บทที่ 6
ผลการทดลองและวิจารณ์

6.1 บทนำ

โดยทั่วไปสมรรถนะทางความร้อนจะสัมพันธ์กับการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน การปรับปรุงสมรรถนะทางความร้อนมักจะได้มาพร้อมกับการสูญเสียความดันที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับของไหลที่ความหนาแน่นต่ำ (ก๊าซ) การปรับปรุงอัตราการถ่ายเทความร้อนมักจะนำไปสู่ความสิ้นเปลืองกำลังทางกลในรูปของพลังงานขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์หรือพัดลม เพราะฉะนั้นการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงจะต้องมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วนทั้งในอัตราการถ่ายเทความร้อนและกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนของไหล

จากการทดลองในบทที่ 5 โดยผลการทดลองมุ่งเน้นที่จะศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และสัมประสิทธิ์แรงเสียดของช่องขนาน ที่มีการฟลักซ์ความร้อนแบบคงที่ (Constant heat flux) โดยการศึกษาจะพิจารณาถึงอิทธิพลของแผ่นครีบในรูปแบบต่างๆ มีสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างช่องขนาน (*e/D*) ที่ทำการศึกษาเท่ากับ 0.20 , 0.25 และ 0.33 และการจัดวางครีบแบบแนวร่องตรงและเยื้อง โดยทำการศึกษาทั้งในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ถึงลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) หรือในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 300 ถึง 20,000

6.2 ผลการทดลองช่องขนานแผ่นเรียบ

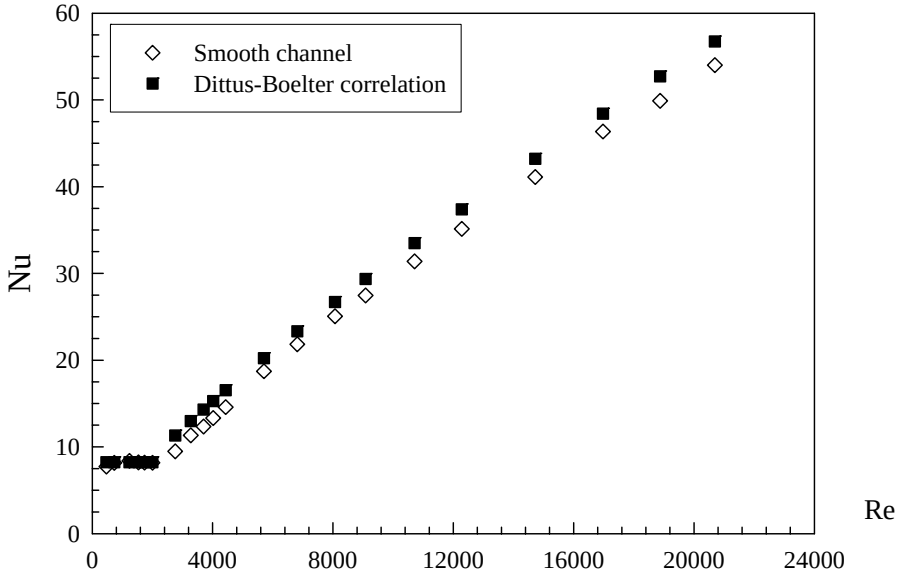
6.2.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number, *Nu*)

จากการทดลองค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานแผ่นเรียบพบว่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ค่าตัวเลขนัสเซิลท์จะมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ค่าหนึ่งๆ จนกระทั่งเมื่อลักษณะการไหลเปลี่ยนเป็นแบบปั่นป่วนหรือค่า *Re* มีค่ามากกว่า 2,300 พบว่าค่าตัวเลข *Nu* จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลข *Re* ที่เพิ่มขึ้นโดยอัตราการเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า *Re* เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้ทางทฤษฎี พบว่าค่าที่ได้ในช่วงการไหลแบบราบเรียบหรือในช่วงค่าเรย์โนลด์ต่ำกว่า 2,300 จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับทางทฤษฎีโดยมีค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ -1.15% และในการการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) จะมีค่าความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับสมการของ Dittus Boelter เฉลี่ยเท่ากับ -8.35 % ดังแสดงในรูปที่ 6.1

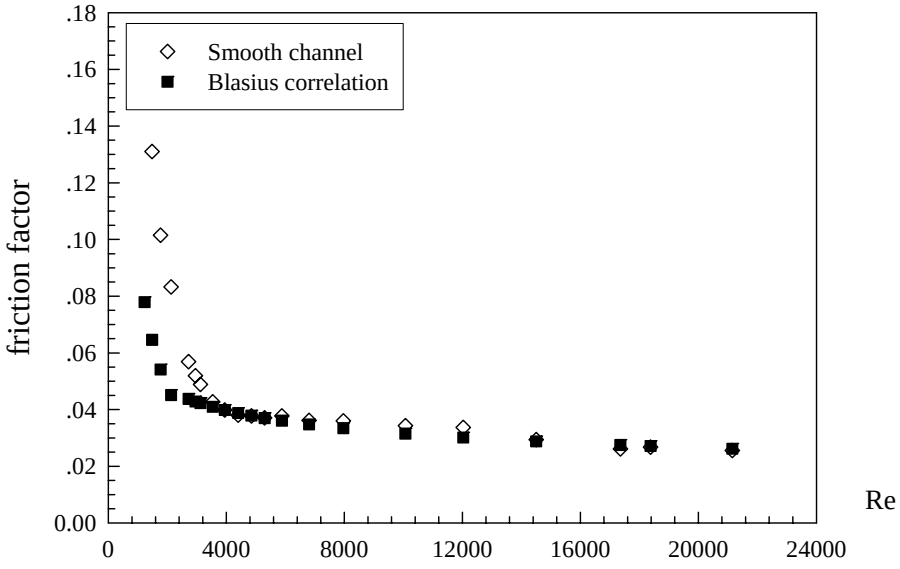
6.2.2 ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor; *f*)

จากการทดลองพบว่าค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานผิวเรียบในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) จะมีค่าค่อนข้างสูงและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งค่า *Re* มี

ค่าประมาณ 3,000 หลังจากนั้นค่าตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องในอัตราที่ไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากทฤษฎีพบว่าจะมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก ในช่วงการไหลแบบราบเรียบค่าที่ได้จากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าค่าทางทฤษฎีเฉลี่ยเท่ากับ 98.51% แต่เมื่อลักษณะการไหลเปลี่ยนเป็นแบบปั่นป่วน หรือค่า *Re* สูงกว่า 2,300 มีค่าความคาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับสมการของ Blasius เฉลี่ยเท่ากับ 5.84% ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ช่องขนานแผ่นเรียบจากการทดลองและค่าทางทฤษฎี

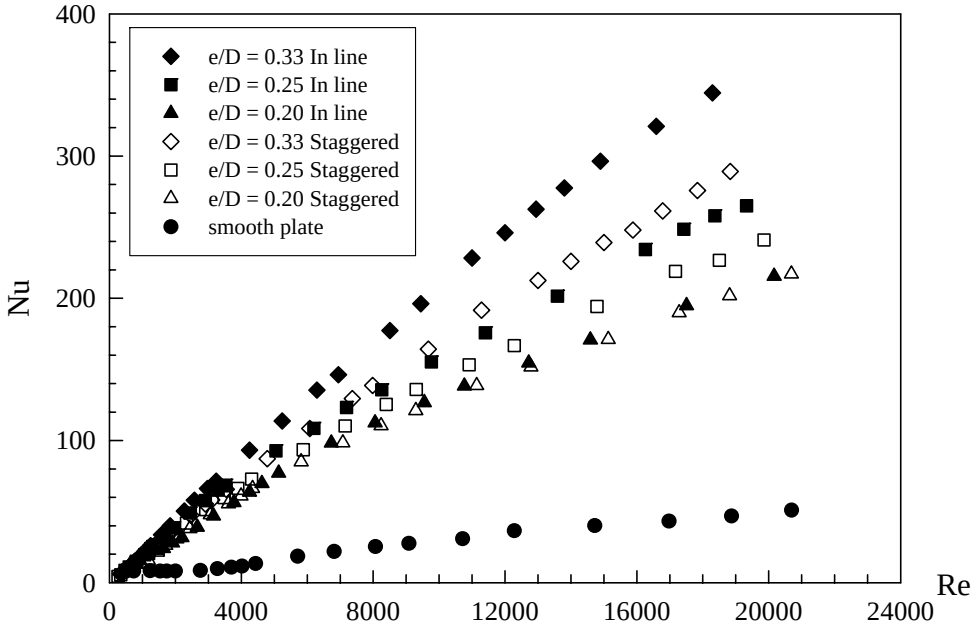


รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานช่องขนานแผ่นเรียบจากการทดลองและค่าทางทฤษฎี

6.3 ช่องขนานที่มีครีบตรง (Straight ribbed plate)

6.3.1 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ของช่องขนานที่มีครีบตรง

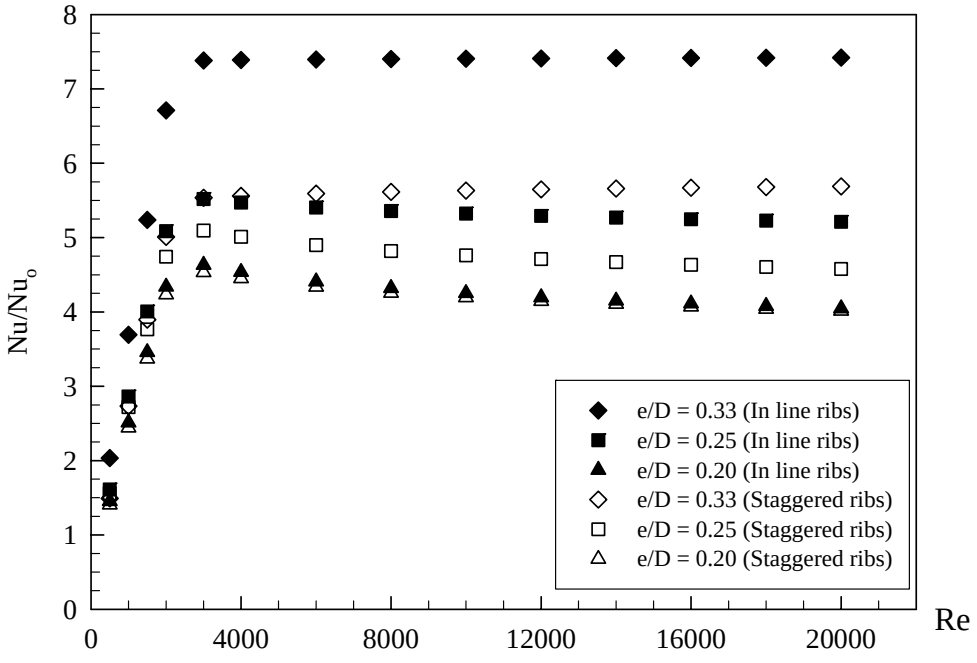
จากรูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบตรง สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่าค่า *Nu* ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่า *Re* ที่เพิ่มขึ้นหรือการไหลที่มีลักษณะปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น โดยแผ่นครีบภายในช่องขนานสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนให้กับการไหลของอากาศที่ไหลผ่านซึ่งจะช่วยทำให้ค่า *Nu* มีค่าสูงขึ้น สำหรับรูปแบบการไหลของอากาศแบบราบเรียบ (Laminar flow) และค่า *Re* มีค่าต่ำกว่า 500 พบว่าค่า *Nu* ของช่องขนานชนิดผิวเรียบและช่องขนานมีครีบทุกประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนลักษณะการวางแนวครีบตรงและแนวครีบเยื้องจะมีค่า *Nu* ใกล้เคียงกันเมื่อค่าตัวเลข *Re* ค่าต่ำกว่า 1,000 หลังจากนั้นค่า *Nu* ของการจัดวางแนวครีบทั้ง 2 ประเภท จะเริ่มมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น โดยลักษณะการจัดวางครีบภายในช่องขนานแบบแนวครีบตรงจะมีค่า *Nu* สูงกว่าแผ่นแนวครีบเยื้อง โดยผลต่างของค่า *Nu* ของการจัดวางแบบแนวครีบตรงและแนวครีบเยื้องจะมีค่าลดน้อยลง เมื่อสัดส่วน *e/D* มีค่าลดลง และค่า *Nu* จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นเมื่อสัดส่วน *e/D* มีค่าเท่ากับ 0.20 สำหรับสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างช่องขนาน (*e/D*) จะมีผลต่อค่า *Nu* อย่างมาก คือที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้ค่า *Nu* สูงกว่าที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20



รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบตรง

6.3.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ช่องขนานที่มีครีบตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

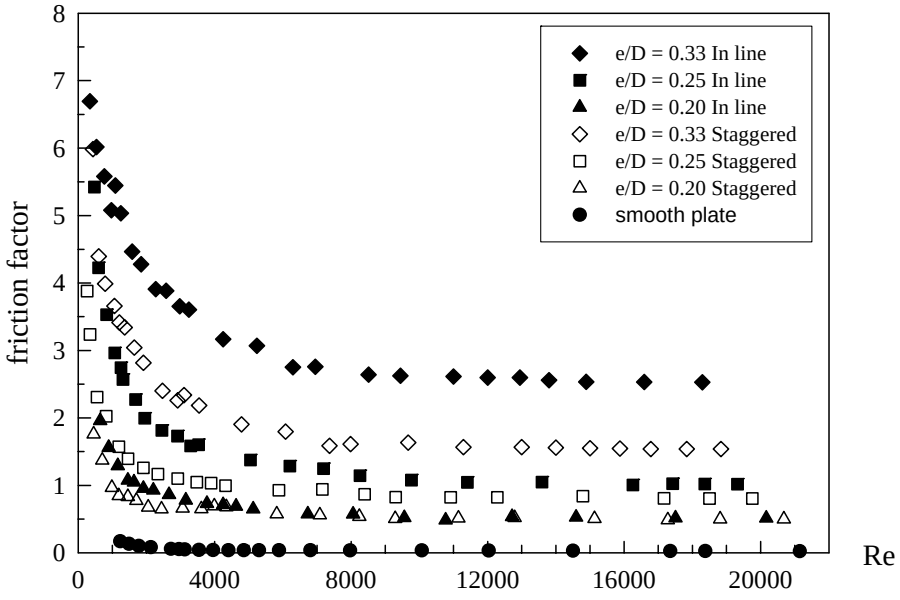
จากรูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ช่องขนานที่มีครีบตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ (Nu/Nu_o) สามารถสรุปผลได้คือ ในช่วงการไหลที่มีความปั่นป่วนไม่มากนักหรือที่ช่วงค่าตัวเลข *Re* ระหว่าง 300-3,000 อัตราส่วน Nu/Nu_o ของช่องขนานทุกชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยช่องขนานทุกประเภทจะมีค่าสูงสุดที่ค่าตัวเลข *Re* เท่ากับ 3,000 หลังจากนั้นค่าอัตราส่วน Nu/Nu_o ของช่องขนานจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อลักษณะการไหลมีความปั่นป่วนมากขึ้นหรือค่าตัวเลข *Re* มีค่าสูงขึ้น โดยช่องขนานที่มีจัดวางแบบแนวครีบตรง ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้อัตราส่วน Nu/Nu_o สูงสุด เมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบตรงประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่า Nu/Nu_o สูงที่สุดเท่ากับ 7.42 ที่ค่า *Re* เท่ากับ 12,000 และมีค่า Nu/Nu_o เฉลี่ยสูงสุดเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.41 เท่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนช่องขนานที่วางแนวครีบตรงและครีบเยื้องที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้ค่าอัตราส่วน Nu/Nu_o ที่มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบตรงประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานชนิดผิวเรียบ เฉลี่ยเท่ากับ 4.27 และ 4.21 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ, Nu/Nu_o

6.3.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานที่มีครีบตรง

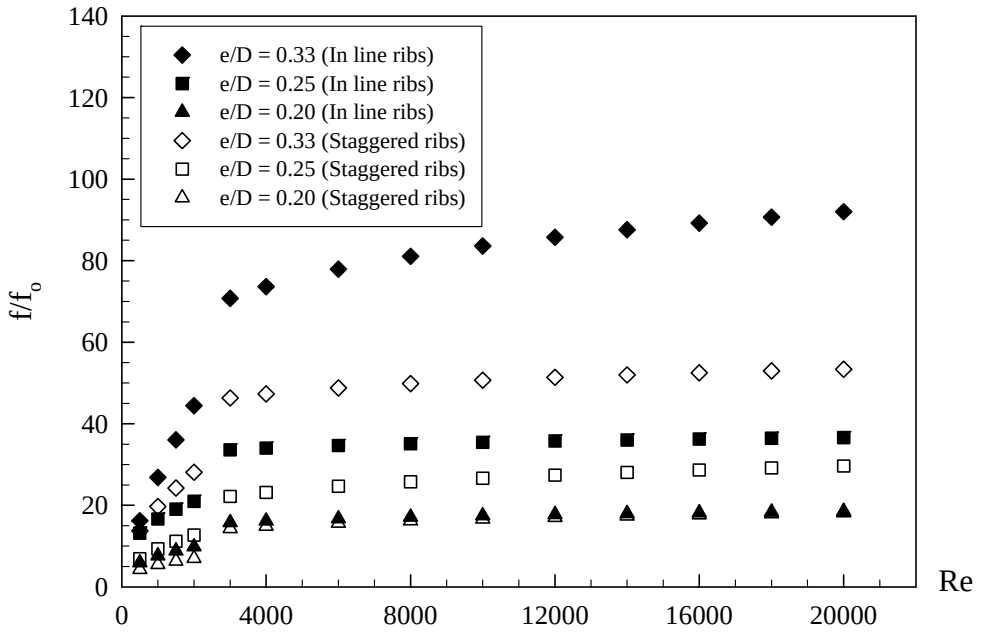
จากรูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นขนานที่มีครีบตรง สามารถสรุปผลการทดลองได้คือ แผ่นครีบภายในช่องขนานจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) ของช่องขนานมีค่าสูงขึ้น โดยที่ค่า f ของช่องขนานทุกประเภทที่ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) จะมีค่าค่อนข้างสูงและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า Re มีค่ามากกว่า 2,300 ค่า f ของช่องขนานทุกประเภทจะมีอัตราการลดลงเพียงเล็กน้อย จนมีแนวโน้มคงที่ที่ค่าหนึ่งๆ โดยที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.33 จะให้ค่า f มากกว่าที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.20 เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.33 ลักษณะการจัดวางแนวครีบภายในช่องขนานจะมีผลต่อค่า f คือการจัดวางแบบแนวครีบตรงจะให้ค่า f สูงกว่าการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง แต่ผลต่างของค่า f ของลักษณะการจัดวางแนวครีบตรงและเยื้องจะมีค่าลดน้อยลง เมื่อสัดส่วน e/D มีค่าลดลง โดยค่า f ของการจัดวางแนวครีบทั้ง 2 ประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นเมื่อสัดส่วน e/D มีค่าเท่ากับ 0.20 สำหรับผลการทดลองพบว่า ช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบตรง และอัตราส่วน e/D เท่ากับ 0.33 ค่า f จะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ประมาณ 2.50 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับช่องขนานประเภทอื่นๆ ส่วนช่องขนานที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.20 และมีการจัดวางทั้งแบบแนวครีบตรงและครีบเยื้อง จะมีแนวโน้มค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำที่สุด โดยจะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ประมาณ 0.50



รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทาน ของช่องขนานที่มีครีบตรง

6.3.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าตัวประกอบเสียดทานช่องขนานที่มีครีบตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

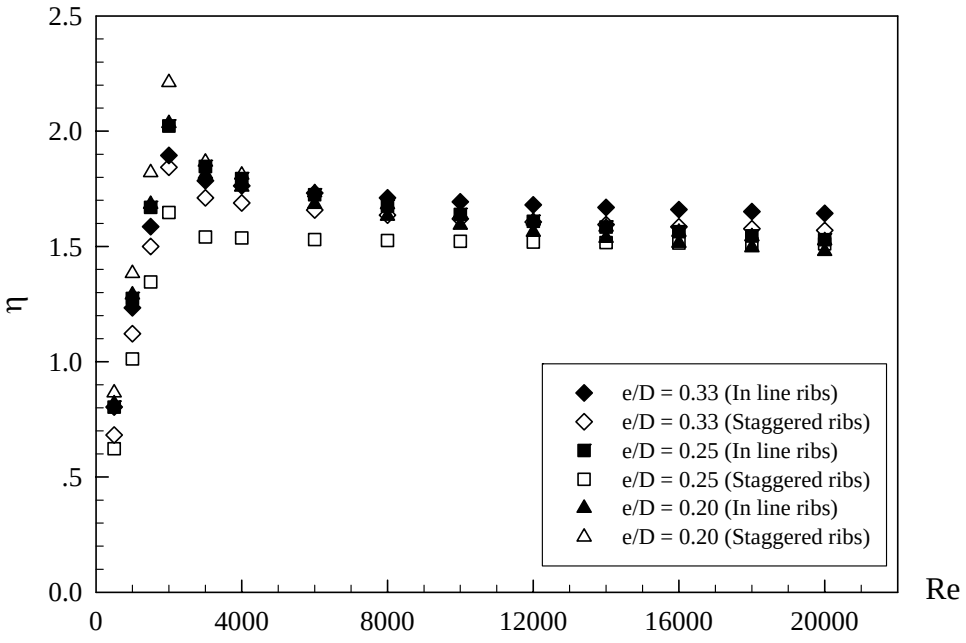
จากรูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นขนานที่มีครีบตรงเทียบกับช่องขนานแผ่นเรียบ (f/f_o) โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้คือ อัตราส่วนค่า f/f_o ของช่องขนานทุกประเภทจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่า *Re* เท่ากับ 3,000 หลังจากนั้นอัตราส่วน f/f_o ของช่องขนานทุกประเภทจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยช่องขนาน ที่มีการจัดวางแบบแนวครีบตรง และสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้อัตราส่วนค่า f/f_o สูงสุด เมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบตรงประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานชนิดผิวเรียบเฉลี่ยเท่ากับ 30.88 เท่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ และ 83.21 ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนช่องขนาน ที่มีการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง และสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้ค่า f/f_o ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับช่องขนานประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานแผ่นเรียบเฉลี่ยเท่ากับ 5.79 เท่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ และ 16.59 เท่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน โดยผลที่ได้ของช่องขนานที่มีครีบตรง จัดวางแบบแนวครีบตรงและครีบเยื้อง และสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้ผลของค่า f/f_o ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของ ช่องขนานที่มีครีบตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

6.3.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบตรง

จากรูปที่ 6.7 พบว่าค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน(η) ของช่องขนาน ที่มีครีบตรง ทุกประเภทในช่วงการไหลแบบราบเรียบจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อค่า *Re* มีค่ามากกว่า 2,000 ค่า η ของช่องขนานที่มีครีบทุกประเภทจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่า *Re* มีค่าประมาณ 10,000 ค่า η ของช่องขนานมีครีบทุกชนิดจะมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย โดยช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะมีค่า η สูงกว่าช่องขนานประเภทอื่นในช่วงค่า *Re* ต่ำกว่า 4,000 หลังจากนั้นช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบตรง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะมีค่า η สูงกว่าช่องขนานประเภทอื่น โดยจะพบว่าค่า η สูงสุดจะเกิดขึ้นกับช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 ที่ค่า *Re* เท่ากับ 2,000 โดยจะมีค่าเท่ากับ 2.21 และมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเช่นเดียวกัน เท่ากับ 1.63 ส่วนช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 จะมีค่า η ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่องขนานประเภทอื่น เมื่อค่า *Re* มีค่าต่ำกว่า 12,000 หลังจากนั้น ช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบตรง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะมีค่า η ต่ำกว่าช่องขนานประเภทอื่นสำหรับค่า η ส่วนช่องขนานครีบตรงที่มีการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 จะมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 1.42

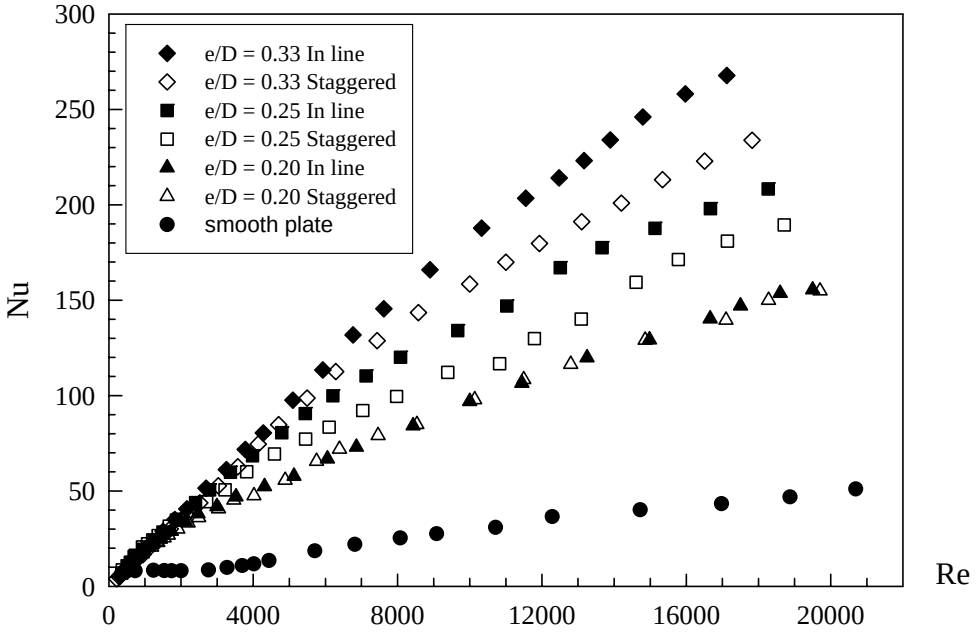


รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (η) ช่องขนานที่มีครีบตรง

6.4 ช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี (V-shaped ribbed plate)

6.4.1 ผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี

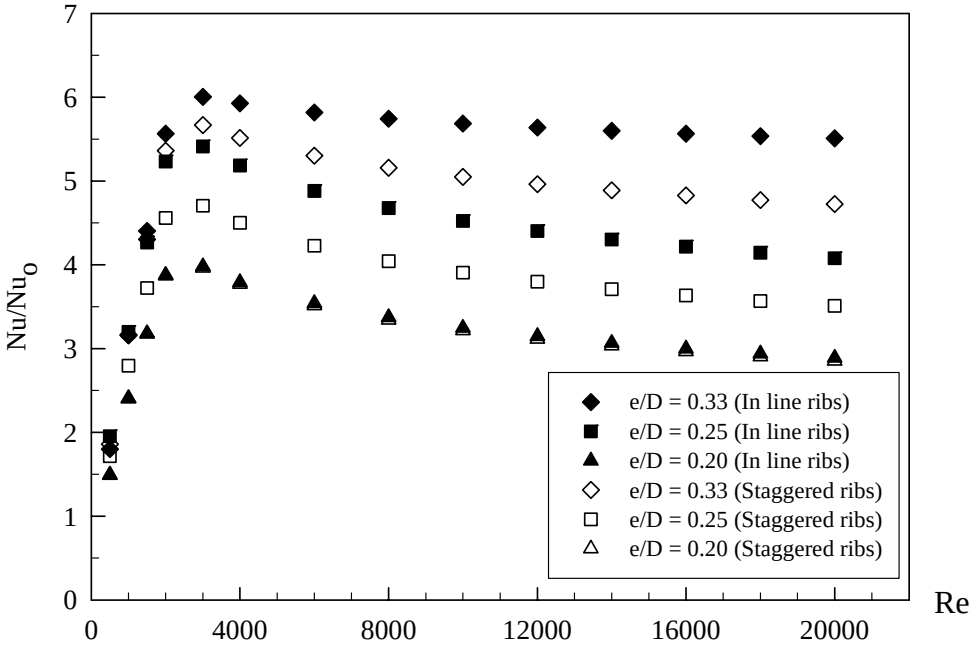
จากรูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่าค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (*Nu*) ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (*Re*) ที่เพิ่มขึ้นหรือการไหลที่มีลักษณะปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น โดยแผ่นครีบภายในช่องขนานสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนให้กับการไหลของอากาศที่ไหลผ่านซึ่งจะช่วยทำให้ค่า *Nu* มีค่าสูงขึ้น สำหรับรูปแบบการไหลของอากาศแบบราบเรียบ (Laminar flow) และค่า *Re* มีค่าต่ำกว่า 500 พบว่าค่า *Nu* ของช่องขนานชนิดผิวเรียบและช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีทุกประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนลักษณะการจัดวางแบบแนวครีบตรงและแนวครีบเยื้องจะมีค่า *Nu* ใกล้เคียงกันเมื่อค่าตัวเลข *Re* ค่าต่ำกว่า 1,200 หลังจากนั้นค่า *Nu* ของการจัดวางแนวครีบทั้ง 2 ประเภท จะเริ่มมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น โดยลักษณะการจัดวางแนวครีบภายในช่องขนานแบบแนวครีบตรงจะให้ค่า *Nu* สูงกว่าแบบแนวครีบเยื้อง โดยผลต่างของค่า *Nu* ของการจัดวางครีบแบบแนวครีบตรงและแนวครีบเยื้องจะมีค่าลดน้อยลง เมื่อสัดส่วน *e/D* มีค่าลดลง และค่า *Nu* จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นเมื่อสัดส่วน *e/D* มีค่าเท่ากับ 0.20 สำหรับสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนาน (*e/D*) จะมีผลต่อค่า *Nu* อย่างมากคือที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้ค่า *Nu* สูงกว่าที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20



รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี

6.4.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่านัสเซิลท์ของช่องขนานมีครีบรูปตัววีต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

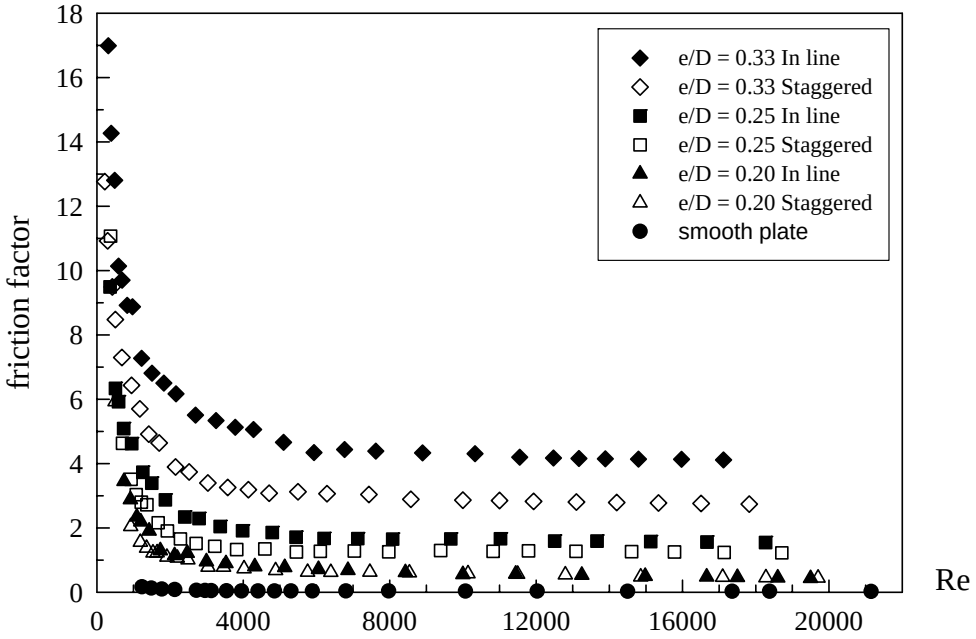
จากรูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีต่อช่องขนานแผ่นเรียบ (Nu/Nu_o) สามารถสรุปผลได้คือ ในช่วงการไหลที่มีความปั่นป่วนไม่มากนักหรือที่ช่วงค่าตัวเลข Re ระหว่าง 300-3,000 อัตราส่วน Nu/Nu_o ของช่องขนานทุกชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยช่องขนานทุกประเภทจะมีค่าสูงสุดที่ค่าตัวเลข Re เท่ากับ 3,000 หลังจากนั้นค่าอัตราส่วน Nu/Nu_o จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อลักษณะการไหลมีความปั่นป่วนมากขึ้นหรือค่าตัวเลข Re มีค่าสูงขึ้น โดยช่องขนานที่จัดวางแบบแนวครีบตรง ที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.33 จะให้อัตราส่วน Nu/Nu_o สูงสุด เมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่า Nu/Nu สูงที่สุดเท่ากับ 6.00 ที่ค่า Re เท่ากับ 3,000 และมีค่า Nu/Nu_o เฉลี่ยสูงสุดเช่นเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ 5.14 เท่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนช่องขนานที่จัดวางแบบแนวครีบตรงและแนวครีบเยื้องที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.20 จะให้ค่าอัตราส่วน Nu/Nu_o ที่มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานแผ่นเรียบ เฉลี่ยเท่ากับ 3.14 และ 3.12 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

6.4.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี

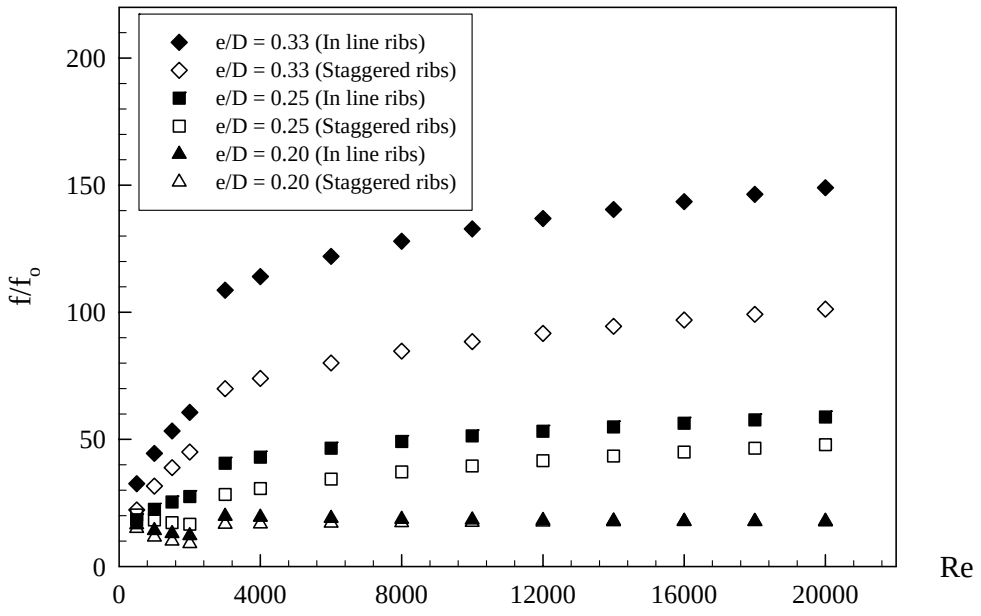
จากรูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานที่มีครีบตัววี โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้คือ แผ่นครีบภายในช่องขนานจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทาน (f) ของช่องขนานมีค่าสูงขึ้น โดยที่ค่า f ของช่องขนานทุกประเภทที่ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) จะมีค่าค่อนข้างสูงและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า Re มีค่ามากกว่า 2,300 ค่า f ของช่องขนานทุกประเภทจะมีอัตราการลดลงเพียงเล็กน้อย จนมีแนวโน้มคงที่ที่ค่าหนึ่งๆ โดยที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.33 จะให้ค่า f มากกว่าที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.20 เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.33 ลักษณะการจัดวางแนวครีบภายในช่องขนานจะมีผลต่อค่า f คือการจัดวางแบบแนวครีบตรงจะมีค่า f สูงกว่าการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง แต่ผลต่างของค่า f ของลักษณะการจัดวางแบบแนวครีบตรงและเยื้องจะมีค่าลดน้อยลง เมื่อสัดส่วน e/D มีค่าลดลง โดยค่า f ของการจัดวางครีบทั้ง 2 ประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นเมื่อสัดส่วน e/D มีค่าเท่ากับ 0.20 สำหรับผลการทดลองพบว่า ช่องขนานที่จัดวางแบบแนวครีบตรง และอัตราส่วน e/D เท่ากับ 0.33 ค่า f จะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ประมาณ 4.10 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีประเภทอื่นๆ ส่วนช่องขนานที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.20 และมีการจัดวางทั้งแบบครีบตรงและครีบเยื้อง จะมีแนวโน้มค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำที่สุด โดยจะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ประมาณ 0.44



รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทาน ของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี

6.4.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และตัวประกอบเสียดทานช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

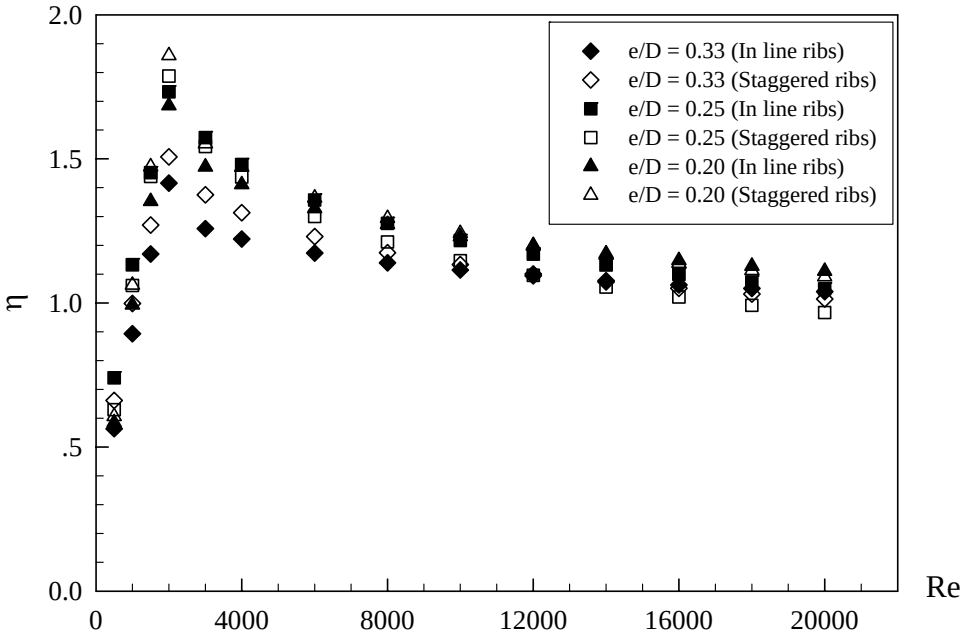
จากรูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นขนานที่มีครีบรูปตัววีเทียบกับแผ่นขนานแผ่นเรียบ (f/f_o)โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้คือ อัตราส่วนค่า f/f_o ของช่องขนานทุกประเภทจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งค่า *Re* มีค่าเท่ากับ 3,000 หลังจากนั้นอัตราส่วน f/f_o ของช่องขนานทุกประเภทจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยช่องขนาน ที่มีการจัดวางแบบแนวครีบตรง และสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้อัตราส่วนค่า f/f_o สูงสุด เมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานชนิดผิวเรียบเฉลี่ยเท่ากับ 47.75 เท่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ และ 132.17 ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี ที่มีการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง และสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้ค่า f/f_o ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบรูปตัววีประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานชนิดแผ่นเรียบเฉลี่ยเท่ากับ 11.41 เท่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ และ 17.38 เท่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน โดยค่าของ f/f_o ของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี จัดวางแบบแนวครีบตรงและครีบเยื้อง และสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้ผลของค่า f/f_o ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน ช่องขนานที่มีครีบตัววีต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

6.4.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี

จากรูปที่ 6.12 พบว่าค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (η) ของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี ทุกประเภทในช่วงการไหลแบบราบเรียบจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อค่า *Re* มีค่ามากกว่า 2,000 ค่า η ของแผ่นครีบทุกประเภทจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งค่า *Re* มีค่าประมาณ 12,000 ค่า η ของช่องขนานทุกชนิดจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยโดยในช่วงค่าตัวเลข Re ต่ำกว่า 10,000 ค่า η ของ ช่องขนานที่มีครีบตัววีทุกประเภทจะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก แต่เมื่อค่าตัวเลข Re มีค่ามากกว่า 10,000 ค่า η ของช่องขนานแต่ละประเภทจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก โดยช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะมีค่า η สูงที่สุดที่ค่าตัวเลข *Re* เท่ากับ 2,000 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.86 และมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเช่นเดียวกันคือเท่ากับ 1.26 ใกล้เคียงกับช่องขนานช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบตรงและอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.25 ส่วนช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบตรง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะมีค่า η เฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่องขนานประเภทอื่นในทุกช่วงอัตราการไหล โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.09

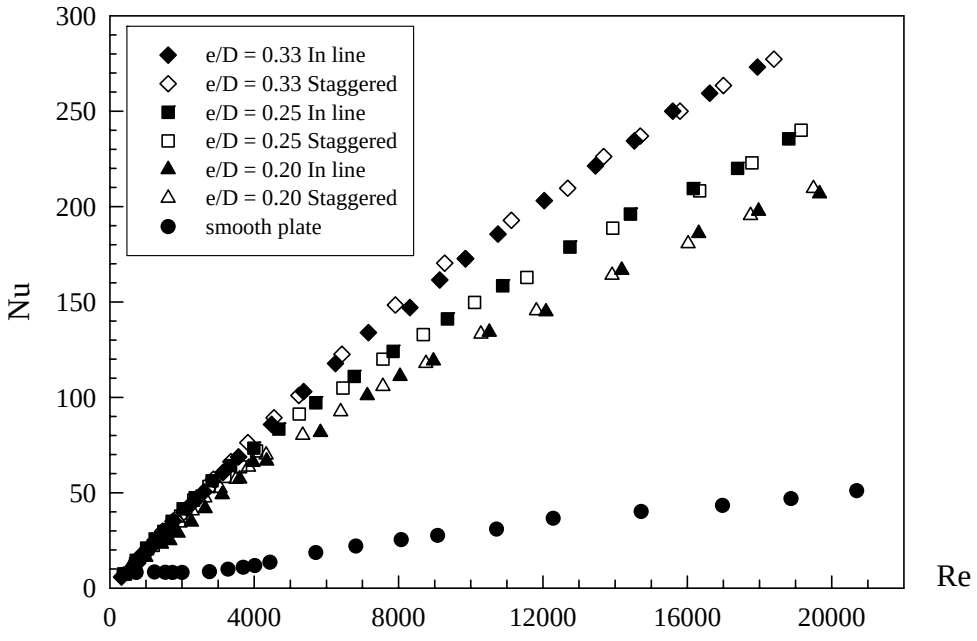


รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี

6.5 ช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง (Ribbed grooved plate)

6.5.1 ผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง

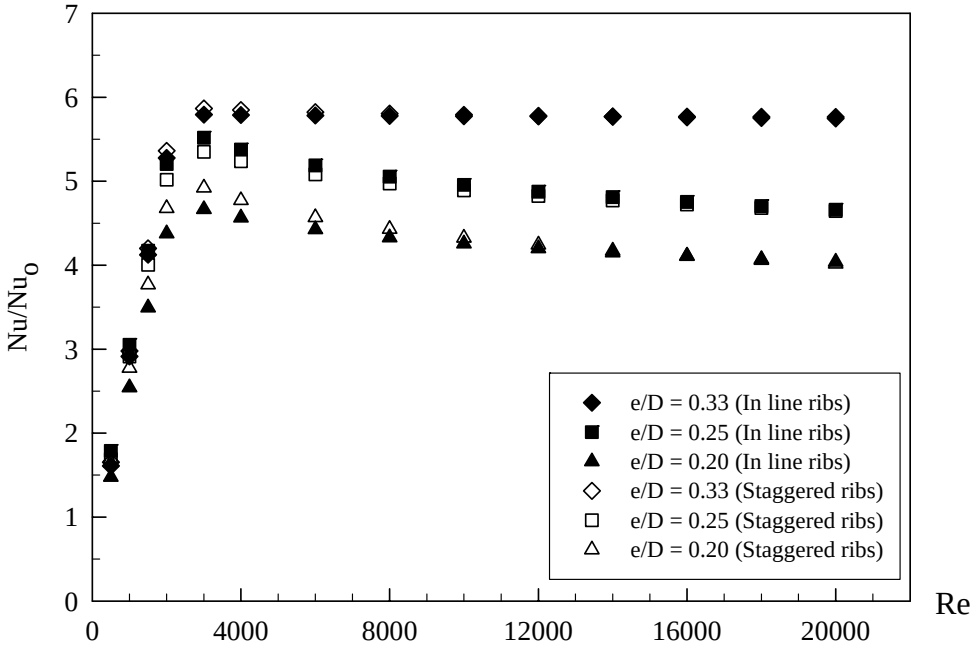
จากรูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของแผ่นขนานที่มีครีบและร่องตรง สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่าค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (*Nu*) ของช่องขนานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (*Re*) ที่เพิ่มขึ้นหรือการไหลที่มีลักษณะปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น โดยแผ่นครีบและร่องภายในช่องขนานสามารถช่วยเพิ่มความปั่นป่วนให้กับการไหลของอากาศที่ไหลผ่านซึ่งจะช่วยทำให้ค่า *Nu* มีค่าสูงขึ้น สำหรับรูปแบบการไหลของอากาศแบบราบเรียบ (Laminar flow) และค่า *Re* มีค่าต่ำกว่า 500 พบว่าค่า *Nu* ของช่องขนานชนิดแผ่นเรียบและช่องขนานมีครีบทุกประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างช่องขนาน (*e/D*) จะมีผลต่อค่า *Nu* อย่างมากคือที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้ค่า *Nu* สูงกว่าที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 โดยการจัดวางแบบแนวครีบตรงและครีบเยื้องให้ค่า *Nu* ไม่แตกต่างกันมากนัก จากการทดลองจะพบว่า ที่อัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 และ 0.33 ขอบเขตค่า *Re* ที่ทดลองได้จะมีลดลงทั้งนี้เนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นในชุดทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากช่องว่างที่ให้อากาศผ่านมีค่าลดน้อยลงทำให้ปริมาณลมที่ผ่านชุดทดสอบได้มีค่าน้อยลงตามไปด้วย



รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง

6.5.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

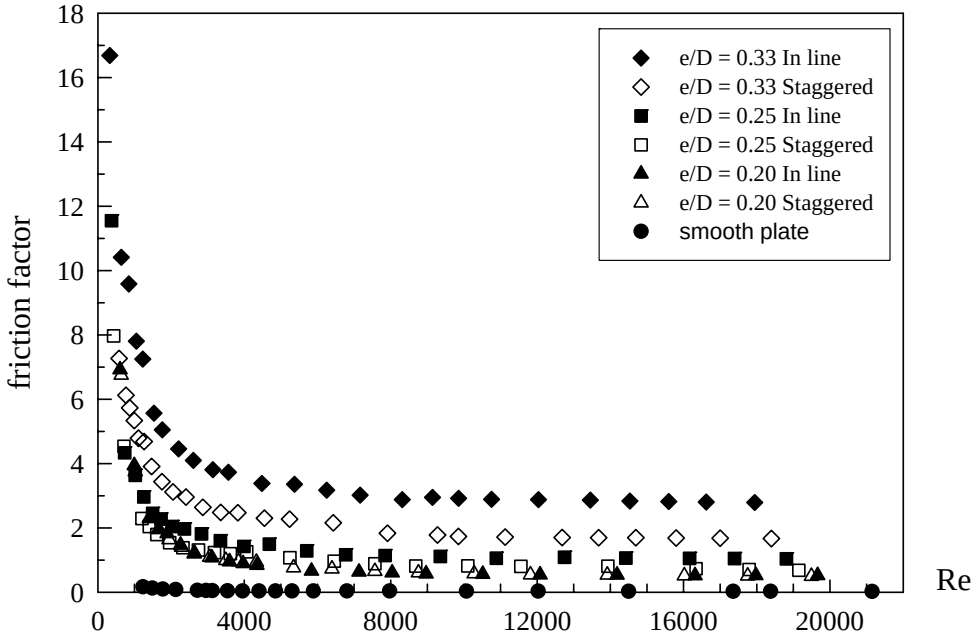
จากรูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number , *Re*) และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ (Nu/Nu_o) สามารถสรุปผลได้คือ การจัดวางแบบแนวครีบตรงและแนวครีบเยื้องจะไม่ส่งผลถึงค่าตัวเลข *Nu* โดยในช่วงการไหลที่มีความปั่นป่วนไม่มากนักหรือที่ช่วงค่าตัวเลข *Re* ระหว่าง 300-3,000 อัตราส่วน Nu/Nu_o ของช่องขนานทุกชนิดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยช่องขนานทุกประเภทจะมีค่าสูงสุดที่ค่าตัวเลข *Re* เท่ากับ 3,000 หลังจากนั้นค่าอัตราส่วน Nu/Nu_o ของช่องขนานทุกประเภทจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อลักษณะการไหลมีความปั่นป่วนมากขึ้นหรือค่าตัวเลข *Re* มีค่าสูงขึ้น โดยที่ช่องขนานที่มีการจัดวางแบบครีบเยื้องและสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้อัตราส่วน Nu/Nu_o สูงสุด เมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่า Nu/Nu_o สูงที่สุดเท่ากับ 5.86 ที่ *Re* เท่ากับ 3,000 และมีค่า Nu/Nu_o เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 5.79 เท่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 และจัดวางแบบแนวครีบตรงจะให้ค่าอัตราส่วน Nu/Nu_o มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานชนิดผิวเรียบ เฉลี่ยเท่ากับ 4.28 เท่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง ต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

6.5.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง

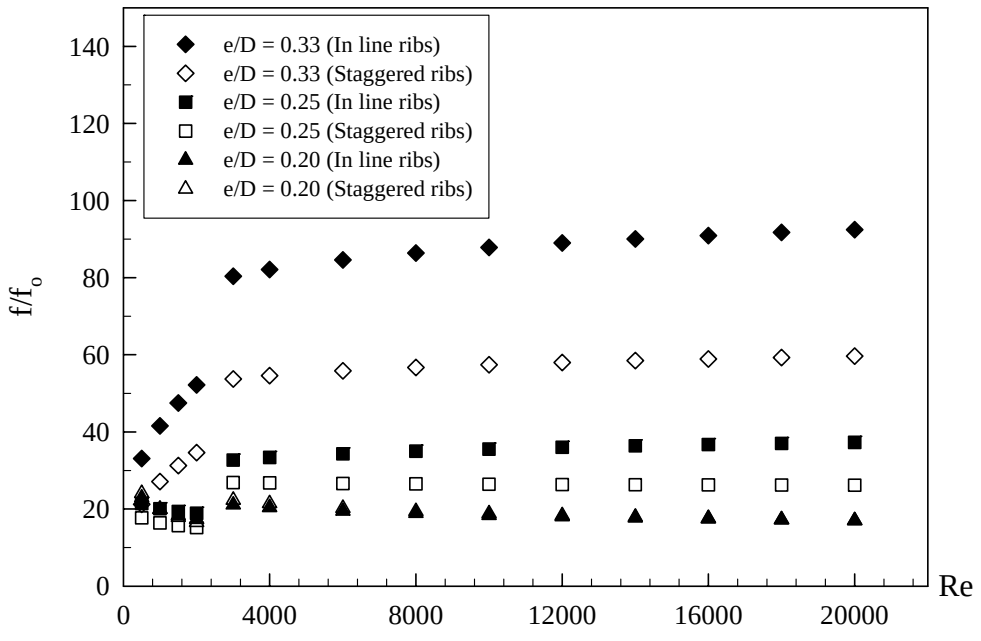
จากรูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ (*Re*) และค่าตัวประกอบเสียดทาน (*f*) ของแผ่นขนานที่มีครีบและร่องตรง โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้คือ แผ่นครีบภายในช่องขนานจะทำให้ค่า f ของช่องขนานมีค่าสูงขึ้น โดยที่ค่า f ของช่องขนานทุกประเภทที่ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) จะมีค่าค่อนข้างสูงและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า *Re* มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่า *Re* มีค่ามากกว่า 2,500 ค่า f ของช่องขนานทุกประเภทจะมีอัตราลดลงเพียงเล็กน้อย จนมีแนวโน้มคงที่ที่ค่าหนึ่งๆ โดยที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้ค่า f มากกว่าที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 เมื่อพิจารณาที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 ลักษณะการจัดวางแนวครีบภายในช่องขนานจะมีผลต่อค่า f คือการจัดวางแบบแนวครีบตรงจะมีค่า f สูงกว่าการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง แต่ผลต่างของค่า f ของลักษณะการจัดวางครีบตรงและเยื้องจะมีค่าลดน้อยลง เมื่อสัดส่วน *e/D* มีค่าลดลง โดยค่า f ของการจัดวางครีบทั้ง 2 ประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้นเมื่อสัดส่วน *e/D* มีค่าเท่ากับ 0.20 สำหรับผลการทดลองพบว่า ช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง ที่จัดวางแบบแนวครีบตรงและอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 ค่า f จะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ประมาณ 2.75 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงประเภทอื่นๆ ส่วนช่องขนานที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 และมีการจัดวางทั้งแบบแนวครีบตรงและครีบเยื้อง จะมีแนวโน้มค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำที่สุด โดยจะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าคงที่ที่ประมาณ 0.50



รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทาน ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง

6.5.4 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

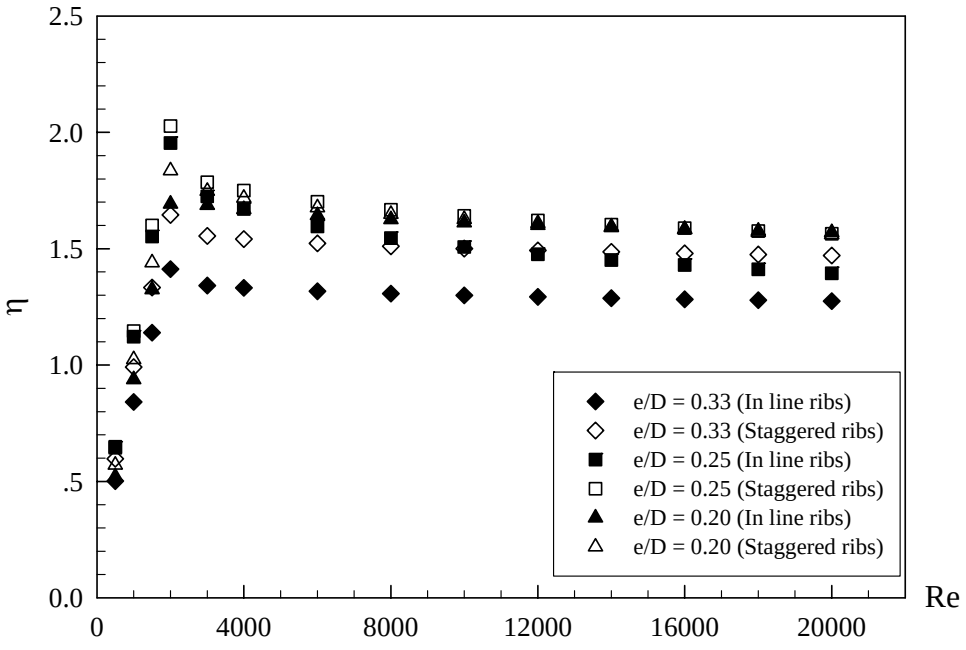
จากรูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์และค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นขนานที่มีครีบและร่องตรงเทียบกับช่องขนานแผ่นเรียบ (f/f_o) โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้คือ อัตราส่วนค่า f/f_o ของช่องขนานทุกประเภทจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงค่า *Re* เท่ากับ 3,000 หลังจากนั้นอัตราส่วน f/f_o ของช่องขนานทุกประเภทจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง ที่จัดวางแบบแนวครีบตรง และสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะให้อัตราส่วนค่า f/f_o สูงสุด เมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานชนิดแผ่นเรียบเฉลี่ยเท่ากับ 43.56 เท่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ และ 87.54 เท่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง ที่จัดวางแบบแนวครีบเยื้องและสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้ค่า f/f_o ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงประเภทอื่นๆ โดยจะมีค่ามากกว่าช่องขนานแผ่นเรียบเฉลี่ยเท่ากับ 16.23 เท่าในช่วงการไหลแบบราบเรียบ ส่วนการจัดวางแบบแนวครีบเยื้องและสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้เฉลี่ยต่ำที่สุดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเท่ากับ 19.03 เท่าโดยผลที่ได้ของช่องขนานที่มีครีบตรง จัดวางแบบครีบตรงและครีบเยื้อง และสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้ผลของค่า f/f_o ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และตัวประกอบเสียดทาน ช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

6.5.5 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง

จากรูปที่ 6.17 พบว่าค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง ทุกประเภทในช่วงการไหลแบบราบเรียบจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อค่า *Re* มีค่ามากกว่า 2,000 ค่า η ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงทุกประเภทจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งค่า *Re* มีค่าประมาณ 8,000 ค่า η ของแผ่นครีบทุกชนิดจะมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย โดยช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 จะมีค่า η สูงกว่าช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงประเภทอื่นในช่วงค่าตัวเลข *Re* ต่ำกว่า 8,000 โดยมีค่า η สูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.03 ที่ค่า *Re* เท่ากับ 2,000 และมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเช่นเดียวกันเท่ากับ 1.56 หลังจากนั้นช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงที่มีการจัดวางแบบครีบเยื้อง อัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 และการจัดวางแบบครีบตรง อัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะมีค่าสูงกว่าช่องขนานประเภทอื่นๆและมีค่าใกล้เคียงกัน ทุกช่วงอัตราการไหล ส่วนช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแนวครีบตรง และอัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะมีค่า η ต่ำที่สุดตลอดทุกช่วงอัตราการไหล โดยมีค่าต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.21



รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง

6.6 การเปรียบผลการทดลองของช่องขนานที่มีครีบประเภทต่างๆที่สัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างช่องขนาน (*e/D*) เท่ากัน

6.6.1 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20

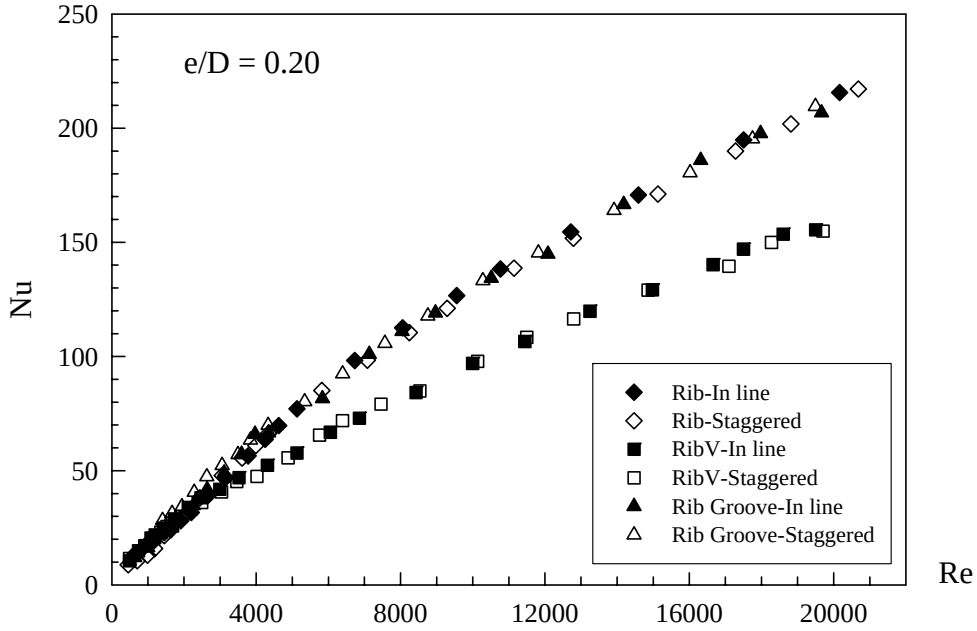
จากรูปที่ 6.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 พบว่าอัตราการไหลที่มีความปั่นป่วนไม่มากนักหรือค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 3,000 ค่า *Nu* ของช่องขนานมีครีบทุกประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อการไหลมีความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น ช่องขนานที่มีครีบตรงและช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง จะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นเท่าๆกัน และเมื่อพิจารณารูปแบบการจัดวางครีบแบบแนวครีบตรงและแนวครีบเยื้อง พบว่าไม่มีความแตกต่างของการจัดวางครีบทั้งสองประเภท ส่วนช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี จะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าตัวเลข *Nu* น้อยกว่าครีบทั้งสองประเภทที่ได้กล่าวในข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 6.18

6.6.2 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25

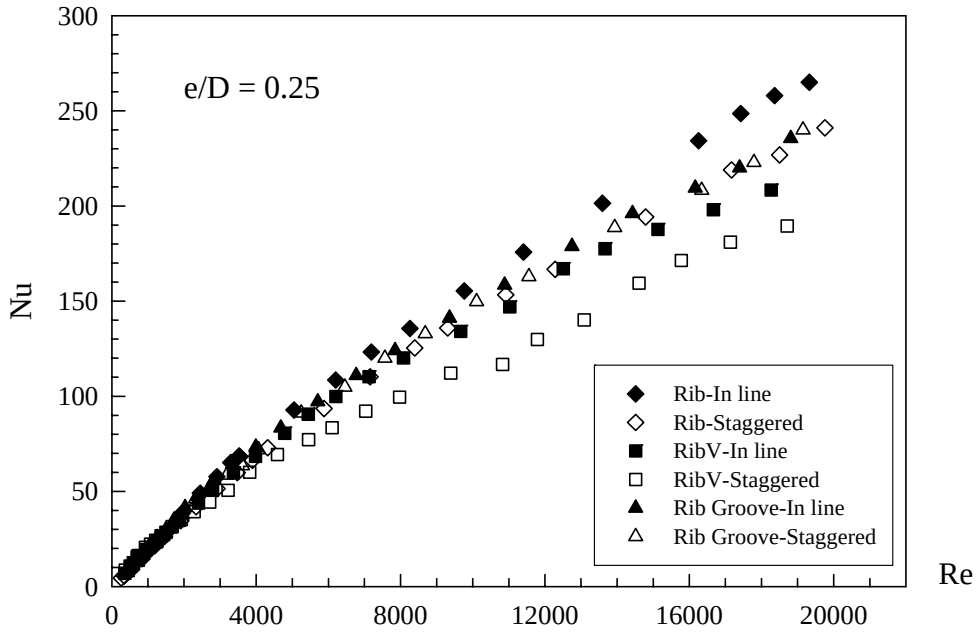
จากรูปที่ 6.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 พบว่าที่อัตราการไหลที่มีความปั่นป่วนไม่มากนักหรือค่า *Re* ต่ำกว่า 3,000 ค่า *Nu* ของช่องขนานที่มีครีบทุกประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อการไหลมีความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น ช่องขนานที่มีครีบตรงจะมีการเพิ่มขึ้นของค่า *Nu* มากที่สุด ตามมาด้วยช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง ส่วนช่องขนานครีบรูปตัววี จะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าครีบทั้งสองประเภท โดยเฉพาะครีบรูปตัววี ที่มีจัดวางแบบแนวครีบเยื้องซึ่งจะการเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6.19

6.6.3 ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33

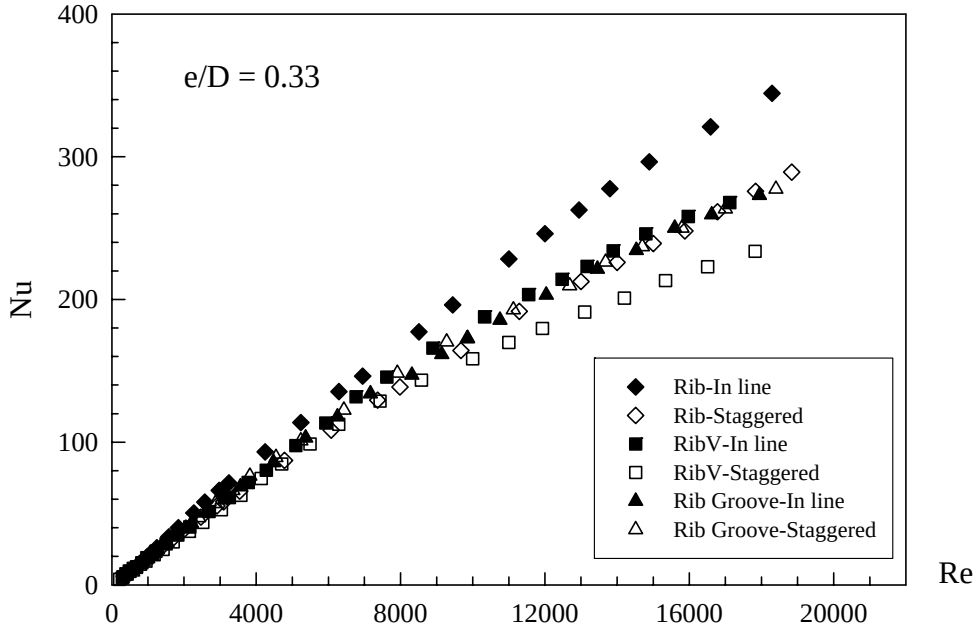
จากรูปที่ 6.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานที่มีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 พบว่าที่อัตราการไหลที่มีความปั่นป่วนไม่มากนักหรือค่าตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 2,000 ค่า *Nu* ของช่องขนานที่มีครีบทุกประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อการไหลมีความปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น ช่องขนานที่มีครีบตรง ที่จัดวางแบบแนวครีบตรง จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า *Nu* มากที่สุด ส่วนช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี จัดวางแบบแนวครีบเยื้องจะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า *Nu* น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20



รูปที่ 6.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25



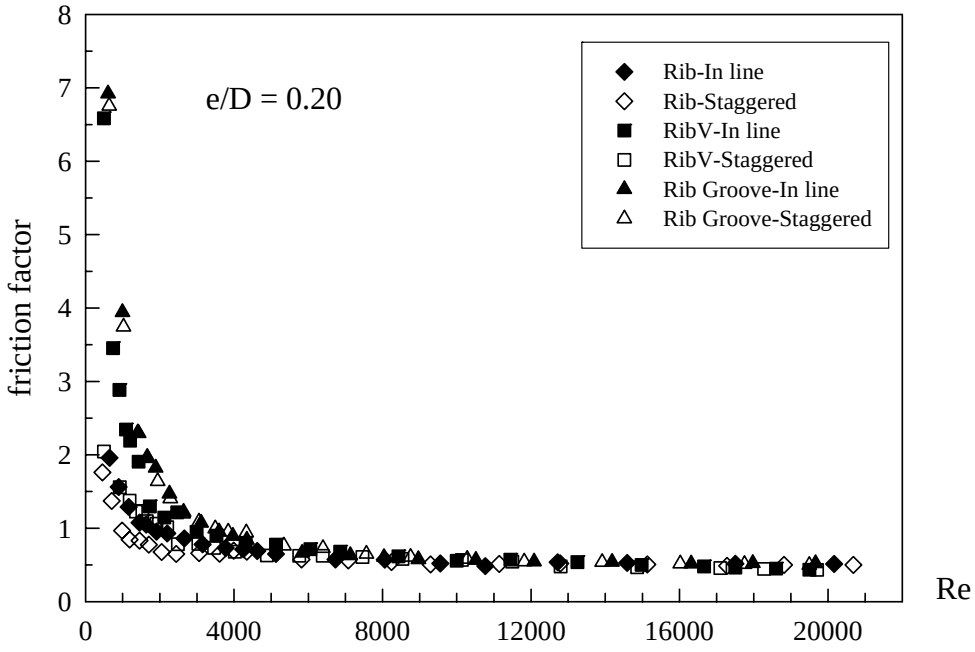
รูปที่ 6.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33

6.6.4 ค่าตัวประกอบเสียดทาน ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20

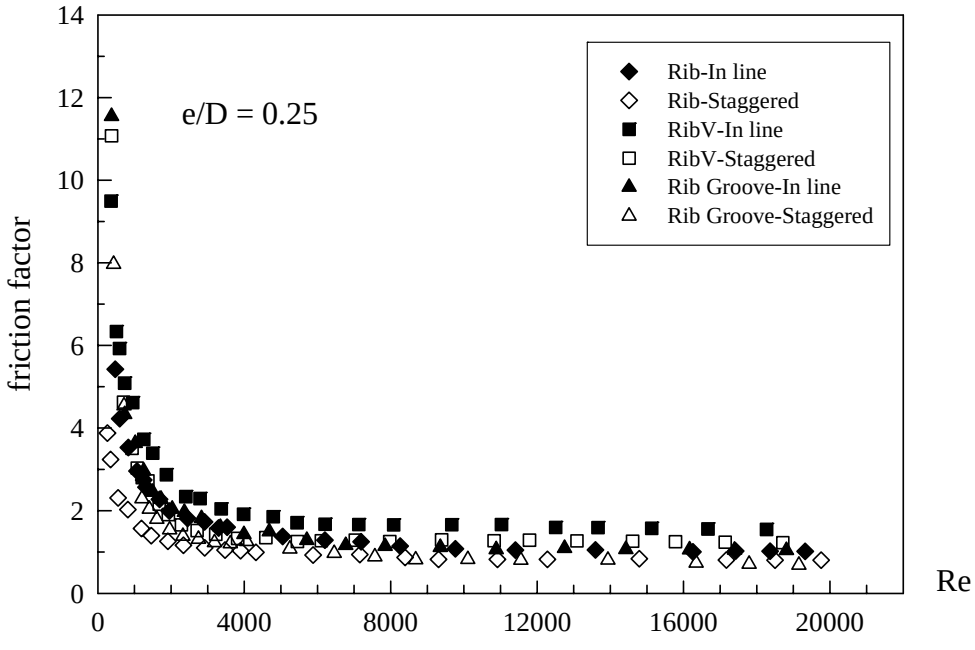
จากรูปที่ 6.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 พบว่า ค่า f ในช่วงที่มีการไหลปั่นป่วนไม่มากนัก หรือมีค่า *Re* ต่ำกว่า 4,000 จะมีความแตกต่างกันค่อนข้างของค่า f ในแต่ละประเภท โดยช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง จะมีค่า f มากที่สุดใกล้เคียงกับช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี จัดวางแบบแนวครีบตรง ส่วนช่องขนานที่มีครีบตรง จัดวางแบบแนวครีบเยื้องจะมีค่า f ต่ำที่สุด ในช่วงการไหลปั่นป่วนไม่มาก แต่เมื่ออัตราการไหลที่มีความปั่นป่วนมากขึ้น หรือในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4,000 ช่องขนานมีครีบทุกประเภทจะมีค่า f ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.21

6.6.5 ค่าตัวประกอบเสียดทาน ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25

จากรูปที่ 6.22 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 พบว่าช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี จัดวางแบบแนวครีบตรง จะให้ค่า f มากที่สุดเมื่อเทียบกับช่องขนานที่มีครีบประเภทอื่นๆ โดยช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง จัดวางแบบแนวครีบเยื้องจะให้ผลของค่า f ต่ำที่สุด และในช่วงอัตราค่า *Re* ที่สูงขึ้นก็จะมีความแตกต่างกันของค่า f ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้เมื่อสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 ดังแสดงในรูปที่ 6.22



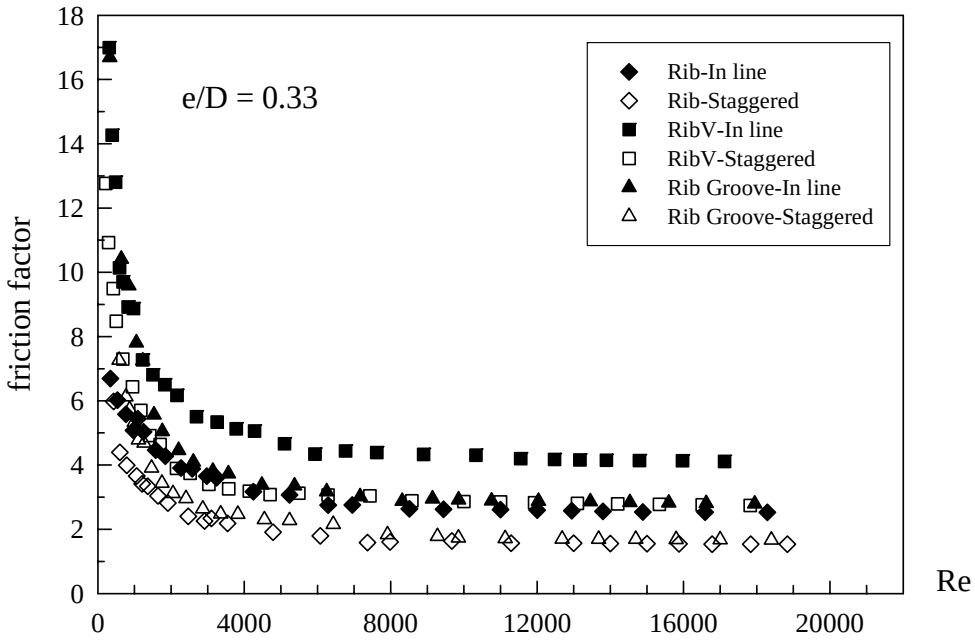
รูปที่ 6.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20



รูปที่ 6.22 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25

6.6.6 ค่าตัวประกอบเสียดทาน ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33

จากรูปที่ 6.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 พบว่าช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี จัดวางแบบแนวครีบตรง จะให้ตัวประกอบเสียดทานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับช่องชนานประเภทอื่นๆ โดยช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงจัดวางแบบแนวครีบเยื้องจะให้ผลของค่า f ต่ำที่สุด ในช่วงอัตราค่า *Re* ที่สูงขึ้นก็จะมีความแตกต่างกันของค่า f ในแต่ละประเภทของครีบมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้เมื่อสัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 ดังแสดงในรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานของช่องขนานมีครีบประเภทต่างๆ ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33

6.7 ผลการเปรียบเทียบค่าสูง-ต่ำสุดของช่องขนานประเภทต่างๆ

6.7.1 ผลเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์สูง-ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภท

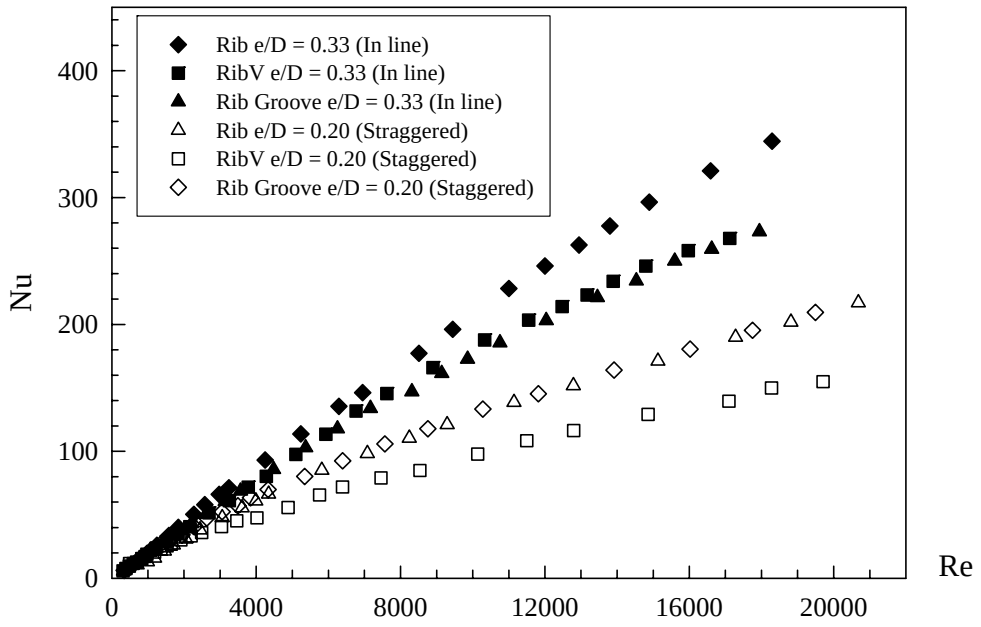
จากการเปรียบเทียบผลของค่าตัวเลขนัสเซิลท์สูงสุดของช่องขนานแต่ละประเภทพบว่าช่องขนานที่มีครีบตรง ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นมากกว่าช่องขนานครีบตัววี ส่วนช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะให้ค่า *Nu* ที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับช่องขนานมีครีบประเภทอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.24

6.7.2 ผลเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์สูง-ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภทเทียบกับช่องขนานแผ่นเรียบ

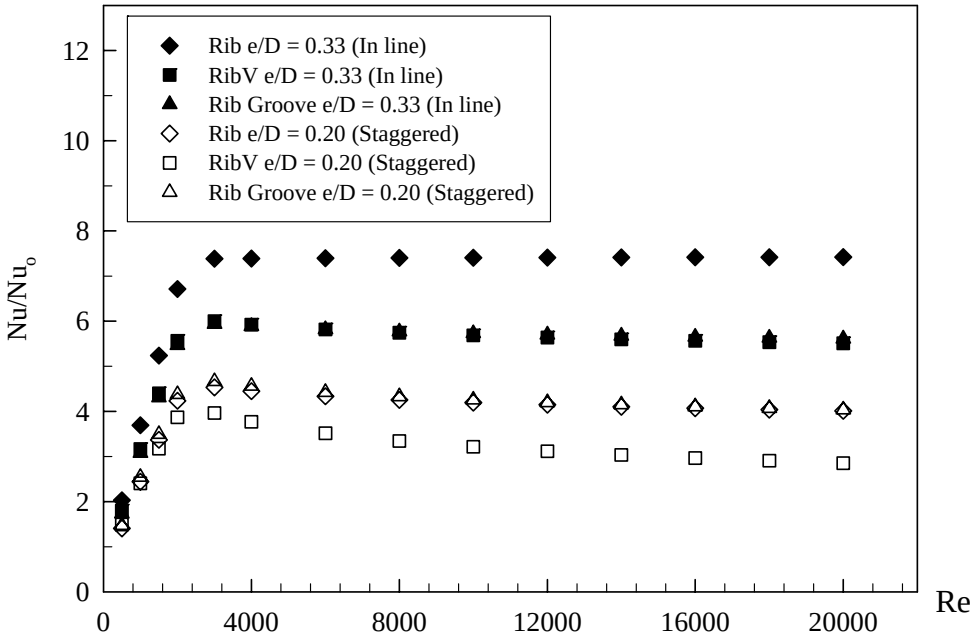
จากการเปรียบเทียบผลของค่าตัวเลขนัสเซิลท์สูงสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภทเทียบกับช่องขนานผิวเรียบ พบว่าช่องขนานที่มีครีบตรงจะมีค่าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับช่องขนานมีครีบประเภทอื่น ส่วนช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี ที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.20 จะให้ค่า Nu/Nu_o ที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับช่องขนานมีครีบประเภทอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.25

6.7.3 ผลเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานสูง-ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภท

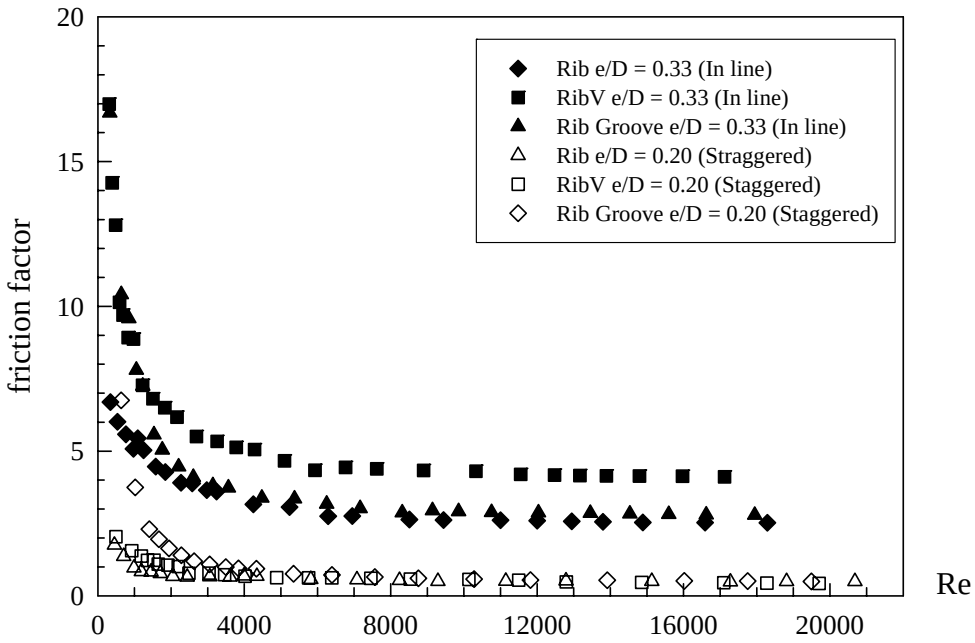
จากการเปรียบเทียบผลของค่าตัวประกอบเสียดทานสูงสุดของช่องขนานแต่ละประเภทพบว่าช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี และสัดส่วน e/D เท่ากับ 0.33 จัดวางแบบครีบตรงจะมีค่าสูงที่สุด ส่วนช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง จะมีค่าต่ำที่สุดใกล้เคียงกับช่องขนานที่มีครีบตรง ยกเว้นช่วงการไหลแบบที่มีความปั่นป่วนไม่มากนัก ที่ช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง จะมีค่าสูงกว่า ช่องขนานที่มีครีบตรง สำหรับค่าตัวประกอบเสียดทานต่ำสุดของช่องขนานแต่ละประเภทพบว่าช่องขนานที่มีครีบตรง ที่จัดวางแบบครีบเยื้อง และสัดส่วน e/D เท่ากับ 0.20 จะให้แนวโน้มของค่า f ต่ำที่สุด และช่องขนานทุกประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออัตราการไหลมีความปั่นป่วนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.26



รูปที่ 6.24 แสดงผลเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์สูง-ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภท



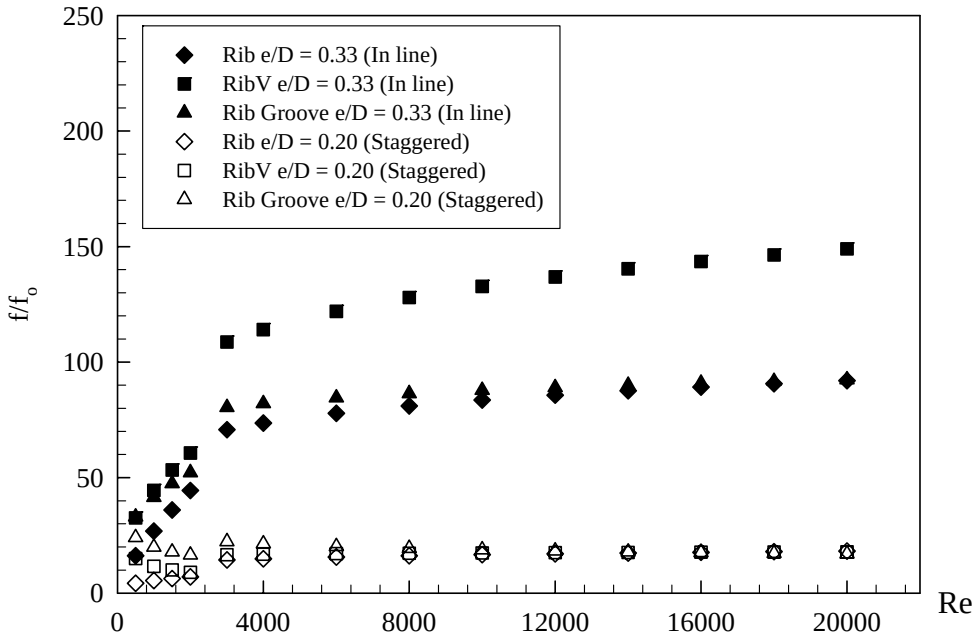
รูปที่ 6.25 แสดงผลเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์สูง-ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภทเทียบกับช่องขนานแผ่นเรียบ



รูปที่ 6.26 แสดงผลเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานสูง-ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภท

6.7.4 ผลเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานสูง-ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภทเทียบกับช่องขนานแผ่นเรียบ

จากการเปรียบเทียบผลของค่าตัวประกอบเสียดทานสูงสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภทสูงสุดเทียบกับช่องขนานแผ่นเรียบพบว่าช่องขนานที่มีครีบรูปตัววี สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.33 จัดวางแบบแนวครีบตรงจะมีค่าสูงที่สุด เมื่อเทียบกับช่องขนานมีครีบประเภทอื่น ส่วนค่า f/f_o ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบตรง ครีบตัววี และครีบและร่องตรง จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 6.27

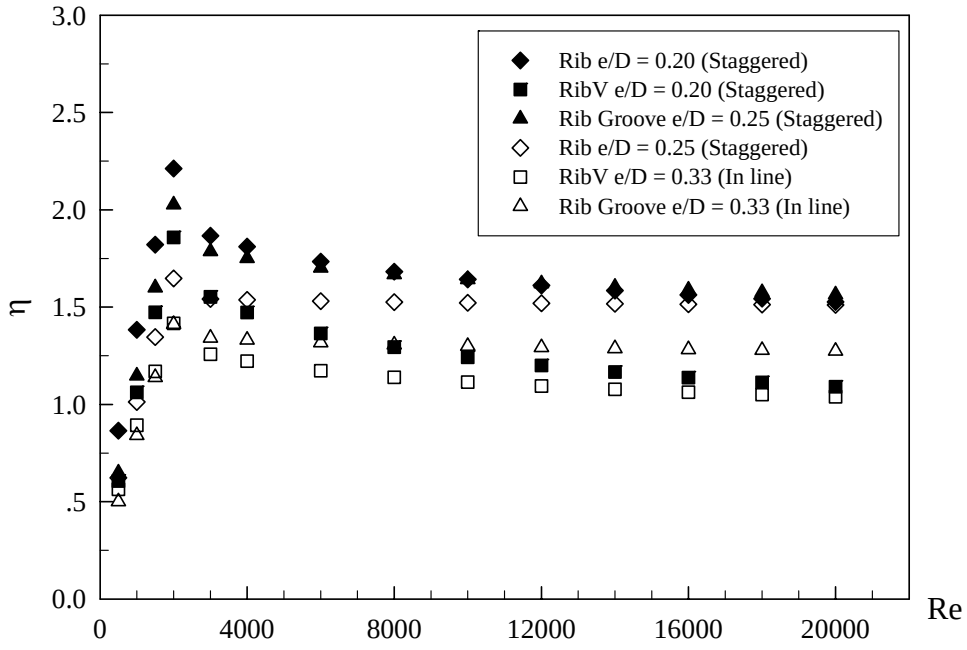


รูปที่ 6.27 แสดงผลเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานสูงและต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภทเทียบกับช่องขนานแผ่นเรียบ

6.7.5 ผลเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูง-ต่ำสุดของช่องขนานมีครีบแต่ละประเภท

จากการเปรียบเทียบผลของค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของช่องขนานที่มีครีบแต่ละประเภทพบว่าช่องขนานที่มีครีบตรงที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 จะมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือเท่ากับ 2.21 โดยมีค่าสูงสุดในช่วงค่า *Re* เท่ากับ 2,000 เมื่อเทียบกับช่องขนานมีครีบประเภทอื่น และมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเช่นเดียวกันเท่ากับ 1.63 แต่เมื่อค่าตัวเลข Re มีค่ามากกว่า 10,000 พบว่าช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง จัดวางแบบแนวร่องเยื้อง ที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.25 จะมีแนวโน้มของค่า η มากกว่าช่องขนานประเภทอื่น ส่วนช่องขนานที่มีครีบตัววี จัด

วางแบบแนวครีบตรงที่สัดส่วน e/D เท่ากับ 0.33 จะมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดคือเท่ากับ 1.09 ดังแสดงในรูปที่ 6.28



รูปที่ 6.28 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูง-ต่ำสุดของช่องขนานที่มีครีบประเภทต่างๆ

6.8 ค่าความสัมพันธ์ของตัวเลขนัสเซิลท์

จากการทดลองที่กล่าวมาในข้างต้นพบว่า ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (*Nu*) นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (*Re*) และระยะความสูงครีบต่อระยะห่างช่องขนาน (*e/D*) ซึ่งสามารถหาค่าความสัมพันธ์เหล่านี้ได้ดังนี้

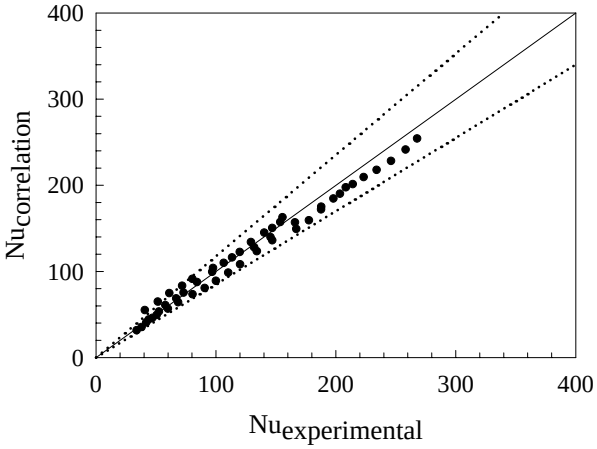
การจัดวางแบบครีบตรง

ครีบตรง	Nu	=	$0.3617\,(Re^{0.8263})(e/D)^{1.0971}$
ครีบรูปตัววี	Nu	=	$0.6323\,(Re^{0.7381})(e/D)^{1.0811}$
ครีบตรง-ร่องตรง	Nu	=	$0.2150\,(Re^{0.7943})(e/D)^{0.5803}$

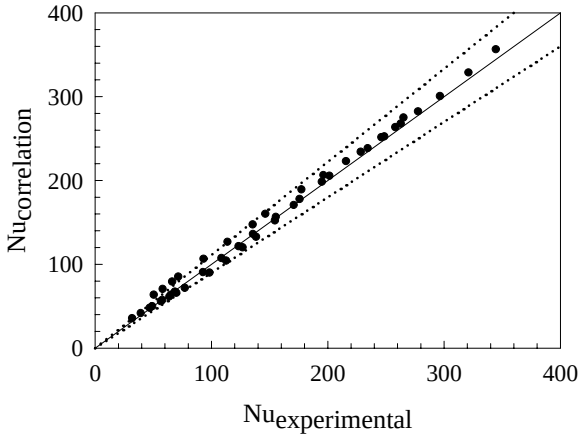
การจัดวางแบบครีบเยื้อง

ครีบตรง	Nu	=	$0.1583\,(Re^{0.8237})(e/D)^{0.5731}$
ครีบรูปตัววี	Nu	=	$0.5310\,(Re^{0.7180})(e/D)^{0.8852}$
ครีบตรง-ร่องตรง	Nu	=	$0.2150\,(Re^{0.7943})(e/D)^{0.5803}$

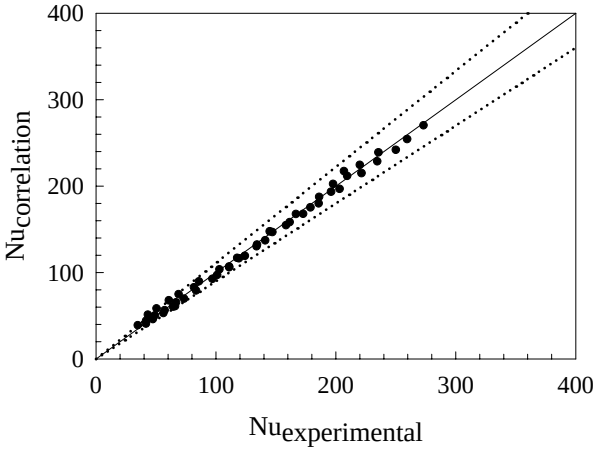
โดยมีขอบเขตเงื่อนไขครอบคลุมช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 2,000 – 20,000 โดยความคาดเคลื่อนของสมการดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง +/- 10% ซึ่งสามารถเปรียบเทียบที่ได้จากสมการความสัมพันธ์และค่าจากการทดลองดังรูปที่ 6.29 ถึง 6.34



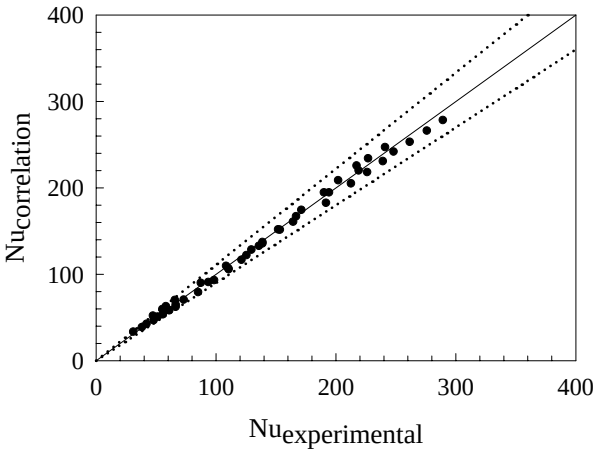
รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบตรง การจัดวางแบบครีบตรง



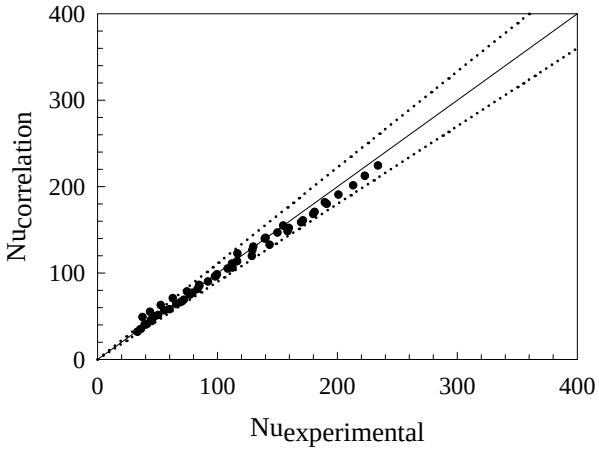
รูปที่ 6.30 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบตัววี การจัดวางแบบครีบตรง



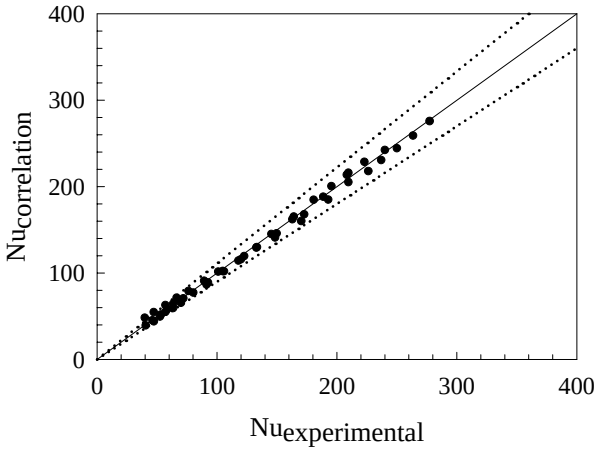
รูปที่ 6.31 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง การจัดวางแบบครีบตรง



รูปที่ 6.32 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบตรง การจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง



รูปที่ 6.33 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบตัววี การจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง



รูปที่ 6.34 เปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรงตรง การจัดวางแบบแนวครีบเยื้อง

6.9 ค่าความสัมพันธ์ของตัวประกอบเสียดทาน

จากการทดลองที่กล่าวมาในข้างต้นพบว่า ค่าตัวประกอบเสียดทาน (friction factor;*f*) นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (*Re*) และระยะความสูงครีบต่อระยะห่างช่องขนาน (*e/D*) ซึ่งสามารถหาค่าความสัมพันธ์เหล่านี้ได้ดังนี้

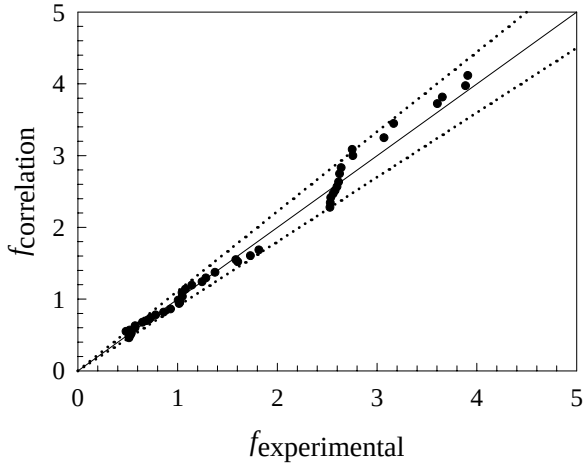
การจัดวางแบบครีบตรง

ครีบตรง	f	=	$1{,}204.59(Re^{-0.2840})(e/D)^{3.1422}$
ครีบรูปตัววี	f	=	$4{,}548.87(Re^{-0.2791})(e/D)^{3.9310}$
ครีบตรง-ร่องตรง	f	=	$2{,}987.39(Re^{-0.3688})(e/D)^{3.1998}$

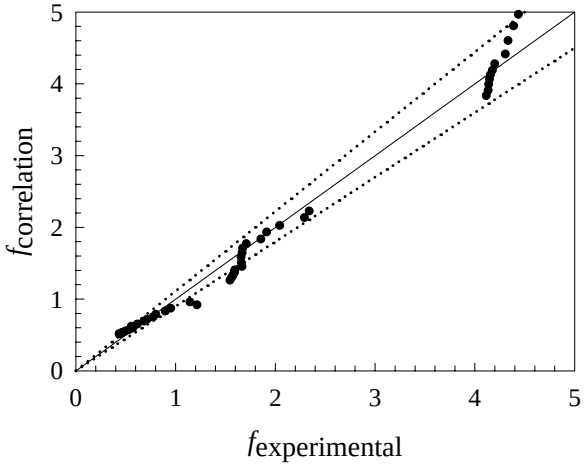
การจัดวางแบบครีบเยื้อง

ครีบตรง	f	=	$123.72(Re^{-0.1956})(e/D)^{2.2643}$
ครีบรูปตัววี	f	=	$743.01(Re^{-0.2106})(e/D)^{3.2380}$
ครีบตรง-ร่องตรง	f	=	$735.24(Re^{-0.3892})(e/D)^{2.2184}$

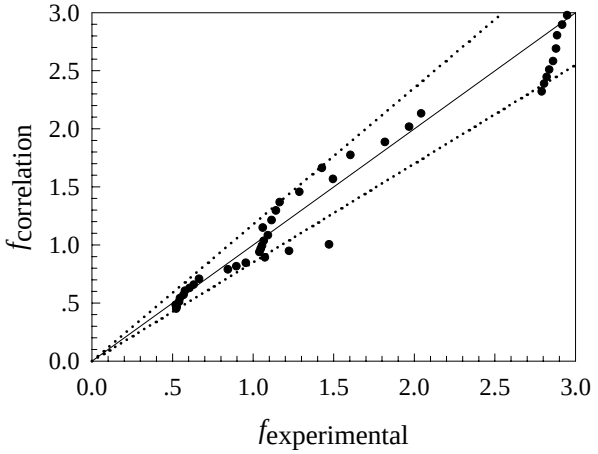
โดยมีขอบเขตเงื่อนไขครอบคลุมช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ 2,000 – 20,000 โดยความคาดเคลื่อนของสมการดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วง +/- 10% และ 15%สำหรับกรณีอัตราส่วนe/D เท่ากับ 0.20 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบที่ได้จากสมการความสัมพันธ์และค่าจากการทดลองดังรูปที่ 6.35 ถึง 6.40



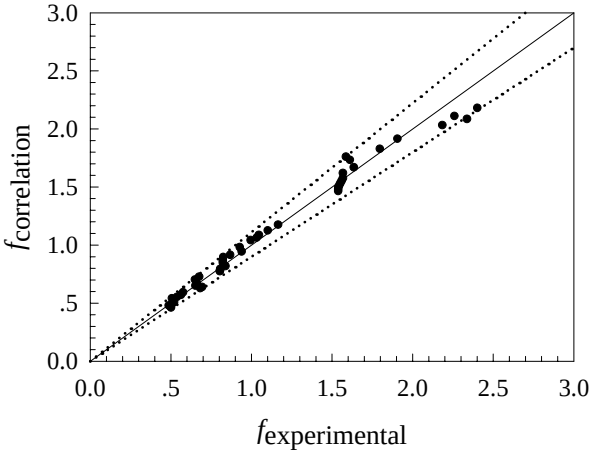
รูปที่ 6.35 เปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบตรง การจัดวางแบบครีบตรง



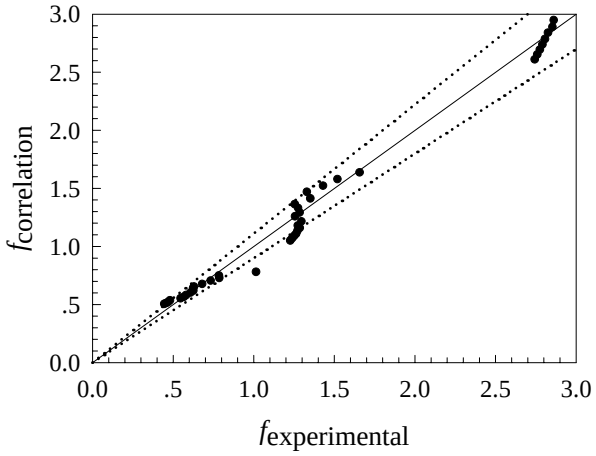
รูปที่ 6.36 เปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบตัววี การจัดวางแบบครีบตรง



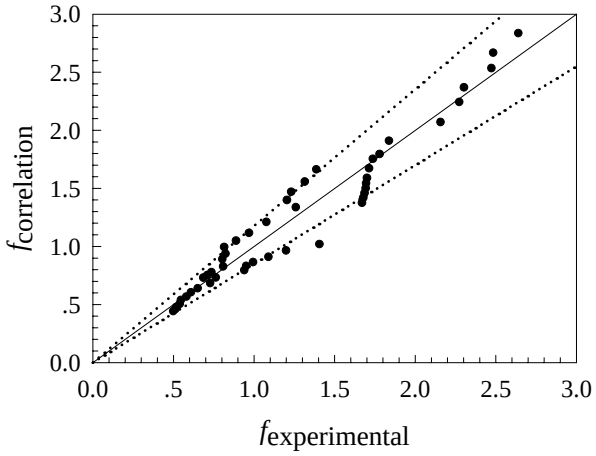
รูปที่ 6.37 เปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง การจัดวางแบบครีบตรง



รูปที่ 6.38 เปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบตรง การจัดวางแบบครีบเยื้อง



รูปที่ 6.39 เปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบตัววีการจัดวางแบบครีบเยื้อง



รูปที่ 6.40 เปรียบเทียบตัวประกอบเสียดทานที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ของช่องขนานที่มีครีบและร่องตรง การจัดวางแบบครีบเยื้อง