำต่อการไหลในทิศตรงข้ามกับทิศการไหล

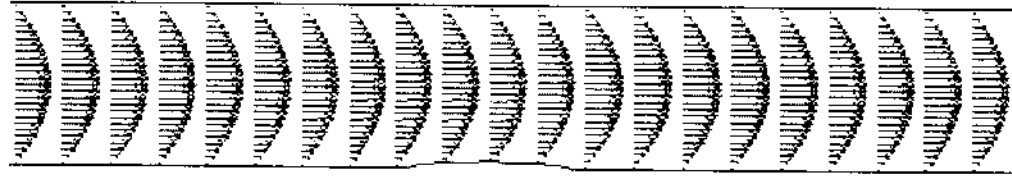
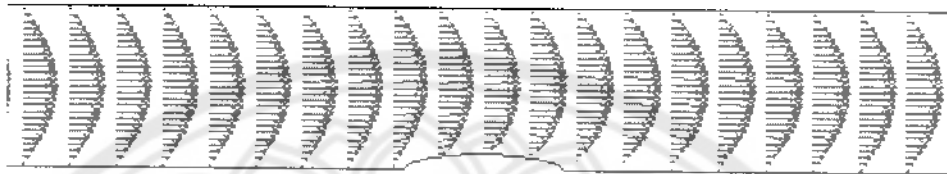
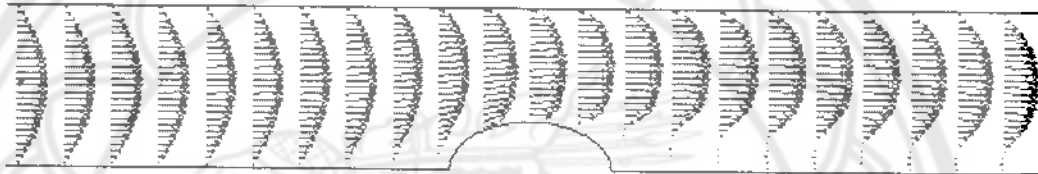
โดยเฉพาะอย่างยิ่งของไหลบริเวณชั้นขีดผิวโค้งของวัตถุนั้นมีโมเมนต์ไม่เพียงพอที่จะเอาชนะแรงเนื่องจากความดันสุทธิในทิศตรงข้ามการไหลได้ ทำให้โมเมนต์ของของไหลลดลงดังแสดงในรูปของเวกเตอร์ความเร็ว จนกระทั่งความเร็วของของไหลนั้นเป็นศูนย์ และจะไหลไปตามทิศของแรงเนื่องจากความดันสุทธิ(ในทิศตรงกันข้ามกับการไหลของกระแสอิสระ)ซึ่งทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณนี้ลดลง



รูปที่ 4.11 ผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สำหรับรอยนูนที่มีความสูงต่างๆ และ $H/L = 0.1$



รูปที่ 4.12 ผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับการไหลผ่านรอยนูนที่ $H/L = 0.1$

(ก). $d/D_d = 0.05$ (ข). $d/D_d = 0.1$ (ค). $d/D_d = 0.3$

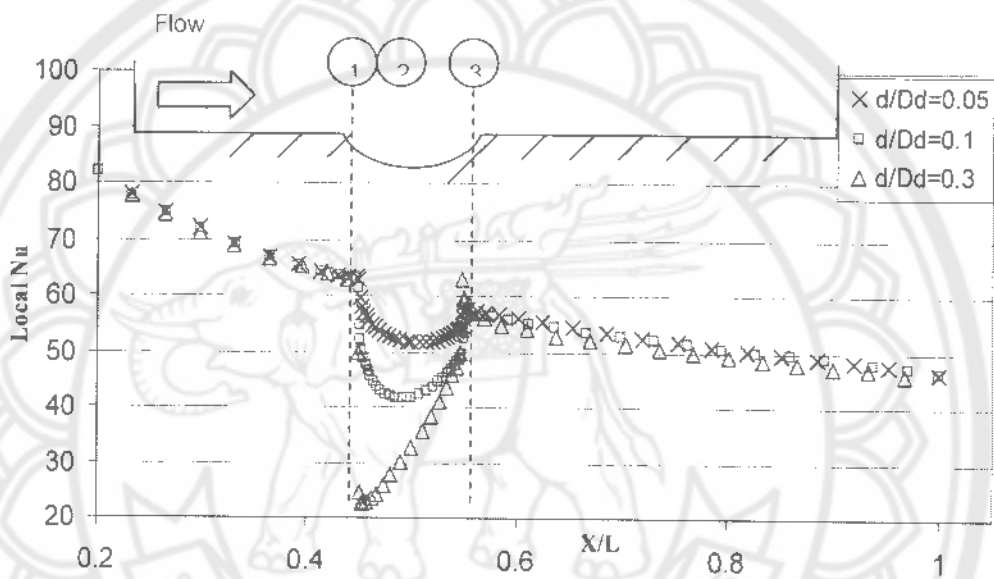
รูปที่ 4.13 การความเร็วของการไหลผ่านช่องการไหลที่มีรอยนูนที่ความสูงของรอยนูนขนาดต่างๆที่ $H/L = 0.1$

4.4.2 ช่องการไหลที่มีพื้นผิวเป็นรอยนูน

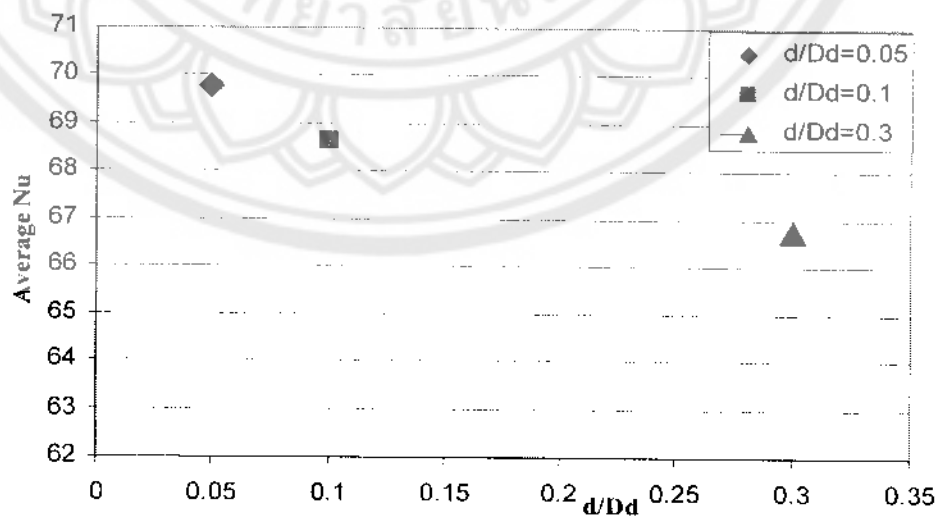
รูปที่ 4.14 แสดงผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ (Local Nu) สำหรับการไหลผ่านพื้นผิวรอยนูนที่มีความลึกต่างๆ พบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของทั้งสามกรณีคล้ายคลึงกัน แต่ระดับของการถ่ายเทความร้อนต่างกัน กล่าวคือการถ่ายเทความร้อนจะลดลงจากทางเข้าจนกระทั่งถึงบริเวณก่อนที่การไหลจะไหลลงรอยนูนและต่ำสุดบริเวณรอยนูนเมื่อการไหลไหลขึ้นรอยนูนจนกระทั่งถึง x/L ประมาณ 0.55 ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของทั้ง 3 กรณีคู่คู่ค่าเดียวกันที่ Nu ประมาณ 58 ที่ $d/D_d = 0.3$ ผลการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณรอยนูนมีค่าต่ำสุดอย่างเห็นได้ชัด (บริเวณ 2 รูป 4.14) โดยที่จุดต่ำสุดของการถ่ายเทความร้อนสำหรับ $d/D_d = 0.3$ น้อยกว่า $d/D_d = 0.05$ คิดเป็น 57.70% และน้อยกว่า $d/D_d = 0.1$ อยู่ 47.62% ส่วนบริเวณก่อนถึงรอยนูนและหลังรอยนูน (บริเวณ 1 และ 3 รูปที่ 4.14) ผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่คู่คู่ค่าเดียวกันจึงไม่ค่อยต่างกัน

รูปที่ 4.15 ผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับการไหลผ่านรอยบุ๋มที่ $H/L = 0.1$ พบว่าที่ d/D_d ค่าสูงๆผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยน้อยกว่าที่ d/D_d ที่มีค่าน้อยๆ กล่าวคือ ที่ $d/D_d = 0.05$ มีผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเห็น 69.79 ที่ $d/D_d = 0.1$ เป็น 68.64 และ $d/D_d = 0.3$ เป็น 66.75 ดังนั้นผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ $d/D_d = 0.3$ น้อยกว่าที่ $d/D_d = 0.05$ อยู่ 4.35% และที่ $d/D_d = 0.1$ อยู่ 2.75%

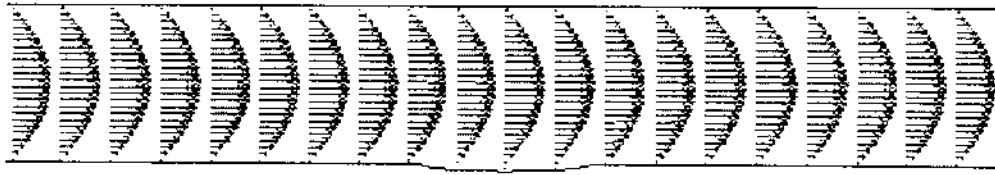
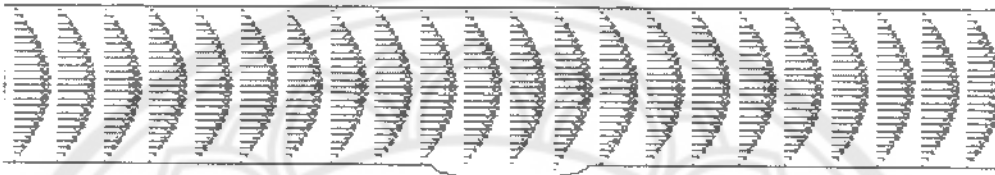
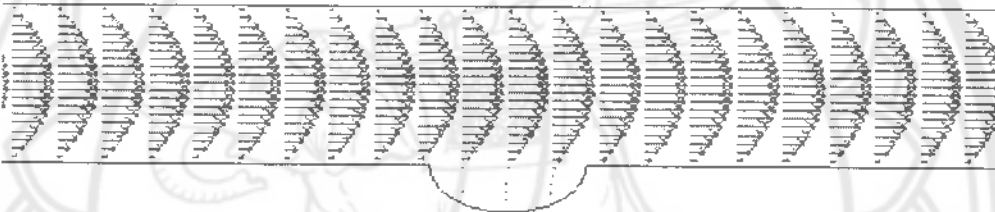
รูปที่ 4.16 แสดงการกระจายความเร็วของการไหลผ่านช่องการไหลที่มีรอยบุ๋มพบว่าความลึกของรอยบุ๋มที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความเร็วของการไหลลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าโมเมนตัมลดลงด้วย (รูป 4.16 ก.) ดังนั้น ผลของการถ่ายเทความร้อนจึงลดลง สังเกตได้จากรูป 4.16 ก., ข. และ ค. ความเร็วบริเวณรอยบุ๋มลดลงเมื่อความค่า d/D_d สูงขึ้น



รูปที่ 4.14 ผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สำหรับรอยบุ๋มที่มีความลึกต่างๆและ $H/L = 0.1$



รูปที่ 4.15 ผลการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสำหรับการไหลผ่านรอยบุ๋มที่ $H/L = 0.1$

(ก). $d/D_d = 0.05$ (ข). $d/D_d = 0.1$ (ค). $d/D_d = 0.3$

รูปที่ 4.16 การกระจายความเร็วของการไหลผ่านช่องการไหลที่มีรอยกุ่มที่ความลึก
ของรอยกุ่มขนาดต่างๆที่ $H/L = 0.1$