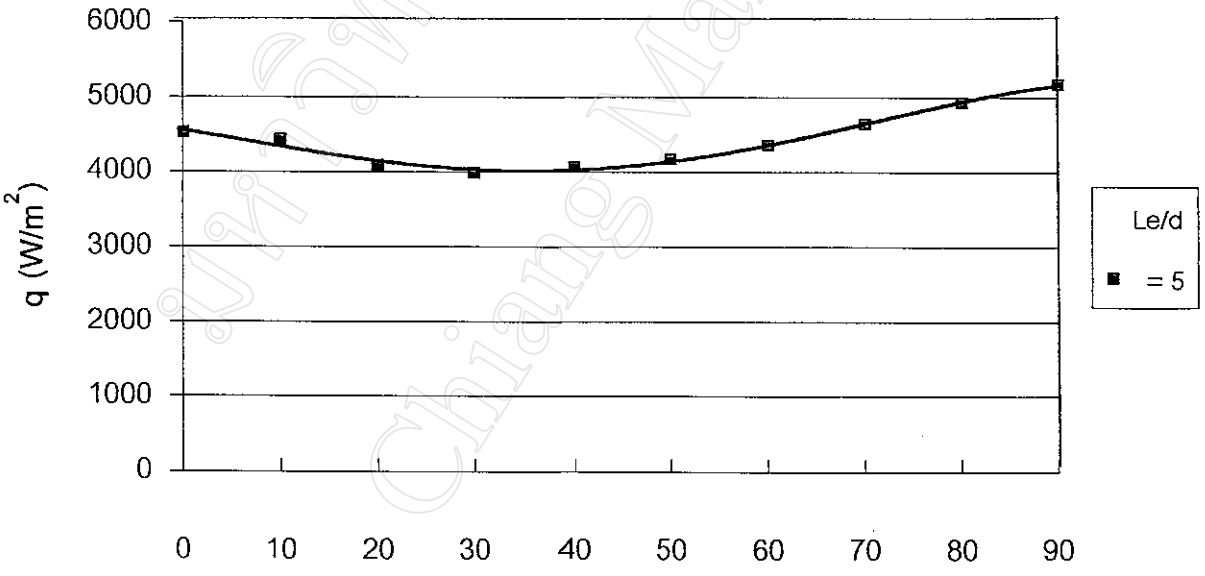
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของตัวแปรต่าง ๆที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

4.1.1 ผลของมุมเอียงที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

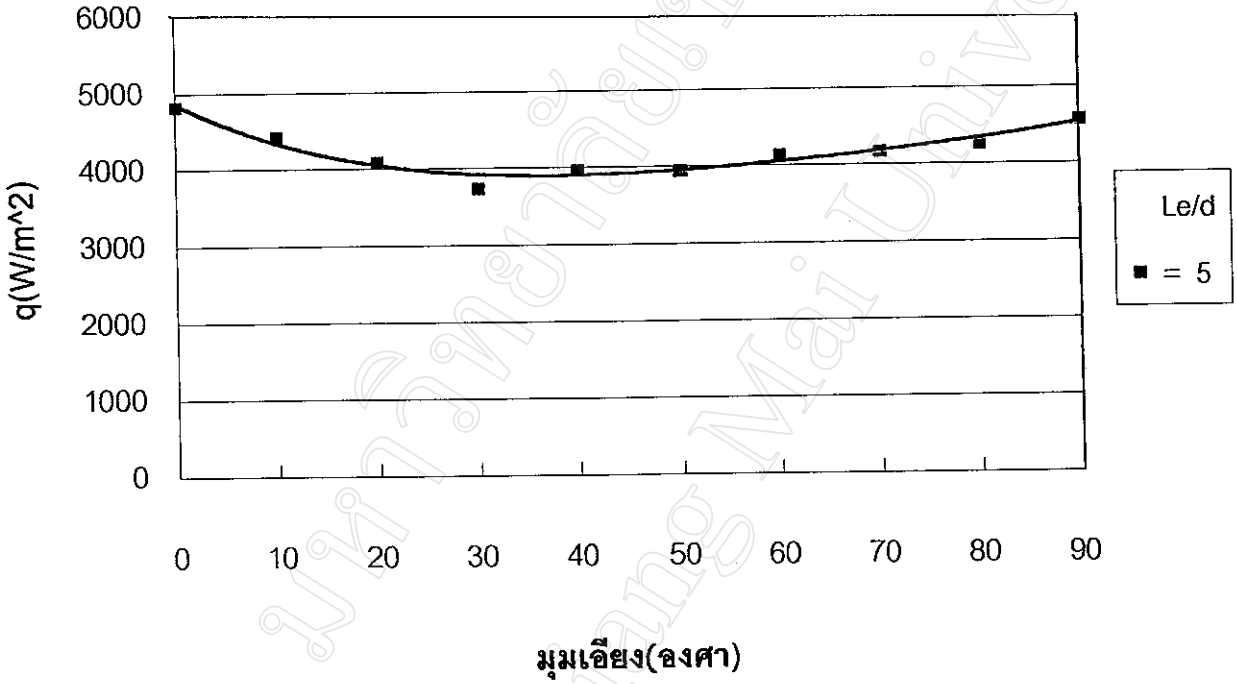
รูปที่ 4.1 แสดงผลของมุมเอียงของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนซึ่งใช้สารทำงาน HP62 ท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11 mm ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 7 g ($g = 9.81\ m/s^2$) อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 60 °C อัตราส่วนการเติมเท่ากับ 60 % ของส่วนทำระเหย ทำการแปรค่าอัตราส่วนสนทัดเป็น 5, 10 และ 20 นอกจากนี้ยังทำการแปรค่ามุมเอียงตั้งแต่ 0 - 90 องศา โดยปรับค่าเพิ่มขึ้นทีละ 10 องศา ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0 – 30 องศา ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างช้า ๆ จาก 4526 W/m^2 ไปเป็น 3985 W/m^2 แต่หลังจากนั้นเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นขึ้นจาก 30 –90 องศา ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างช้า จาก 3985 W/m^2 ถึง 5174 W/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุก ๆ อัตราส่วนสนทัด



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อน ของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน ($Le/d = 5, D_i = 11, \omega^2 R = 7g$)

(สมการของ เส้นแนวโน้มที่ $Le/d = 5$ คือ $y = 0.3877x^2 - 26.816x + 4540$)

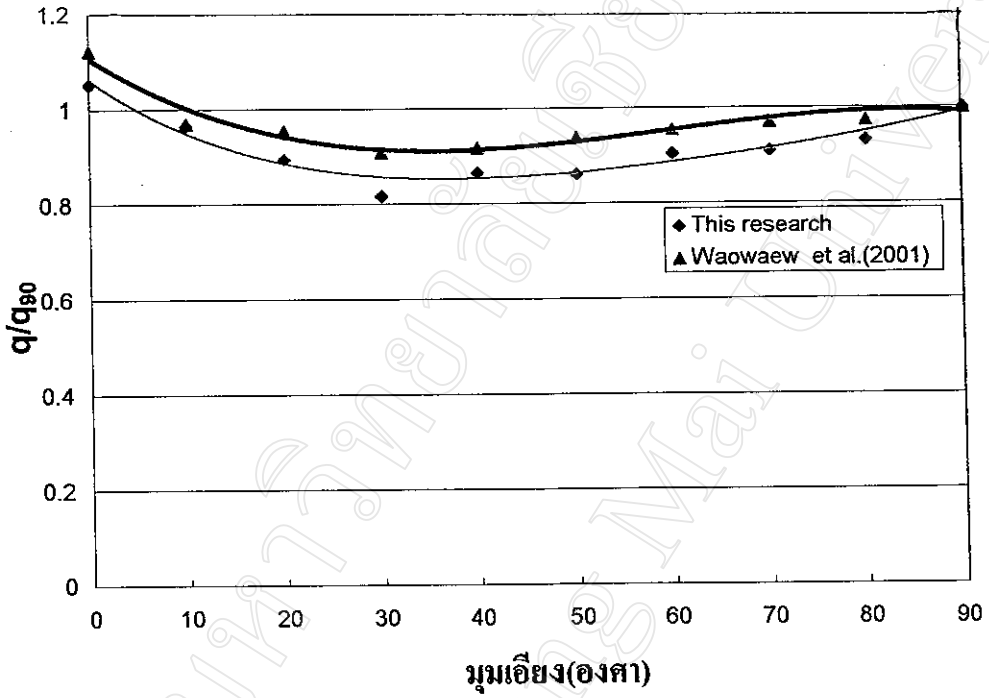
รูปที่ 4.2 แสดงผลของมุมเอียงของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนซึ่งใช้สารทำงาน MP39 ท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11 mm ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 7 g (g = 9.81 m/s^2) อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 60 °C อัตราส่วนการเติมเท่ากับ 60 % ของส่วนทำระเหย ทำการแปรค่าอัตราส่วนสนทัดเป็น 5, 10 และ 20 นอกจากนี้ยังทำการแปรค่ามุมเอียงตั้งแต่ 0 - 90 องศา โดยปรับค่าเพิ่มขึ้นทีละ 10 องศา ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 0 – 30 องศา ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างช้า ๆ จาก 4823 W/m^2 ไปเป็น 3744 W/m^2 แต่หลังจากนั้นเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 30 –90 องศา ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างช้า จาก 3744 W/m^2 ถึง 4577 W/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุก ๆ อัตราส่วนสนทัด



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี ที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงาน (Le/d =5 ,D_i = 11, $\omega^2 R = 7g$)
(สมการของเส้นแนวโน้มที่ Le/d = 5 คือ $y = 5E\text{-}05x^4 - 0.0138x^3 + 1.5151x^2 - 65.786x + 4862.6$)

เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นทำให้แรงเนื่องจากความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่กระทำต่อฟิล์มของเหลวที่เคลือบผิวภายในของส่วนทำระเหยจะเพิ่มขึ้น แต่แรงเนื่องจากความเฉื่อยของฟิล์มของเหลวนั้นจะมีค่าลดลง ดังนั้นค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของฟิล์มของเหลวที่ไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยจะค่อย ๆ ลดลงตามค่าแรงเนื่องจากความเฉื่อยจนกระทั่งถึงค่าต่ำสุดค่าหนึ่งและจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของแรงเนื่องจากความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางจนกระทั่งถึงมุม

เอียง 90 องศา แต่ที่อัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 20 และมุมเอียงน้อยๆ คือ 0- 10 องศา นั้นเกิด Initial dryout ขึ้นเพราะแรงเนื่องจากความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางมีค่ามากทำให้ของเหลวไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยได้น้อย ฟิล์มของเหลวไม่สามารถเคลือบผิวภายในส่วนทำระเหยได้หมดจึงเกิดการแห้งที่บางจุดได้ เมื่อเปรียบเทียบผลของมุมเอียงที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนกับงานวิจัยของ Waowaew et al.,(2001) พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ซึ่งจะสังเกตได้จากรูป 4.3 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 (q/q_{90}) พบว่าผลการทดลองนี้สอดคล้องกันเป็นอย่างดีกล่าวคือมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 (q/q_{90}) ($Le/d = 5$,$D_i = 11$, $\omega^2 R = 7g$)

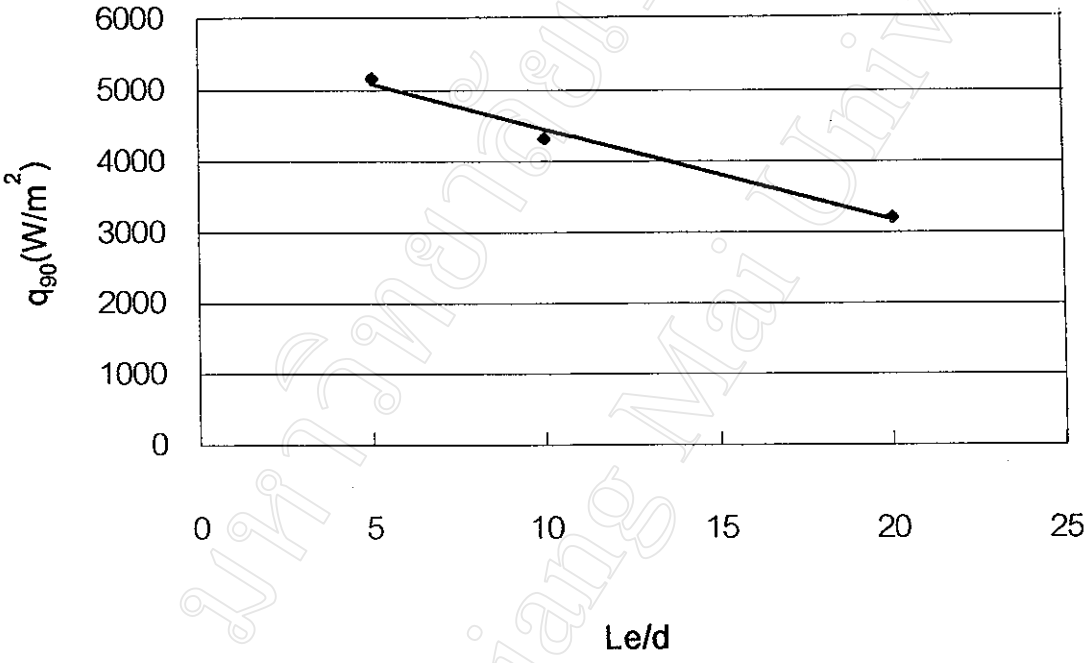
(สมการของเส้นแนวโน้ม Waowaew et al.,(2001) คือ $y = -1E\text{-}06x^3 + 0.0003x^2 - 0.0129x + 1.1068$)

(สมการของเส้นแนวโน้ม This research คือ $y = 1E\text{-}08x^4 - 3E\text{-}06x^3 + 0.0003x^2 - 0.0144x + 1.0624$)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 0 - 90 องศา ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงถึงค่าต่ำสุด (เช่น อัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 5 อัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 3985 W/m^2 เมื่อมุมเอียงเท่ากับ 30 องศา) และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดที่มุมเอียงเท่ากับ 90 องศา (เช่น สารทำงาน HP62 อัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 5 อัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 5174 W/m^2) ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสองสารทำงาน

4.1.2 ผลของอัตราส่วนสนทัดที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 4.4 แสดงผลของอัตราส่วนสนทัด(Le/d) ที่มีต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนซึ่งใช้สารทำงาน HP62 ท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11 mm ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 7 g (g = 9.81 m/s^2) อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 60 °C อัตราส่วนการเติมเท่ากับ 60 % ของส่วนทำระเหย มุมเอียงเท่ากับ 90 องศา ทำการแปรค่าอัตราส่วนสนทัดเป็น 5, 10 และ 20 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนสนทัดเพิ่มขึ้นจาก 5-20 จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างช้า ๆจาก 5174 W/m^2 เป็น 3218 W/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุก ๆ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดลอง

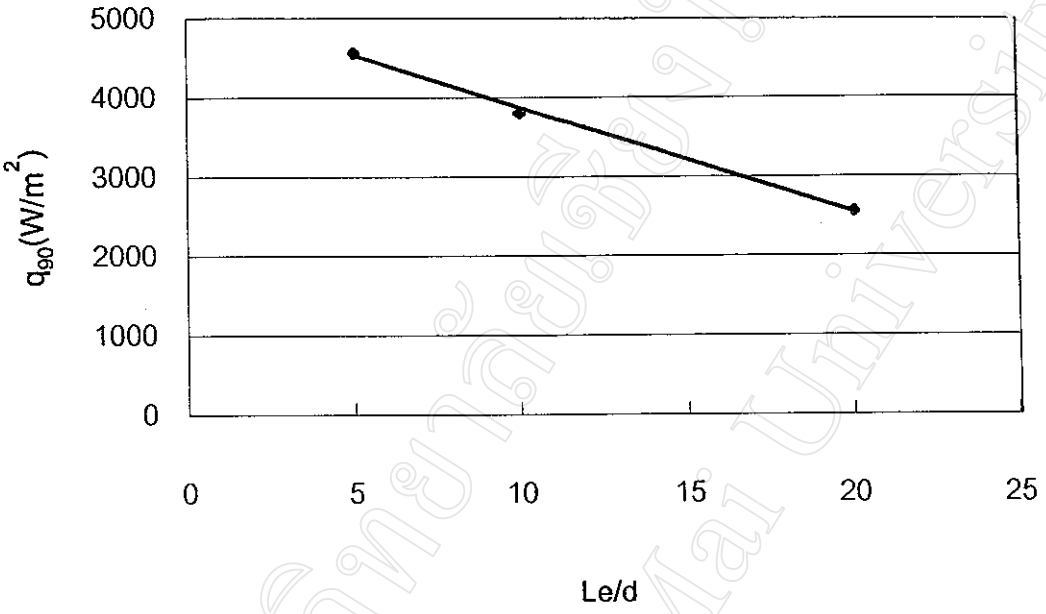


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัด (Le/d) กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี ที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน ($D_i = 11$, $\omega^2 R = 7g$)

(สมการของเส้นแนวโน้มคือ $y = -127.67x + 5731.6$)

รูปที่ 4.5 แสดงผลของอัตราส่วนสนทัดที่มีต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนซึ่งใช้สารทำงาน MP39 ท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11 mm ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 7 g อุณหภูมิการทำงาน

เท่ากับ 60 °C อัตราส่วนการเติมเท่ากับ 60 % ของส่วนทำระเหย มุมเอียงเท่ากับ 90 องศา ได้ทำการแปรค่าอัตราส่วนสนทัดเป็น 5, 10 และ 20 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนสนทัดเพิ่มขึ้นจาก 5 - 20 ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างช้าๆ จาก 4577 W/m^2 ไปเป็น 2574 W/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุก ๆ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทดลอง



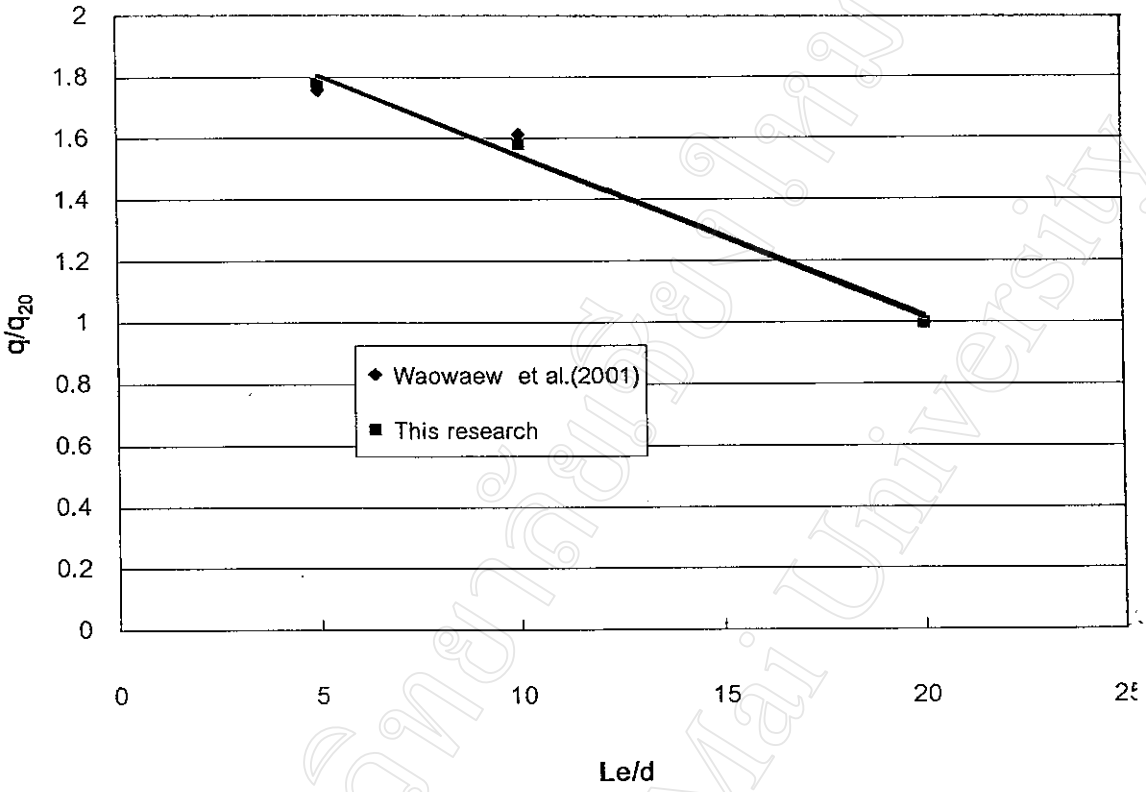
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัดกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี ที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงาน ($D_i = 11$, $\omega^2 R = 7g$)

(สมการของเส้นแนวโน้มคือ $y = -132.16x + 5196.8$)

เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่ออัตราส่วนสนทัดน้อย ๆ นั้นปรากฏการณ์การเดือดภายในจะคล้ายกับการเดือดแบบแอ่ง (Pool boiling) ซึ่งจะให้การส่งถ่ายความร้อนสูง (Shiriashi, 1987) แต่ที่ อัตราส่วนสนทัดมีค่ามากนั้นปรากฏการณ์การเดือดภายในคล้ายกับการเดือดใน Confined channel ซึ่งให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนต่ำ (Imura et al., 1983) แนวโน้มนี้จะเหมือนกันทุกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

จากผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Waowaew et al. (2001) เป็นอย่างดี ซึ่งเนื่องมาจากมีเงื่อนไขในการทดลองที่คล้ายคลึงกันจะสังเกตได้จากรูป 4.6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัดกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราส่วนสนทัดใด ๆ ต่อ

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราส่วนสนทัด 20 (q/q_{20}) พบว่าการทดลองนี้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี กล่าวคือมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัดกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราส่วนสนทัดใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราส่วนสนทัด 20 (q/q_{20}) ($D_i = 11$, $\omega^2 R = 7g$)

(สมการของเส้นแนวโน้ม This research)คือ $y = -0.0521x + 2.0655$)

(สมการของเส้นแนวโน้ม Waowaew et al.,(2001))คือ $y = -0.0521x + 2.0655$)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าอัตราส่วนสนทัดเพิ่มขึ้นจาก 5 - 20 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง (เช่น สารทำงาน HP62 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11 mm ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างช้า ๆ จาก 5174 W/m^2 ไปเป็น 3218 W/m^2) ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสองสารทำงาน

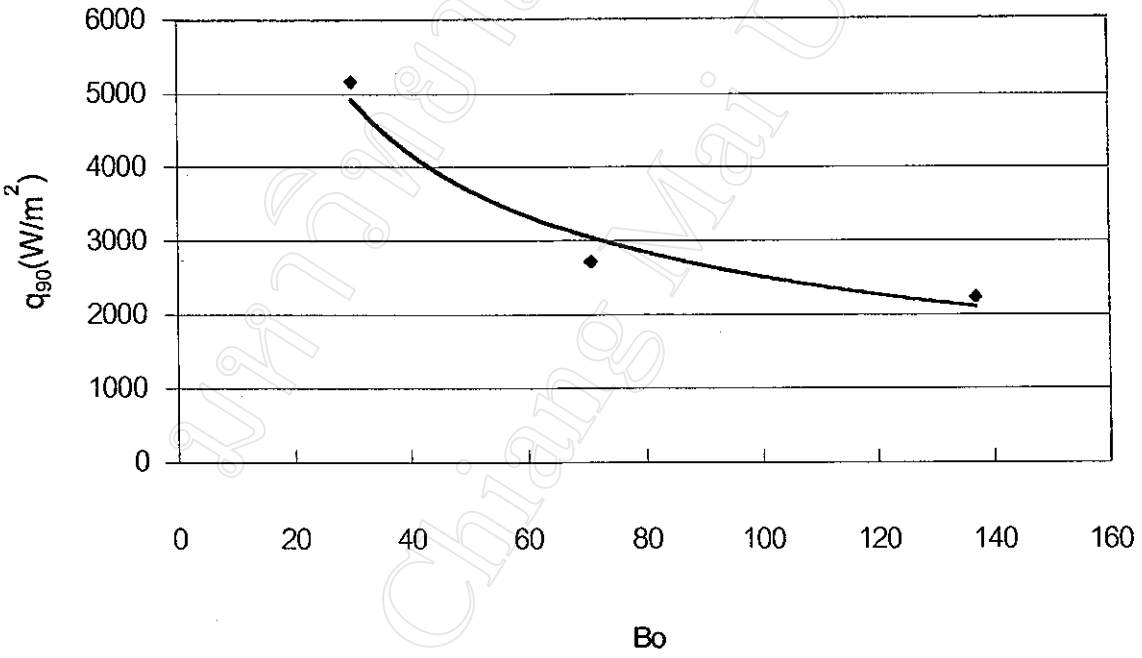
4.1.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

ในการพิจารณาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนั้นสามารถพิจารณาในรูปของตัวแปรไร้มิติ คือตัวเลขของบอนด์ได้ดังสมการ

$$Bo = d\left(g\left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\sigma}\right)\right)^{0.5} \qquad (4.1)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีพจน์ของคุณสมบัติของสารทำงานอยู่ด้วย ดังนั้นหากค่าอุณหภูมิทำงานคงที่ค่าคุณสมบัติสารทำงานจะคงเดิมจึงถือได้ว่าตัวเลขของบอนด์ เป็นฟังก์ชั่นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่านั้น

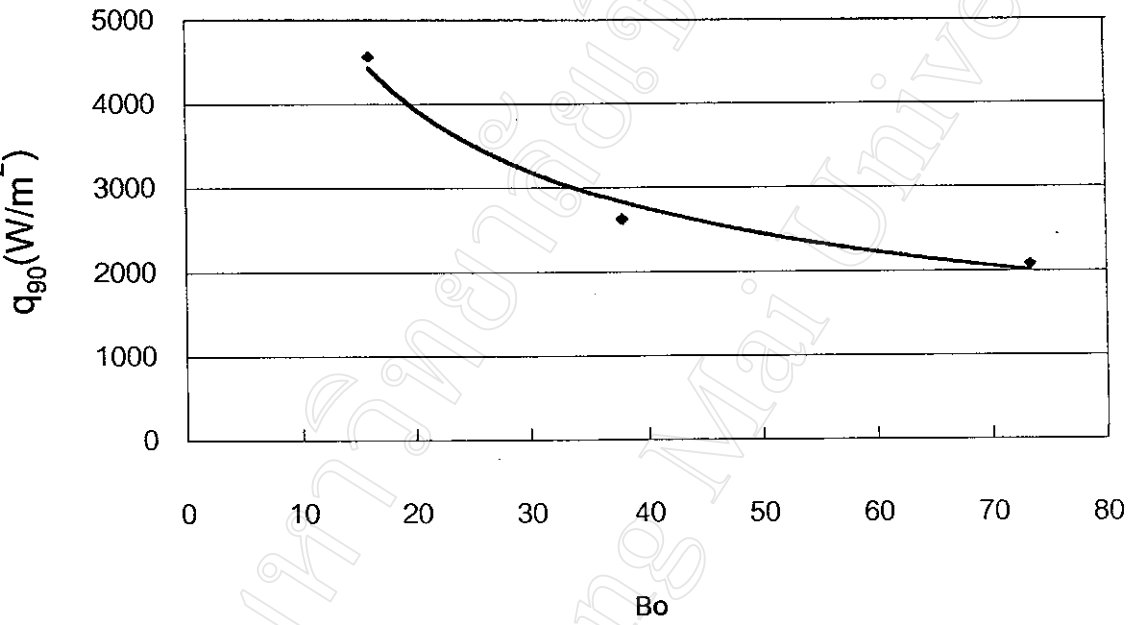
รูปที่ 4.7 แสดงผลของตัวเลขของบอนด์ที่มีต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนซึ่งใช้ สารทำงาน HP62 ท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 7 g (g = 9.81 m/s^2) อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 60 °C อัตราส่วนการเติมเท่ากับ 60 % ของส่วนทำระเหย ค่าอัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 5 มุมเอียงเท่ากับ 90 องศา ทำการแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11, 26 และ 50.4 mm ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อตัวเลขของบอนด์เพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 136 ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างช้า ๆ จาก 5174 W/m^2 ถึง 2250 W/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุก ๆ อัตราส่วนสนทัด



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของตัวเลขของบอนด์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน(Le/d =11, $\omega^2 R = 7g$)

(สมการของเส้นแนวโน้มคือ $y = 56070x^{-0.5564}$)

รูปที่ 4. 8 แสดงผลของตัวเลขของบอนด์ที่มีต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนซึ่งใช้ สารทำงาน MP39 ท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลอง มีความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 7 g อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 60 °C อัตราส่วนการเติมเท่ากับ 60 % ของส่วนทำระเหย ค่าอัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 5 มุมเอียงเท่ากับ 90 องศา ได้ทำการแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11, 26 และ 50.4 mm ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าตัวเลขของบอนด์เพิ่มขึ้นจาก 16 ถึง 73 ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างช้า ๆ จาก 4577 W/m^2 ถึง 2094 W/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุก ๆ อัตราส่วนสนทัด

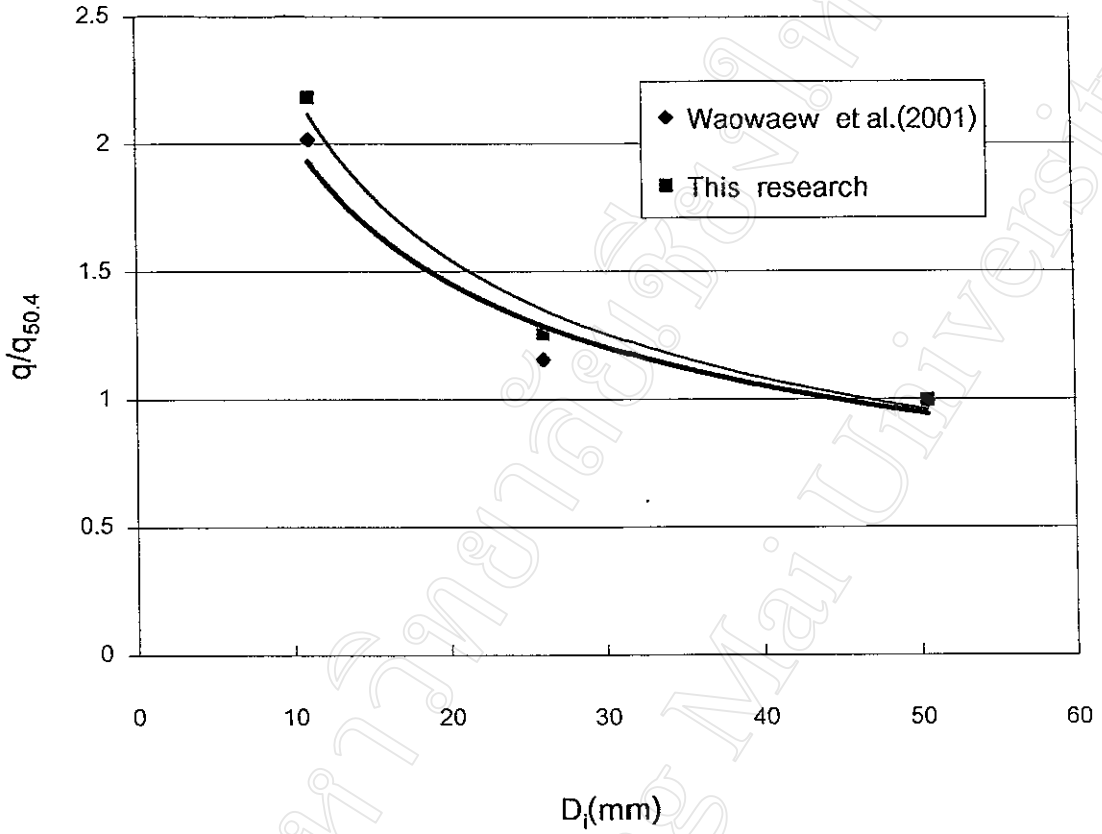


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของตัวเลขของบอนด์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงาน ($Le/d = 5$, $\omega^2 R = 7g$)

(สมการของเส้นแนวโน้มคือ $y = 31064x^{-0.5197}$)

เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะในการทดลองได้ทำการควบคุมอุณหภูมิไอให้คงที่ดังนั้นค่าความร้อนที่ป้อนให้แก่ท่อความร้อนจะเท่ากันเพราะค่าความต้านทานความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่าความต้านทานความร้อนไม่ได้เป็นฟังก์ชั่นของขนาดแต่พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแต่ละขนาดไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง ผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Waowaew et al., (2001) เป็นอย่างดี ซึ่งเนื่องมาจาก

มีเงื่อนไขในการทดลองที่คล้ายคลึงกันจะสังเกตได้จากรูป 4.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ 50.4 mm ($q/q_{50.4}$) พบว่าการทดลองนี้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี กล่าวคือมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน กับอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50.4 mm ($q/q_{50.4}$) (Le/d= 5, $\omega^2 R = 7g$)

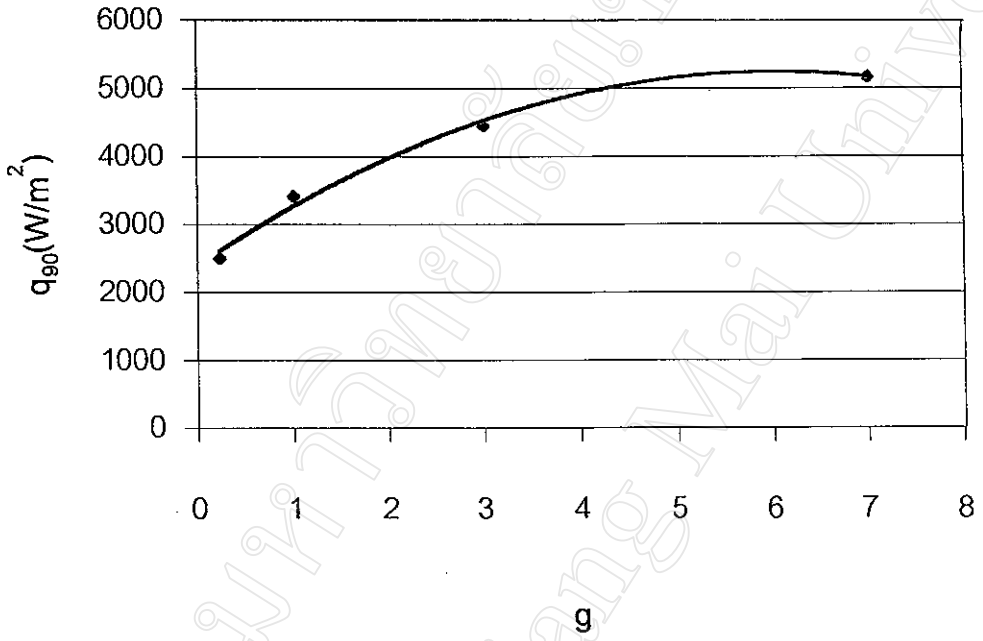
(สมการของเส้นแนวโน้ม Waowaew et al.,(2001) คือ $y = 5.9758x^{-0.471}$)

(สมการของเส้นแนวโน้ม This research คือ $y = 7.3606x^{-0.5197}$)

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเพิ่มขึ้นจาก 11 ถึง 50.4 mm ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง (เช่น สารทำงาน HP62 ที่อัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 5 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างช้า ๆ จาก 5174 W/m^2 ถึง 2250 W/m^2) ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสองสารทำงาน

4.1.4 ผลของความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 4.10 แสดงผลของความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีซึ่งใช้สารทำงาน HP62 ท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11 mm อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 60 °C อัตราส่วนการเติมเท่ากับ 60 % ของส่วนทำระเหย ค่าอัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 5 มุมเอียงเท่ากับ 90 องศา ทำการแปรค่าความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 0.2g, 1g, 3g และ 7 g (g = 9.81 m/s^2)ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 0.2 g ถึง 7g จะทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 2507 W/m^2 ถึง 5174 W/m^2 ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทุก ๆ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ



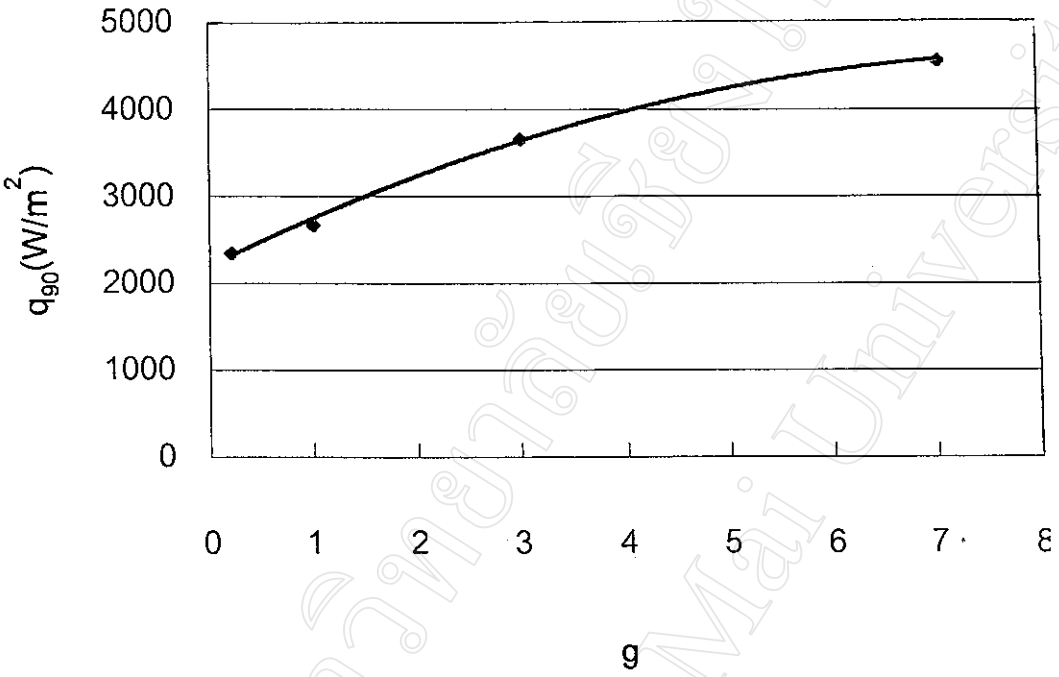
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน (Le/d = 5, d = 11)

(สมการของเส้นแนวโน้มคือ $y = -78.243x^2 + 942.28x + 2403$)

รูปที่ 4.11 แสดงผลของความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีซึ่งใช้สารทำงาน MP39 ท่อความร้อนที่ใช้ในการทดลอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 11 mm อุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 60 °C อัตราส่วนการเติมเท่ากับ 60 % ของส่วนทำระเหย ค่าอัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 5

มุมเอียงเท่ากับ 90 องศา ทำการแปรค่าความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 0.2g, 1g, 3g, และ 7 g (g = 9.81 m/s^2) ตามลำดับ

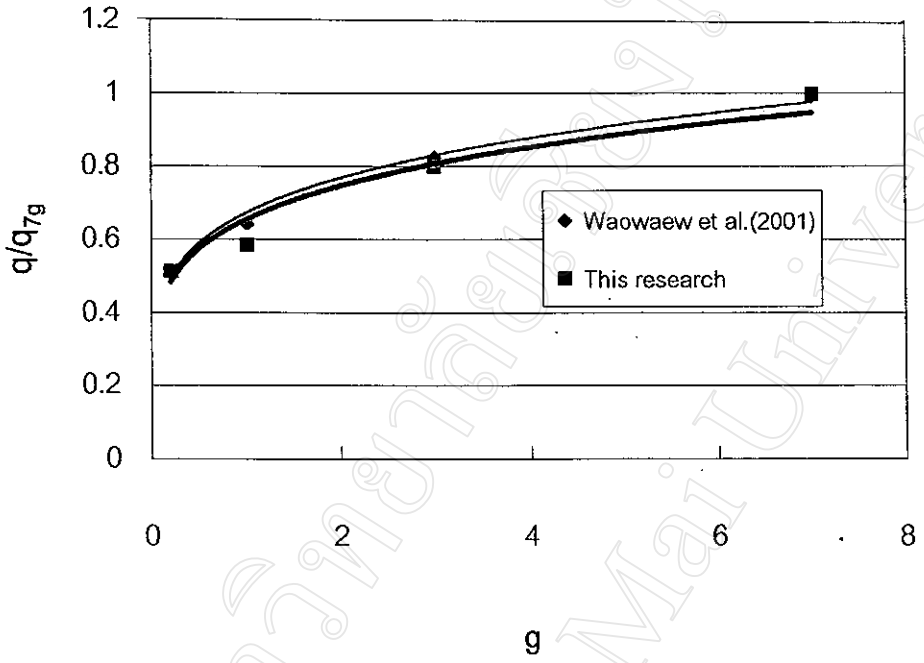
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 0.2 g ถึง 7g จะทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จาก 2357 W/m^2 เป็น 4577 W/m^2 ซึ่งแนวโน้มนี้จะเหมือนกันทุก ๆ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงาน (Le/d =5, D_i=11 mm)(สมการของเส้นแนวโน้มคือ $y = -35.037x^2 + 585.73x + 2197.9$)

เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางสูงขึ้นทำให้แรงเนื่องจากความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่กระทำกับฟิล์มของเหลวซึ่งเคลือบผิวด้านในของส่วนควบแน่นมีค่ามาก ทำให้ของเหลวสามารถไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยได้เร็วขึ้นและยังเป็นผลทำให้ฟิล์มของเหลวที่ส่วนควบแน่นบางลงซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนดี เมื่อท่อความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น แต่ในการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิไอให้คงที่จึงต้องใส่ความร้อนให้กับส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับ

งานวิจัยของ Waowaew et al., (2001) ซึ่งเนื่องมาจากมีเงื่อนไขในการทดลองที่คล้ายคลึงกันจะสังเกตได้จากรูป 4.12 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 7g (q/q_{7g}) พบว่าการทดลองนี้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี กล่าวคือมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางกับอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับ 7g ($q/_{q7g}$) (Le/d = 5, $\omega^2 R = 7g$)(สมการของเส้นแนวโน้ม Waowaew et al.,2001) คือ $y = 0.6748x^{0.189}$) (สมการของเส้นแนวโน้ม This research) คือ $y = 0.6552x^{0.1888}$)

จากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าผลของความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 0.2g ถึง 7g ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น(เช่น สารทำงาน HP62 เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 11 mm ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 2507 W/m^2 ถึง 5174 W/m^2) ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสองสารทำงาน

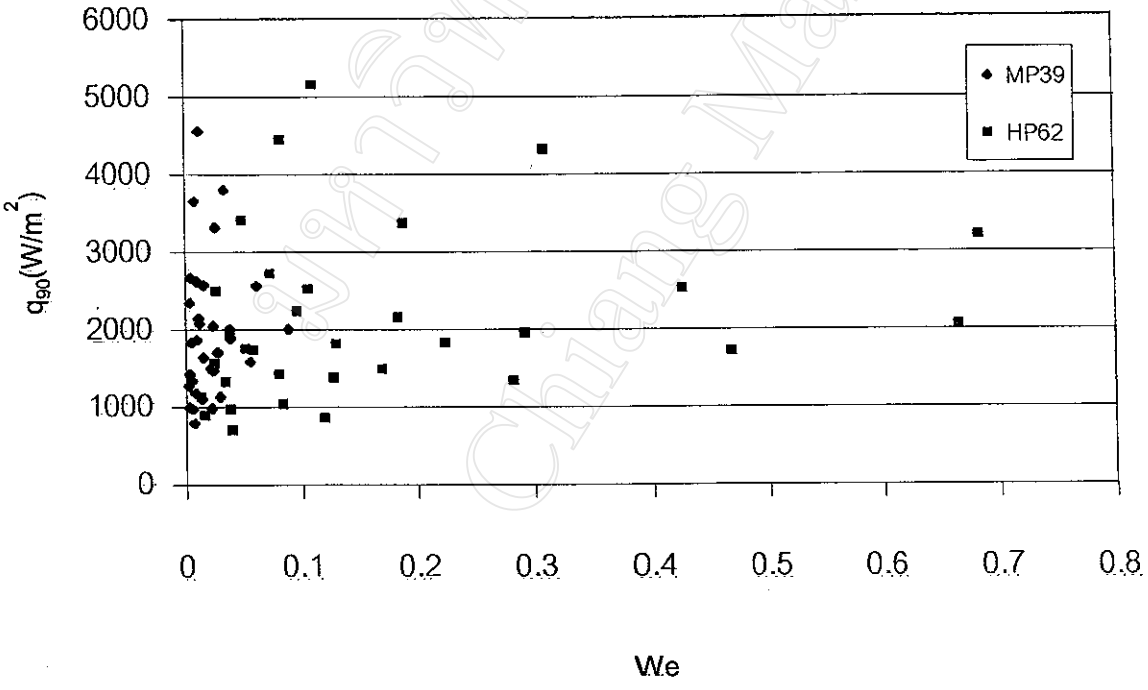
4.2 ผลของตัวแปรไร้มิติที่หาได้ที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี

ในการศึกษาถึงผลของตัวแปรไร้มิติที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นเนื่องจากข้อมูลมีความแตกต่างทางด้าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ อัตราส่วนสนทัด ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง และสารทำงาน เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 และ 0 องศา จึงต้องทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติเพื่อที่จะสามารถหาความสัมพันธ์กับตัวแปรไร้มิติที่หาได้

4.2.1 ผลของตัวเลขของเวเบอร์

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของเวเบอร์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา ของทุกๆ ค่าตัวแปรซึ่งจะสังเกตเห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์กันแต่อย่างใด เนื่องจากข้อมูลกระจัดกระจายไม่เรียงกันแต่มีการเกาะกลุ่มกันแต่ละสารทำงาน เมื่อพิจารณาตัวแปรแต่ละตัว คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน อัตราส่วนสนทัด และความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง พบว่าข้อมูลการทดลองจะกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ

สรุปได้ว่าค่าของตัวเลขของเวเบอร์ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน

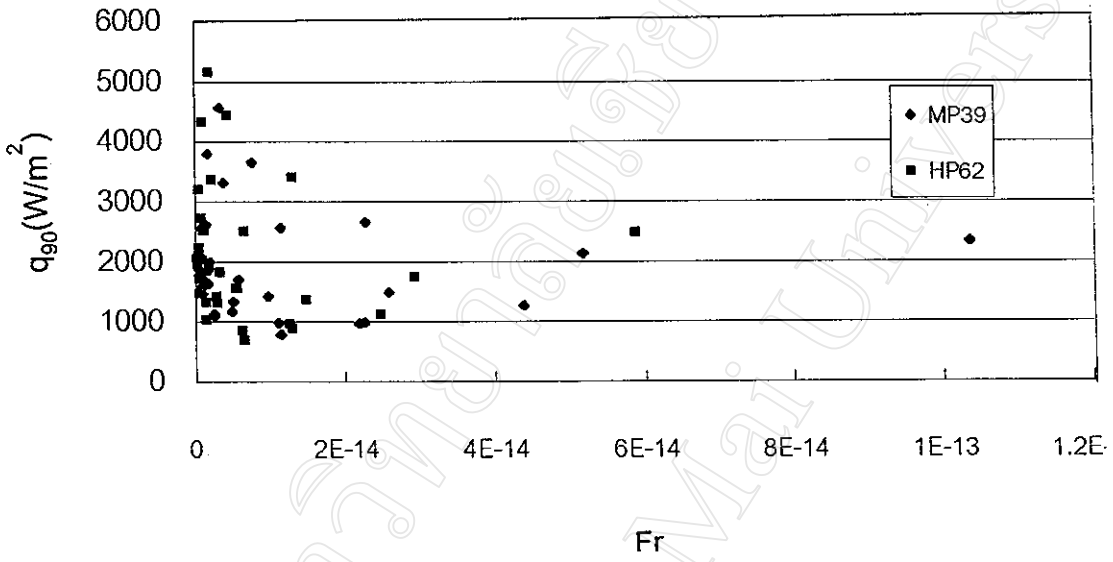


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของเวเบอร์กับอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่มุมเอียง 90 องศา

4.2.2 ผลของตัวเลขของฟรูด

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของฟรูดกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา ของทุกๆ ค่าตัวแปร พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันแต่อย่างใดคล้ายกับผลของตัวเลขของเวเบอร์ ซึ่งข้อมูลกระจัดกระจายไม่เรียงกันเป็นระเบียบ และไม่มีการเกาะกลุ่มกันในแต่ละสารทำงานเมื่อพิจารณาผลของ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน อัตราส่วนสนทัด และความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางแล้วพบว่าข้อมูลการทดลองทั้งหมดกระจัดกระจาย ไม่เรียงกันเป็นระเบียบ

สรุปได้ว่าค่าของตัวเลขของฟรูดไม่มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน

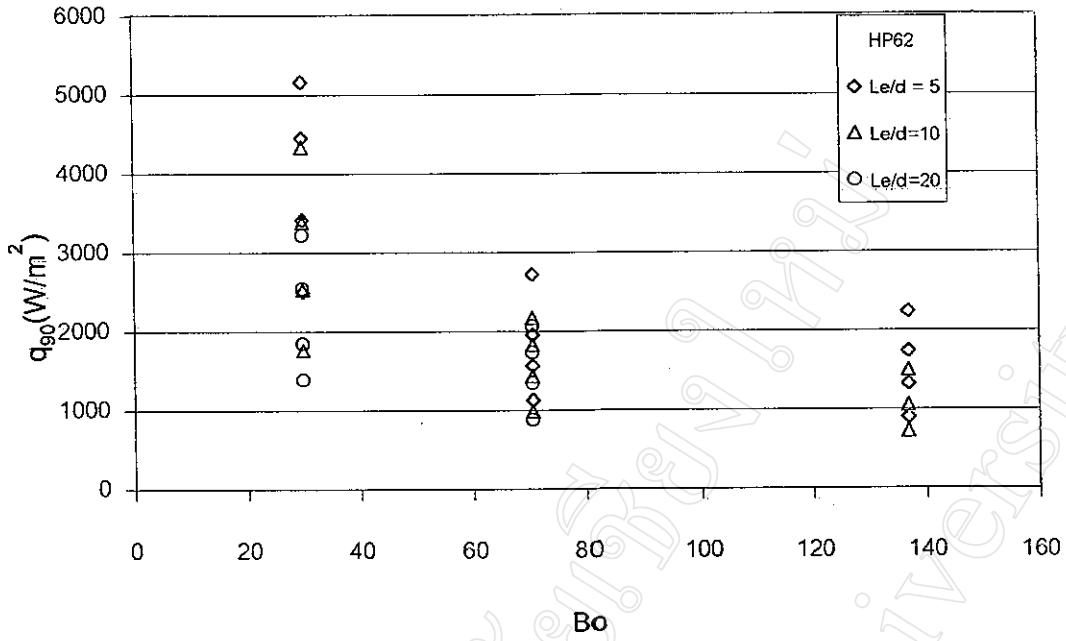


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกับตัวเลขของฟรูดกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง90 องศา

4.2.3 ผลของตัวเลขของบอนด์

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของบอนด์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา ของทุกๆ ค่าตัวแปร พบว่ามีความสัมพันธ์กันแต่ไม่มีการเกาะกลุ่มของสารทำงาน เมื่อพิจารณาตัวแปรแต่ละตัว คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน อัตราส่วนสนทัด และความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางแล้วพบว่าข้อมูลการทดลองทั้งหมดจะเรียงตัวกันเป็นระเบียบ

สรุปได้ว่าตัวเลขของบอนด์มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน

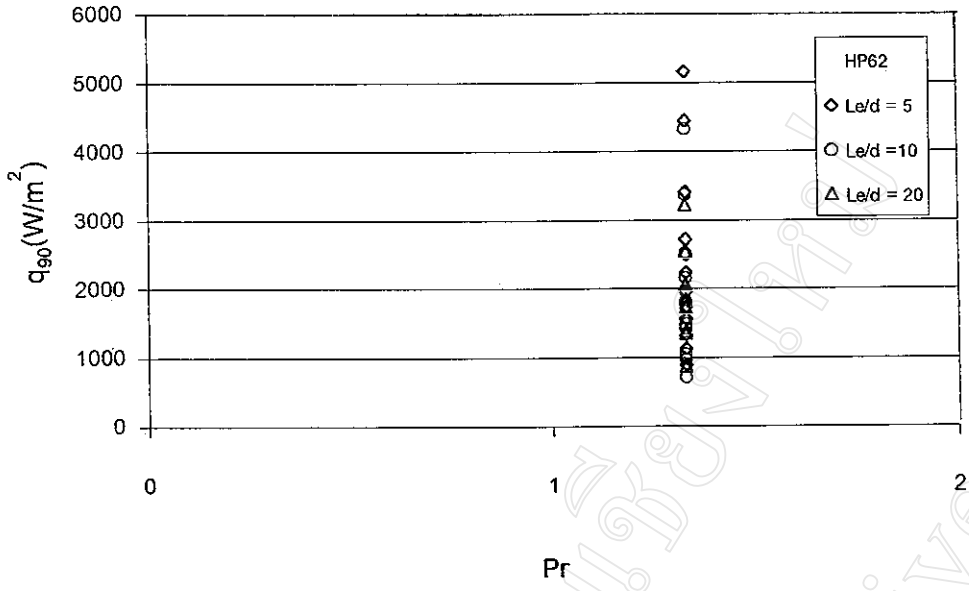


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของบอนด์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา

4.2.4 ผลของตัวเลขของแพรนตัน

จากรูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของแพรนตันกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา ของทุกๆ ค่าตัวแปร พบว่ามีความสัมพันธ์กัน และข้อมูลการทดลองกระจัดกระจายเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ และมีการเกาะกลุ่มกันในแต่ละของสารทำงาน เมื่อพิจารณาตัวแปรแต่ละตัว คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน อัตราส่วนสนทัด และความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางแล้วพบว่าข้อมูลจากการทดลองทั้งหมดจะเรียงลำดับกันอย่างเป็นระเบียบ

สามารถสรุปได้ว่าค่าของตัวเลขของแพรนตันมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน

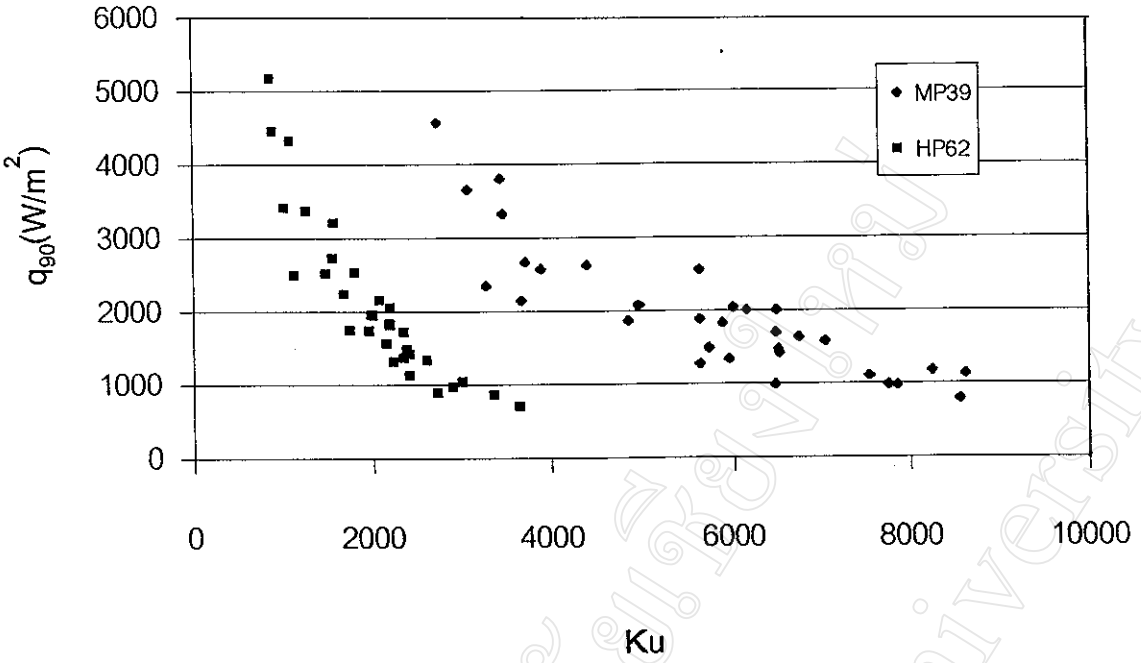


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวเลขของแพรนดันกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา

4.2.5 ผลของตัวเลขคูทาเทลาดเซ

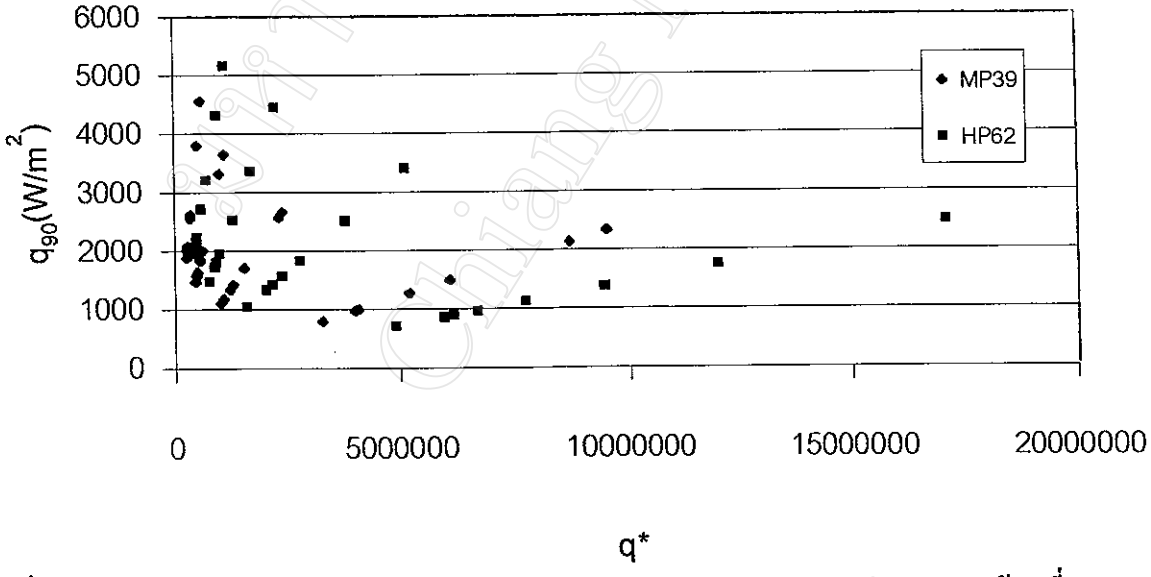
จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของคูทาเทลาดเซกับอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่มุมเอียง90 องศา ของทุกๆ ค่าตัวแปรจะสังเกตเห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์กันแต่อย่างไร ซึ่งข้อมูลการทดลองกระจัดกระจายเรียงกันไม่เป็นระเบียบ แต่มีการเกาะกลุ่มกันในแต่ละสารทำงาน เมื่อพิจารณาตัวแปรแต่ละตัว คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน อัตราส่วนสนทัด แล้วพบว่าข้อมูลการทดลองทั้งหมดจะกระจัดกระจายไม่เรียงลำดับกัน เรียงกันไม่เป็นระเบียบ

สรุปได้ว่าค่าของตัวเลขของคูทาเทลาดเซไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของคูทาเทลาดเซกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา

4.2.6 ผลของตัวแปรไร้มิติของ Heat flux (q*)



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติของ Heat flux (q*) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา

ในการหาความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่มีผลต่อการถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีนั้น พบว่าผลของกลุ่มตัวแปรไร้มิติของ อัตราส่วนสนทัด อัตราส่วนความเร่ง อัตราส่วนของแรงเฉื่อนต่อแรง Coriolis และผลของความหนืดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ออัตราความร้อนที่ทำให้ฟิล์มของเหลวระเหยหมดพอดี ซึ่งนิยามว่า ตัวแปรไร้มิติของ Heat flux (q*)

$$q^* = \frac{q}{g\mu} \qquad (4.2)$$

q = ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน(W/m^2)

μ = สัมประสิทธิ์ความหนืด (Pa.s)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก(m/s^2)

จากรูป 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติของ Heat flux (q*)กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา ของทุกๆ ค่าตัวแปร จะสังเกตเห็นว่ามีความสัมพันธ์กันโดยแบ่งแยกอย่างชัดเจนในแต่ละสารทำงาน และข้อมูลการทดลองกระจัดกระจายเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ เมื่อพิจารณาตัวแปรแต่ละตัว คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน อัตราส่วนสนทัดและความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง แล้วพบว่าข้อมูลการทดลองทั้งหมดจะกระจัดกระจาย เรียงลำดับกันเป็นระเบียบ งานวิจัยนี้จึงเลือกตัวแปรไร้มิติของ Heat flux (q*) มาวิเคราะห์ผลของตัวแปรไร้มิติซึ่งนำสมการของ Waoweaw et al.(2002) มาใช้ ซึ่งได้ทราบถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติที่หาได้กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติของ Heat flux(q*) ที่มุมเอียง 90 องศา ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยอื่นๆ มารวมไว้ด้วย ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$q^*_{90} = 6\times10^{7}\left[\left(\frac{Le}{d}\right)^{-0.65}\left(\frac{\omega^2 R}{g}\right)^{0.5} Bo^{-0.85} Ek^{0.1} Ja^{-0.15}\, Pr^{-0.35}\left(\frac{Cp_v}{Cp_l}\right)^{4.6}\left(1-\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.19}\right]^{0.57} \qquad (4.3)$$

และความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ q*ที่มุมเอียง 0 องศา แสดงในสมการที่ 4.4

$$q^*_{0} = 5\times10^{7}\left[\left(\frac{Le}{d}\right)^{-0.65}\left(\frac{\omega^2 R}{g}\right)^{0.55} Bo^{-0.88} Ek^{0.1} Ja^{-0.1}\, Pr^{-0.38}\left(\frac{Cp_v}{Cp_l}\right)^{4.9}\left(1-\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.21}\right]^{0.51} \qquad (4.4)$$

โดยที่

d = ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

Le = ความยาวส่วนทำระเหยของท่อความร้อน

R = ค่ารัศมีการหมุนจากจุดศูนย์กลางการหมุนถึงจุดกึ่งกลางส่วนทำระเหย

g = ค่าอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ω = ค่าความเร็วเชิงมุมของการหมุน

Cp_v = ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ในสภาวะก๊าซของสารทำงาน

Cp_l = ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ในสภาวะของเหลวของสารทำงาน

ρ_v = ค่าความหนาแน่นในสภาวะของก๊าซของสารทำงาน

ρ_l = ค่าความหนาแน่นในสภาวะของเหลวของสารทำงาน

Bo = ค่าตัวเลขของบอนด์

Ek = ค่าตัวเลขของเอ็กมาน

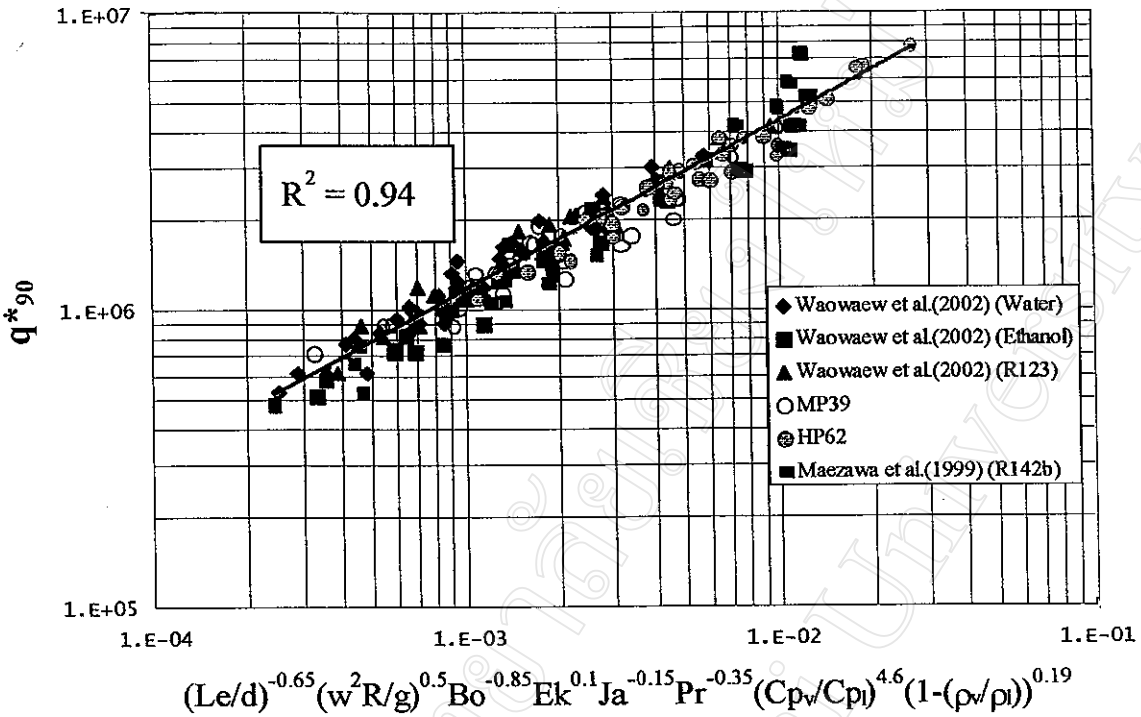
Ja = ค่าตัวเลขของจาคอบ

Pr = ค่าตัวเลขของแพรนตัน

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาได้ที่มีต่อค่า q* จะเห็นได้ว่ากราฟของเส้นสมการแนวโน้มของ Waoweaw et al., (2002) ลากผ่านจุดการทดลองของงานวิจัยนี้ที่มุมเอียง 90 องศา โดยมีอีก 2 ชุดข้อมูลจากงานวิจัยของ Maezawa et al., (1999) และข้อมูลของ Waoweaw et al., (2002) จุดของข้อมูลแต่ละชุดจะกระจัดกระจายรอบๆ เส้น โดยมีค่าความเชื่อมั่นในการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.94 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์เป็นอย่างดี และเมื่อพิจารณาละเอียดถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน จะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในจะเรียงจากใหญ่ไปหาเล็ก ซึ่งคล้ายกับค่าอัตราส่วนสนทัดก็จะเรียงจากอัตราส่วนสนทัดมากไปหาน้อย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแนวโน้มค่าตัวแปรไร้มิติที่หาได้เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า q* เพิ่มขึ้น โดยเส้นกราฟสามารถเขียนเป็นสมการดังแสดงในสมการที่ 4.3

พิสูจน์ว่าสมการที่ 4.3 นั้นสามารถนำมาไปใช้จริงโดยพิจารณาตามรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสมการการทำนายกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลการทดลอง เส้นกราฟที่ลากผ่านกลุ่มของชุดข้อมูล คือเส้นสมการทำนายจากสมการ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้

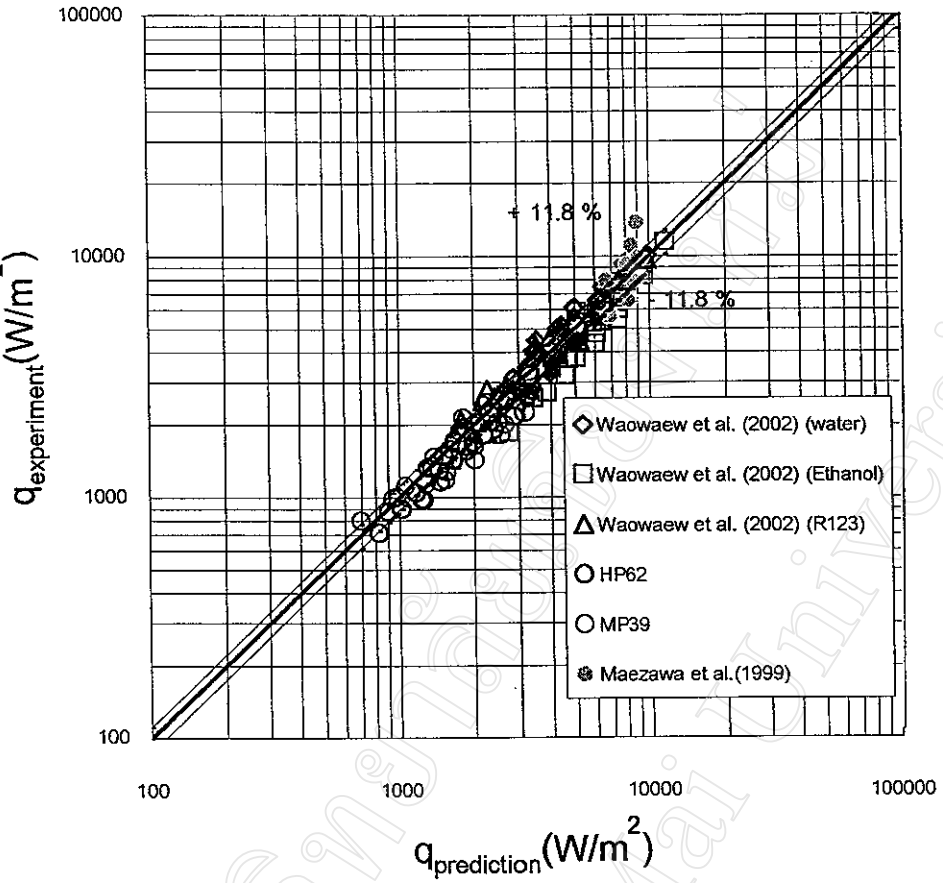
ว่ากลุ่มข้อมูลที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่นเกาะกลุ่มทับกับเส้นกราฟจากสมการการทำนาย โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ± 11.8% ดังนั้นสมการนี้จึงสามารถใช้ได้กับท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้สาร HP62 และ MP39 เป็นสารทำงาน



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาค่าได้ต่อค่า q* ที่มุมเอียง 90 องศา

เส้นทึบในกราฟคือเส้นสมการของ

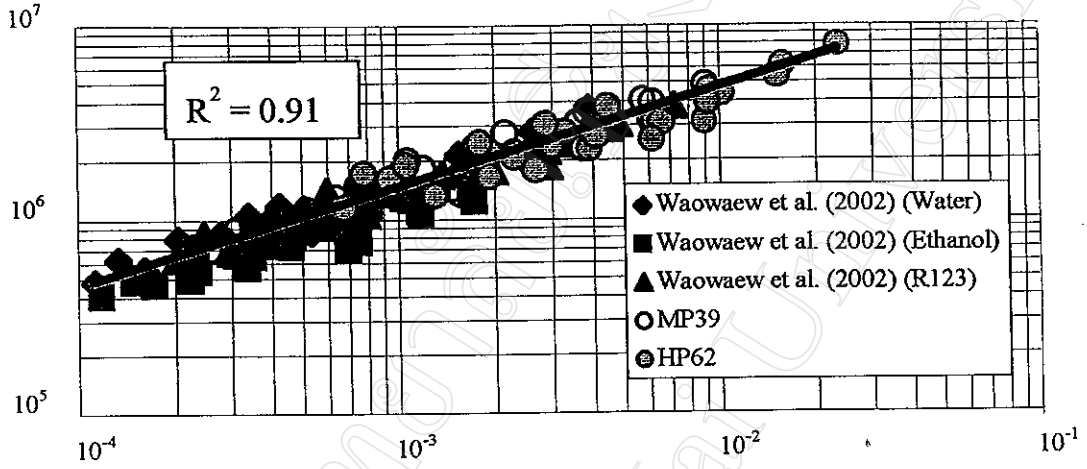
$$q_{90}^{*} = 6\times10^{7}\left[\left(\frac{Le}{d}\right)^{-0.65}\left(\frac{\omega^{2}R}{g}\right)^{0.5} Bo^{-0.85}Ek^{0.1}Ja^{-0.15}\,Pr^{-0.35}\left(\frac{Cp_{v}}{Cp_{l}}\right)^{4.6}\left(1-\frac{\rho_{v}}{\rho_{l}}\right)^{0.19}\right]^{0.57}$$



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 4.2 กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาได้กับค่า q* จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของเส้นสมการแนวโน้มของ Waoweaw et al., (2002) ที่ลากผ่านจุดการทดลองของงานวิจัยนี้ ที่มุมเอียง 0 องศา แต่จะขาดข้อมูลของ Maezawa et al., (1999) เนื่องจาก Maezawa et al., (1999)ได้ทำการทดลองที่มุมเอียง 90 เท่านั้น ดังนั้นที่มุมเอียง0 องศาจึงมีแต่ข้อมูลของ Waoweaw et al., (2002) และของงานวิจัยนี้ จุดของข้อมูลแต่ละชุดจะกระจัดกระจายรอบๆ เส้นกราฟจากสมการโดยมีค่าความเชื่อมั่นในการตัดสินใจ(R^2) เท่ากับ 0.91 ซึ่งแสดงว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์เป็นอย่างดี และเมื่อพิจารณาอย่างละเอียดถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ก็จะพบว่าจะเรียงจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในใหญ่ไปหาเล็ก ซึ่งคล้ายกับอัตราส่วนสนทัดก็จะเรียงจากอัตราส่วนสนทัดมากไปหาน้อย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแนวโน้มค่าตัวแปรไร้มิติที่หาได้เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า q* เพิ่มขึ้น โดยเส้นกราฟสามารถเขียนเป็นสมการดังแสดงในสมการที่ 4.4

สามารถพิสูจน์ว่าสมการที่ 4.4 นั้นว่าสามารถนำมาไปใช้ได้จริงโดยพิจารณาตามรูปที่ 4.22 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสมการการทำนายกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลการทดลอง เส้นที่ลากผ่านกลุ่มของชุดข้อมูล คือเส้นที่ได้จากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของข้อมูลการทดลองที่เท่ากับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทำนายได้จากสมการ 4.4 โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 9.6 % จึงสามารถยอบรับว่าสมการนี้ว่าใช้ได้กับท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้สาร HP62 และ MP39 เป็นสารทำงาน

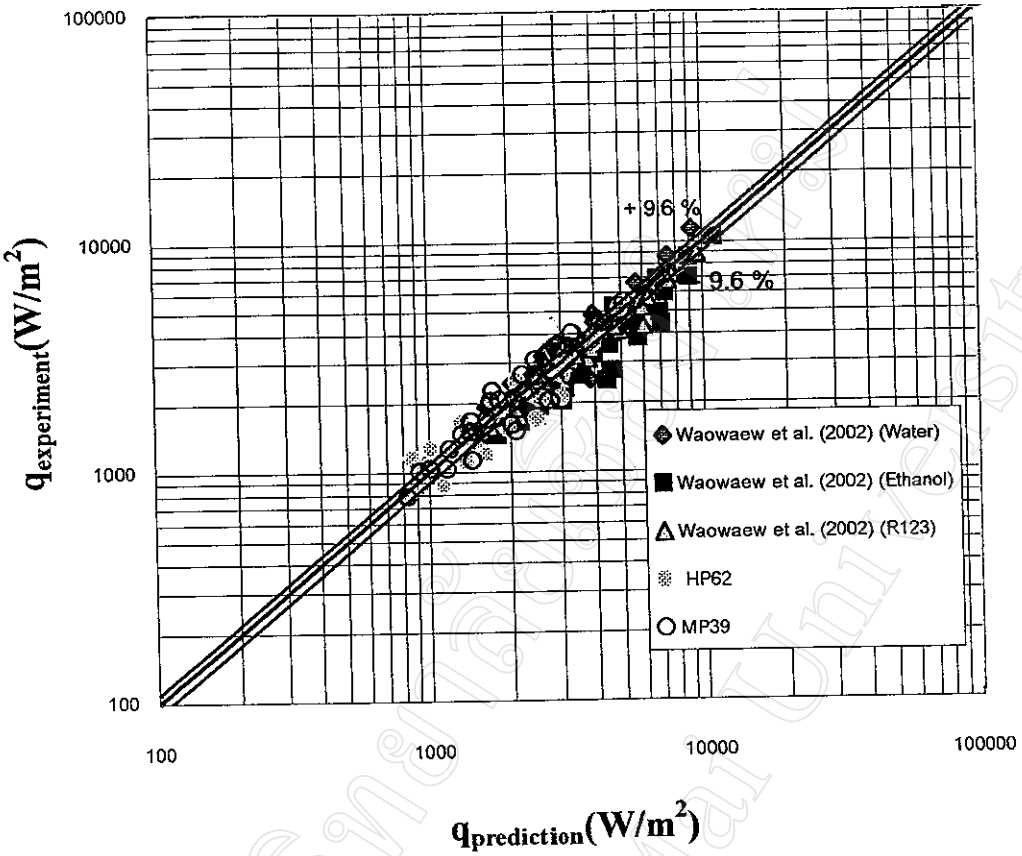


$$(Le/d)^{-0.65}(\omega^2R/g)^{0.55}Bo^{-0.88}Ek^{0.1}Ja^{-0.1}Pr^{-0.38}(Cp_v/Cp_l)^{4.9}(1-(\rho_v/\rho_l))^{0.21}$$

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาค่าได้ต่อค่า q* ที่มุมเอียง 0 องศา

เส้นทึบในกราฟคือเส้นสมการของ

$$q_0^* = 5\times10^7\left[\left(\frac{Le}{d}\right)^{-0.65}\left(\frac{\omega^2R}{g}\right)^{0.55}Bo^{-0.88}Ek^{0.1}Ja^{-0.1}Pr^{-0.38}\left(\frac{Cp_v}{Cp_l}\right)^{4.9}\left(1-\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.21}\right]^{0.51}$$



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณในสมการ 4.4 ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่จากการทดลอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University