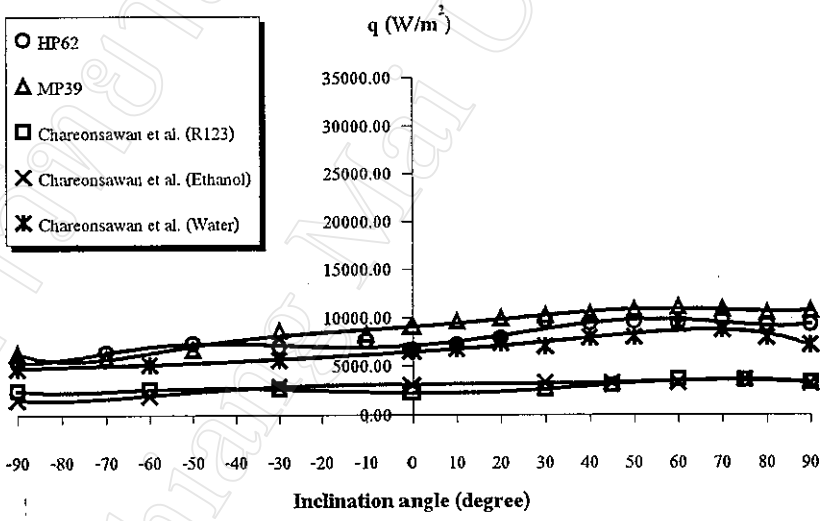
บทที่ 4
ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

4.1 ผลของมุมเอียงที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงการทำงาน (องศา) เทียบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งมุมเอียงต่างๆ (W/m^2) ของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร ความยาวรวมของท่อ 15 เมตร สารทำงานที่ใช้ คือ HP62 และ MP39 เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Chareonsawan et al. (2000) ซึ่งใช้ R123 เอทานอล และน้ำ เป็นสารทำงาน ที่สภาวะการทำงานเดียวกัน

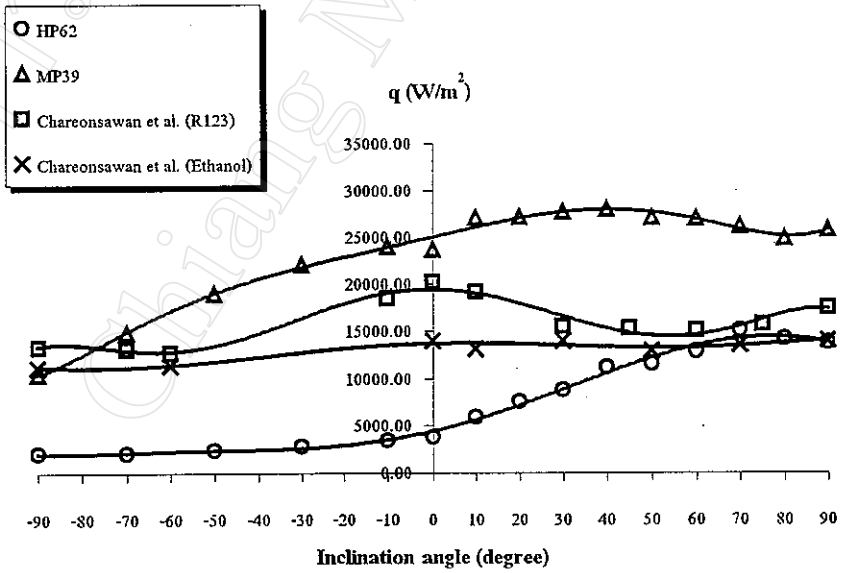


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงการทำงานกับ q ของท่อทดสอบขนาด 0.66 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร ความยาวทั้งหมด 15 เมตร

จากกราฟจะเห็นว่าที่ทุกๆมุมเอียงการทำงาน ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะไม่แตกต่างกันมากนัก สังเกตจากเส้นกราฟที่มีลักษณะเกือบจะเป็นแนวระดับ โดยสารทำงาน HP62 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 9699.52 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน 70 องศา และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำสุด 5348.71 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน -90 องศา สำหรับสารทำงาน MP39 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 11056.66 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน 60 องศา และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำสุด 5815.72 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน -70 องศา และจะสังเกตเห็นว่าท่อความร้อน

สามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีการให้ความร้อนทางด้านบน (Top heat mode) หรือมีมุมเอียงการทำงานเป็นลบ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากที่สุดของ Maezawa et al. (1996) หรือขนาดวิกฤต ดังสมการที่ (1.1) โดยขนาดวิกฤตเมื่อใช้สารทำงาน HP62 คือ 0.893 มิลลิเมตร และขนาดวิกฤตเมื่อใช้สารทำงาน MP39 คือ 1.456 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้สภาวะภายในท่อความร้อนมีลักษณะเป็นก้อนไอสลับกับของเหลวไปตลอดความยาวของท่อ จึงทำให้ท่อความร้อนสามารถทำงานได้ที่ทุกๆมุมเอียงการทำงาน แต่พฤติกรรมเช่นนี้จะเห็นได้ชัดเจนก็ต่อเมื่อความยาวส่วนทำระเหยของท่อมีค่าน้อยๆ และความยาวรวมของท่อยาวมากๆ เช่นในกรณีนี้เท่านั้น

รูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงการทำงาน เทียบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งมุมเอียงต่างๆ ของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.06 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร ความยาวรวมของท่อ 15 เมตร สารทำงานที่ใช้ คือ HP62 และ MP39 เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Chareonsawan et al.(2000) ซึ่งใช้ R123 และ เอทานอล เป็นสารทำงาน ที่สภาวะการทำงานเดียวกัน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงการทำงานกับ q ของท่อทดสอบขนาด 1.06 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร ความยาวทั้งหมด 15 เมตร

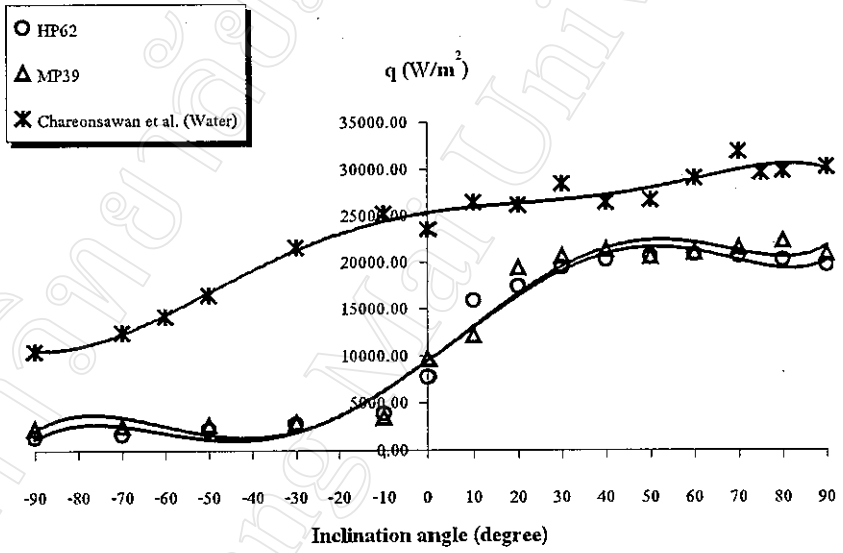
จากเส้นกราฟจะพบว่าเมื่อใช้ HP62 เป็นสารทำงานนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 แล้ว จะพบว่า ท่อความร้อนจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าเมื่อทำงานในสภาวะที่มีการให้ความร้อนทางด้านล่าง (Bottom heat mode) หรือมีมุมเอียงการทำงานเป็นบวกโดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 15064.20 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน 70 องศา และอัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆ ลดลงเมื่อมีมุมเอียงการทำงานลดลง จนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำสุด 2035.70 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน -90 องศา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนนี้มีค่ามากกว่าขนาดวิกฤต จึงทำให้สภาพภายในท่อไม่มีลักษณะเป็นก้อนไอสลับกับของเหลว พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนที่มุมเอียงต่างๆจึงเปลี่ยนไป

เปรียบเทียบกับเมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน โดยจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 27956.98 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน 40 องศา และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำสุด 10517.80 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน -90 องศา จะพบว่าท่อความร้อนที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงานนั้นจะสามารถให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงถึงแม้จะมีมุมเอียงการทำงานเป็นลบ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนยังมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤต คือ 1.456 มิลลิเมตร จึงทำให้สภาพภายในท่อยังคงมีลักษณะเป็นก้อนไอสลับกับของเหลว เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Chareonsawan et al.(2000) ซึ่งใช้ R123 และเอทานอล เป็นสารทำงานซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต 1.92 มิลลิเมตร และ 3.35 มิลลิเมตร ตามลำดับ

รูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงการทำงาน เทียบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งมุมเอียงต่างๆ ของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร ความยาวรวมของท่อ 15 เมตร สารทำงานที่ใช้ คือ HP62 และ MP39 เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Chareonsawan et al.(2000) ซึ่งใช้น้ำเป็นสารทำงานที่สภาวะการทำงานเดียวกัน

จากเส้นกราฟเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 และ 4.2 แล้ว จะเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อใช้สารทำงาน HP62 และ MP39 นั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะมีค่าสูงเมื่อมีมุมเอียงการทำงานเป็นบวกเท่านั้น คือ จะมีค่าสูงสุด 20712.25 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน 60 องศา สำหรับ HP62 และ 22237.48 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน 80 องศา สำหรับ MP39 แต่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าต่ำสุด 1370.50 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน -90 องศา สำหรับ HP62 และ 2298.90 W/m^2 ที่มุมเอียงการทำงาน -90 องศา สำหรับ MP39 เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ คือ 2.03 มิลลิเมตร นี้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของทั้งสองสารทำงาน สภาพภายในท่อไม่มีลักษณะเป็นก้อนไอสลับกับของเหลวอีกต่อไป พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนจึงเปลี่ยนแปลงไปด้วย

เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Chareonsawan et al.(2000) เมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงานนั้น จะพบว่าท่อความร้อนสามารถให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงและเกินค่าความผิดพลาด ถึงแม้ว่าจะมีมุมเอียงการทำงานเป็นลบ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ใช้มีขนาดเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต คือ สำหรับน้ำจะมีขนาด 5.3 มิลลิเมตร ทำให้สภาพภายในท่อมีลักษณะเป็นก้อนไอสลับกับของเหลวตลอดความยาวของท่อ จึงทำให้ท่อความร้อนสามารถทำงานได้ที่ทุกๆมุมเอียงการทำงาน



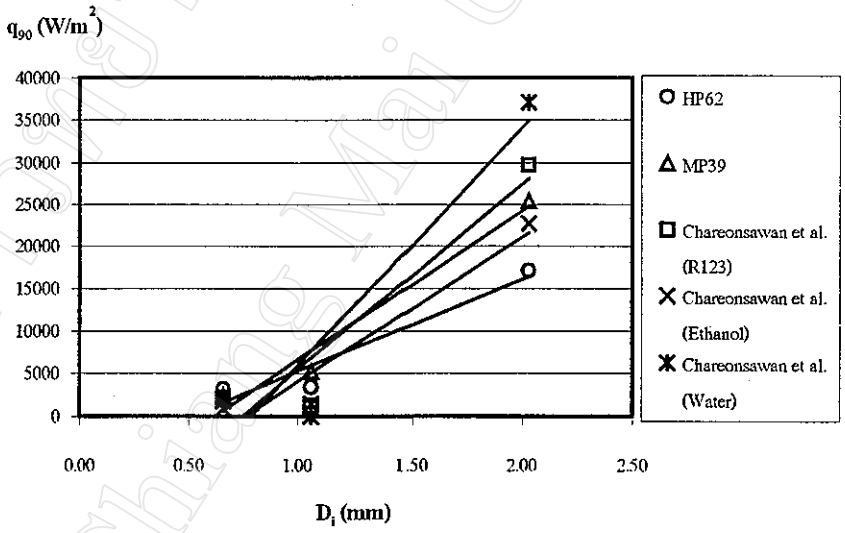
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงการทำงานกับ q ของท่อทดสอบขนาด 2.03 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร ความยาวทั้งหมด 15 เมตร

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า มุมเอียงการทำงานมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบ โดยสำหรับท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตนั้น มุมเอียงการทำงานช่วง 60 – 90 องศา จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และสำหรับท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตจะสามารถทำงานที่มุมเอียงการทำงานเป็นลบได้ดีเทียบเท่ากับที่มุมเอียงการทำงานเป็นบวก

4.2 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศาเท่านั้น เนื่องจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา และ –90 องศา ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวมกับค่าการนำความร้อนของท่อคาปิลลารี่ทองแดง จึงไม่นำมากล่าวในหัวข้อนี้

รูปที่ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน(D_i) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา(q_{90}) ของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบที่มีความยาวของส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร ความยาวรวม 5 เมตร สารทำงาน HP62 และ MP39 เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Chareonsawan et al. (2002) ซึ่งใช้ R123 เอทานอล และน้ำ เป็นสารทำงานในสภาวะการทำงานเดียวกัน



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน(D_i) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา(q_{90}) ความยาวของส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร ความยาวรวม 5 เมตร

พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา (q_{90}) มีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มเป็นดังเส้นตัวแทนที่ลากผ่าน กล่าวคือ สำหรับ HP62 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 3166.6 W/m^2 , 3404.1 W/m^2 และ 17053.2 W/m^2 เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาด 0.66 มิลลิเมตร 1.06 มิลลิเมตร และ 2.03 มิลลิเมตร ตาม

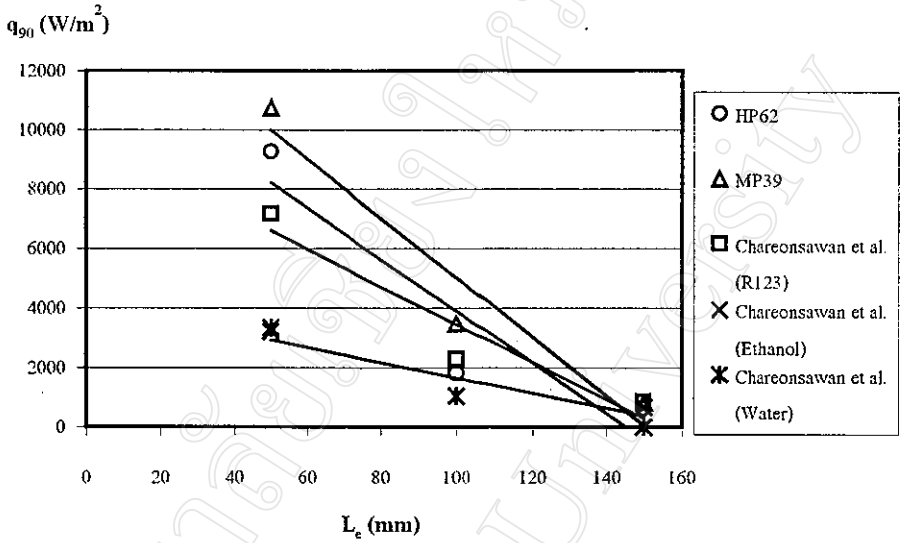
ลำดับ และสำหรับ MP39 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 2375.0W/m^2 , 5252.1 W/m^2 และ 25352.8 W/m^2 เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาด 0.66 มิลลิเมตร 1.06 มิลลิเมตร และ 2.03 มิลลิเมตรตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดสอบของ Chareonsawan et al.(2002) ซึ่งมี R123 เอทานอล และน้ำเป็นสารทำงาน ก็จะพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เกิดความดันตกคร่อมของก้อนไอที่เคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่น ยิ่งเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาดเล็กเท่าใด ค่าความดันตกคร่อมก็จะยิ่งมีมากขึ้น ทำให้ก้อนไอเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นยากขึ้นเป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยลง

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา โดยท่อขนาด 2.03 มิลลิเมตร จะให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุด รองลงมา คือ 1.06 มิลลิเมตร และ 0.66 มิลลิเมตร ตามลำดับ

4.3 ผลของความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อนและส่วนควบแน่นที่เท่ากันของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.2 คือ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นที่เท่ากันที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศาเท่านั้น เนื่องจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา และ –90 องศา ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวมกับค่าการนำความร้อนของท่อคาปิลลารี่ทองแดง จึงไม่นำมากล่าวในหัวข้อนี้

รูปที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อนและส่วนควบแน่นที่เท่ากันของท่อความร้อน(L_e) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา(q_{90}) ของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66 มิลลิเมตร ความยาวรวม 15 เมตร สารทำงาน HP62 และ MP39 เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ของ Chareonsawan et al. (2002) ซึ่งใช้ R123 เอทานอล และน้ำ เป็นสารทำงานในสภาวะการทำงานเดียวกัน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของส่วนทำระเหยของท่อความร้อน(L_e) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา(q_{90}) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66 มิลลิเมตร ความยาวรวม 15 เมตร

พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศามีแนวโน้มจะลดลงเมื่อความยาวของส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มเป็นดังเส้นตัวแทนที่ลากผ่าน กล่าวคือ สำหรับ HP62 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 9260.5 W/m^2 , 1802.5 W/m^2 และ 636.2 W/m^2 เมื่อความยาวของส่วนทำระเหยมีขนาด 50 มิลลิเมตร 100 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ และสำหรับ MP39 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 10737.33 W/m^2 , 3463.52 W/m^2 และ 812.87 W/m^2 เมื่อความยาวของส่วนทำระเหยมีขนาด 50 มิลลิเมตร 100 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดสอบของ Chareonsawan et al. (2002) ซึ่งมี R123 เอทานอล และน้ำเป็นสารทำงาน ก็จะพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะยิ่งค่าความยาวของส่วนกันความร้อนน้อยลงเท่าใด ระยะทางระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นก็จะน้อยลงเท่านั้น เป็นผลให้ก้อนไอที่ทำหน้าที่พาความร้อนจากส่วนทำระเหย สามารถเคลื่อนไปสู่ส่วนควบแน่นได้โดยง่าย เนื่องจากมีแรงเสียดทานน้อยลง จึงให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น

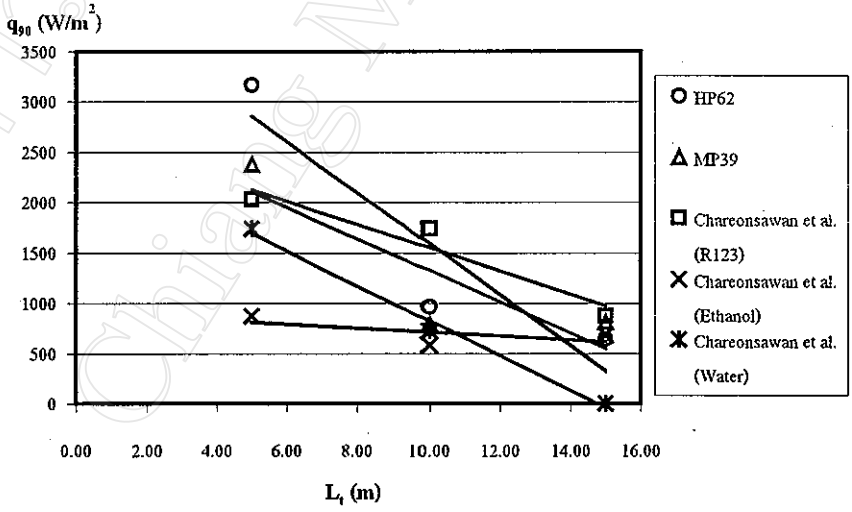
จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ที่ความยาวรวมค่าหนึ่งๆ ขนาดความยาวของส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นที่เท่ากัน มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง

การทำงาน 90 องศา โดยความยาวของส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จะให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุด รองลงมา คือ 100 มิลลิเมตร และ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ

4.4 ผลของความยาวรวมของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 คือ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของความยาวรวมของท่อความร้อน ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศาเท่านั้น เนื่องจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา และ –90 องศา ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวมกับค่าการนำความร้อนของท่อคาปิลลารี่ทองแดง จึงไม่นำมากล่าวในหัวข้อนี้

รูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวรวมของท่อความร้อน(L_t) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา (q_{90}) ของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66 มิลลิเมตร ความยาวของส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร สารทำงาน HP62 และ MP39 เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Chareonsawan et al. (2002) ซึ่งใช้ R123 เอทานอล และน้ำ เป็นสารทำงานที่สภาวะการทำงานเดียวกัน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวรวมของท่อความร้อน (L_t) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา(q_{90}) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66 มิลลิเมตร ความยาวส่วนทำระเหย 150 มิลลิเมตร

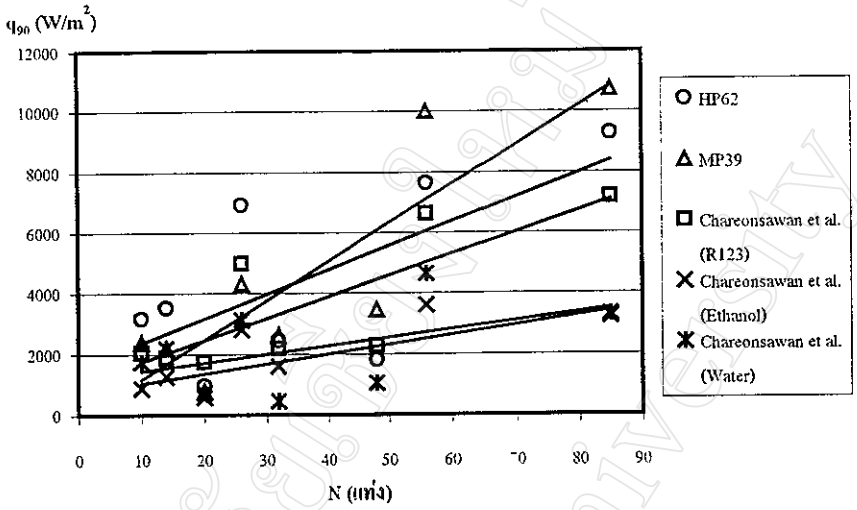
พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศามีแนวโน้มจะลดลงเมื่อความยาวรวมของท่อความร้อนเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเป็นดังเส้นตัวแทนที่ลากผ่าน กล่าวคือ สำหรับ HP62 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 3166.6 W/m^2 , 961.3 W/m^2 และ 636.2 W/m^2 เมื่อความยาวรวมของท่อความร้อนมีขนาด 5 เมตร 10 เมตร และ 15 เมตร ตามลำดับ และสำหรับ MP39 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 2375.0 W/m^2 , 791.7 W/m^2 และ 812.9 W/m^2 เมื่อความยาวรวมของท่อความร้อนมีขนาด 5 เมตร 10 เมตร และ 15 เมตร ตามลำดับและเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดสอบของ Chareonsawan et al. (2002) ซึ่งมี R123 เอทานอล และน้ำเป็นสารทำงาน ก็จะพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะยิ่งความยาวรวมของท่อมีมากขึ้นเท่าใด ค่าความเสียดทานที่ผนังท่อก็จะมากขึ้นเท่านั้น เป็นผลให้ก้อนไอที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนเคลื่อนไปสู่ส่วนควบแน่นได้ยาก จึงทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ที่ความยาวของส่วนทำระเหยค่าหนึ่งๆ ขนาดความยาวรวมของท่อความร้อน มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา โดยความยาวรวมของท่อความร้อน 5 เมตร จะให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุด รองลงมา คือ 10 เมตร และ 15 เมตร ตามลำดับ

4.5 ผลของจำนวนแท่งของท่อความร้อนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของจำนวนแท่งของท่อความร้อน ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศาเท่านั้น เนื่องจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา และ –90 องศา ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวมกับค่าการนำความร้อนของท่อคาปิลลารี่ทองแดง จึงไม่นำมากล่าวในหัวข้อนี้

รูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแท่งของท่อความร้อน(N) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา (q_{90}) ของท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66 มิลลิเมตร สารทำงาน HP62 และ MP39 เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Chareonsawan et al. (2002) ซึ่งใช้ R123 เอทานอล และน้ำ เป็นสารทำงานที่สภาวะการทำงานเดียวกัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแท่งของท่อความร้อน (N) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา(q_{90}) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.66 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.7 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศามีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนแท่งของท่อความร้อนเพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเป็นดังเส้นตัวแทนที่ลากผ่าน กล่าวคือ สำหรับ HP62 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 9260.45 W/m^2 เมื่อจำนวนแท่งของท่อความร้อนมีค่าเท่ากับ 85 แท่ง และสำหรับ MP39 จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 10737.33 W/m^2 เมื่อจำนวนแท่งของท่อความร้อนมีค่าเท่ากับ 85 แท่งเช่นเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดสอบของ Chareonsawan et al. (2002) ซึ่งมี R123 เอทานอล และน้ำเป็นสารทำงานแล้ว ก็จะพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะยิ่งจำนวนแท่งของท่อทดสอบมีมากขึ้นเท่าใด ก้อนไอที่ทำหน้าที่นำความร้อนจากส่วนทำระเหยก็จะยิ่งสามารถวิ่งไปยังส่วนควบแน่นได้มากขึ้นเท่านั้น

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า จำนวนแท่งของท่อความร้อน มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา โดยยิ่งจำนวนแท่งของท่อความร้อนยิ่งมากขึ้นเท่าใด ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น

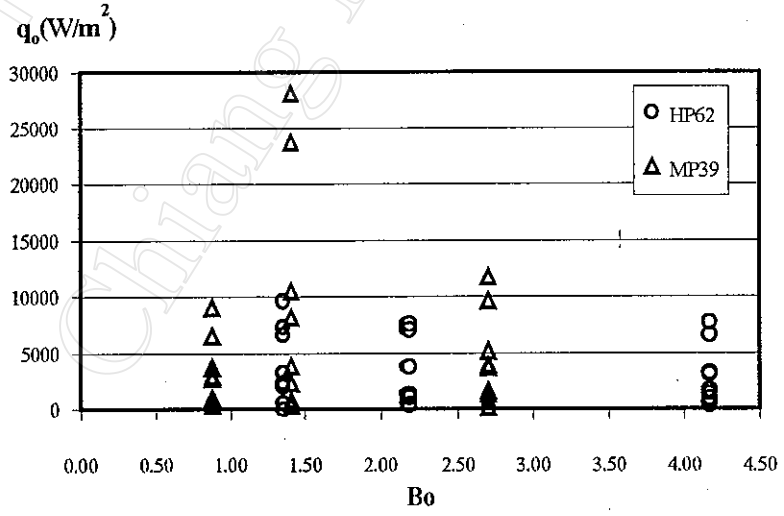
4.6 ผลของตัวแปรไร้มิติที่หาได้ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ

ในการศึกษาผลของตัวแปรไร้มิติที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนนั้น เนื่องจากข้อมูลมีความแตกต่างทางด้านกายภาพ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความยาวของส่วนทำระเหย ความยาวรวมของท่อ และสารทำงาน ดังนั้น เพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา 0 องศา และ –90 องศา จึงจะหาในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติกับตัวแปรไร้มิติที่หาได้

ในการศึกษาผลของตัวแปรไร้มิตินี้ได้นำเอาข้อมูลและผลของตัวแปรไร้มิติของ Chareonsawan et al. (2002) มาใช้ในการประยุกต์หาตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องด้วย ส่วนข้อมูลการทดสอบของผู้วิจัยแสดงไว้ในภาคผนวก ก

4.6.1 ผลของตัวเลขบอนด์ (Bond number)

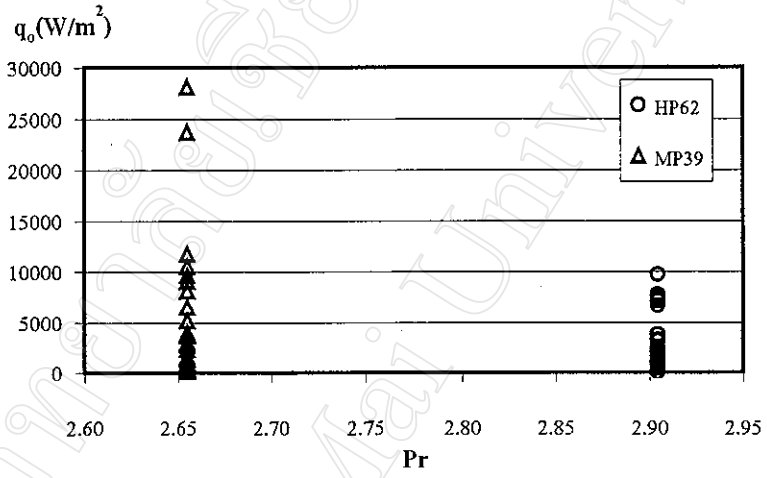
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของบอนด์ที่หาได้กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์กันแต่อย่างใด เนื่องจากข้อมูลกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ ถึงแม้ว่าจะมีการเกาะกลุ่มกันในแต่ละสารทำงาน แต่เมื่อพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆแล้ว เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวของส่วนทำระเหย ความยาวรวมของท่อ และอื่นๆ ก็จะพบว่าข้อมูลมีการกระจายกันอย่างไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Bond number (Bo) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา

4.6.2 ผลของตัวเลขแพรนตัน (Prandtl number)

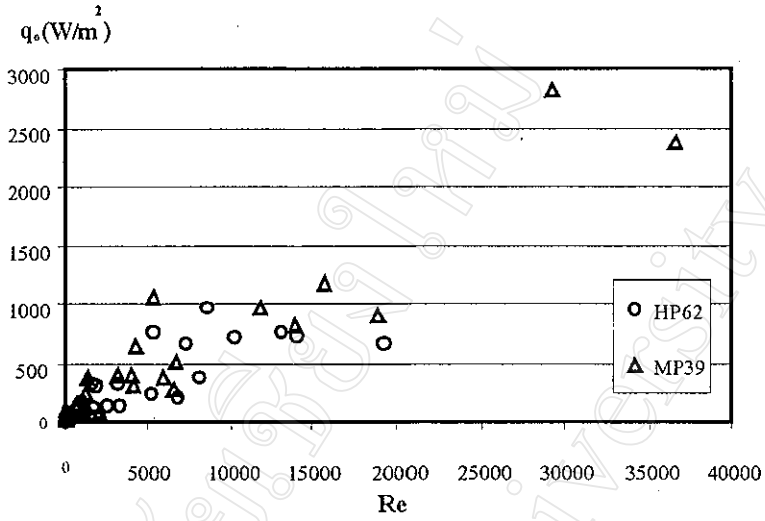
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขแพรนตันที่หาได้กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา แม้ว่าจะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์กันแต่อย่างใด แต่ข้อมูลการทดลอง มีการเกาะกลุ่มกันในแต่ละสารทำงานอย่างเป็นระเบียบ จึงอาจสามารถนำมาวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ได้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Prandtl number (Pr) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา

4.6.3 ผลของตัวเลขเรย์โนลดส์ (Reynolds number)

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของเรย์โนลดส์ที่หาได้กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์กันแต่อย่างใด เนื่องจากข้อมูลกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ และเมื่อพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆแล้ว เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวของส่วนทำระเหย ความยาวรวมของท่อ และอื่นๆ ก็จะพบว่าข้อมูลมีการกระจายกันอย่างไม่เป็นระเบียบเช่นกัน



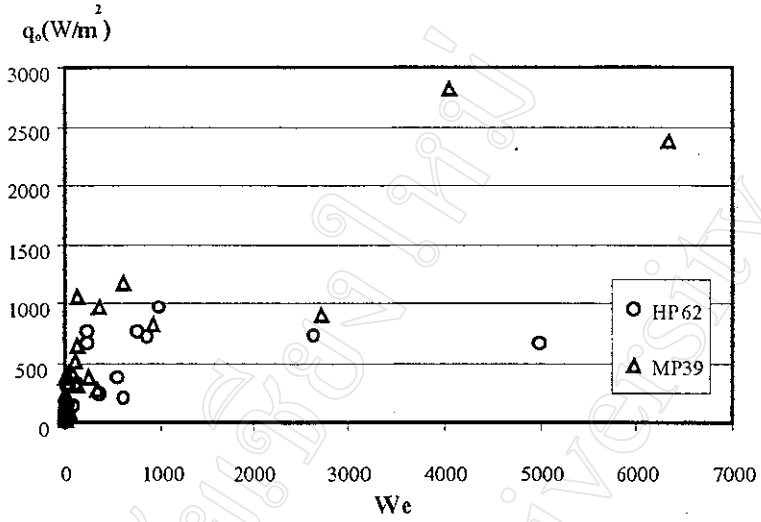
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number (Re) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา

4.6.4 ผลของตัวเลขเวเบอร์ (Weber number)

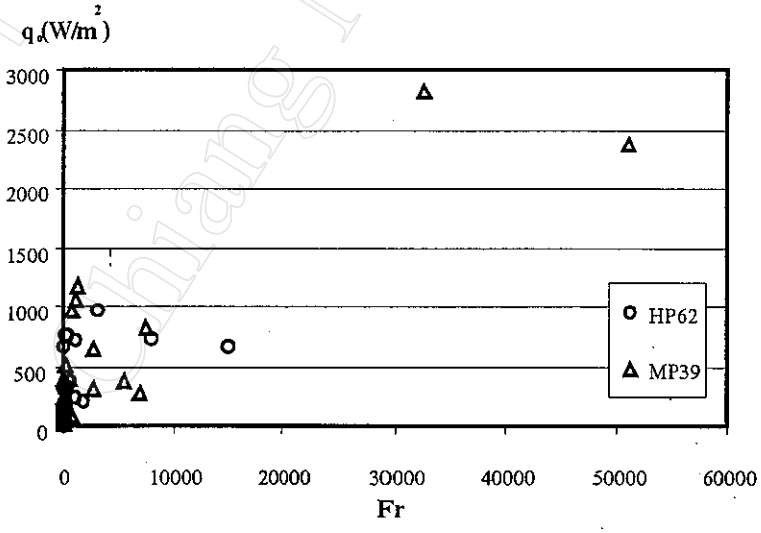
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของเวเบอร์ที่หาได้กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์กันแต่อย่างใดเช่นเดียวกัน เนื่องจากข้อมูลกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ และเมื่อพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆแล้ว เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวของส่วนทำระเหย ความยาวรวมของท่อ และอื่นๆ ก็จะพบว่าข้อมูลมีการกระจายกันอย่างไม่เป็นระเบียบเช่นกัน

4.6.5 ผลของตัวเลขฟรูด (Froude number)

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขของฟรูดที่หาได้กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์กันแต่อย่างใดเช่นเดียวกัน เนื่องจากข้อมูลกระจัดกระจายไม่เป็นระเบียบ และเมื่อพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆแล้ว เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวของส่วนทำระเหย ความยาวรวมของท่อ และอื่นๆ ก็จะพบว่าข้อมูลมีการกระจายกันอย่างไม่เป็นระเบียบเช่นกัน



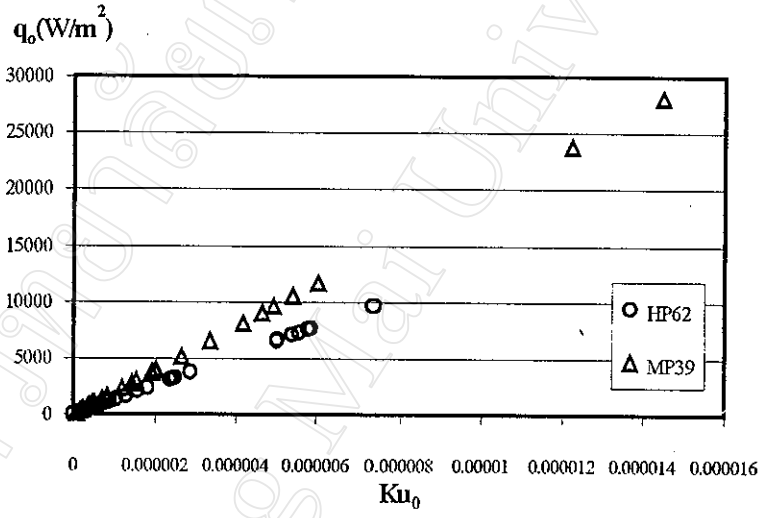
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Weber number (We) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Froude number (Fr) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา

4.6.6 ผลของตัวเลขคูทาเทลัดเซ (Kutateladze number)

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคูทาเทลัดเซกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา จะสังเกตเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันโดยแบ่งแยกอย่างชัดเจนในแต่ละสารทำงาน และข้อมูลการทดลองเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ และเมื่อพิจารณาตัวแปรแต่ละตัว คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาวส่วนทำระเหยและความยาวรวมของท่อความร้อนแล้ว ก็พบว่าข้อมูลมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเช่นกัน ผู้วิจัยจึงเลือกตัวเลขคูทาเทลัดเซมาวิเคราะห์ผลของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งจะนำสมการของ Chareonsawan et al. (2002) มาใช้ด้วย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Kutateladze number (Ku) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา

จากข้อมูลการทดลองของ Chareonsawan et al. (2002) ได้ทราบถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติที่หาได้ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ Ku_{90} ที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$Ku_{90} = 22.7\left[\left(\frac{D_i^{1.2}}{L_e^{0.7}L_t^{0.5}}\right)\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.01}\left(\frac{\sigma^2\rho_v}{\mu_v^3\omega}\right)^{0.01} Pr^{-1.2}\, N^{0.05}\right]^{1.25} \qquad (4.1)$$

และความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา แสดงในสมการที่ (4.2)

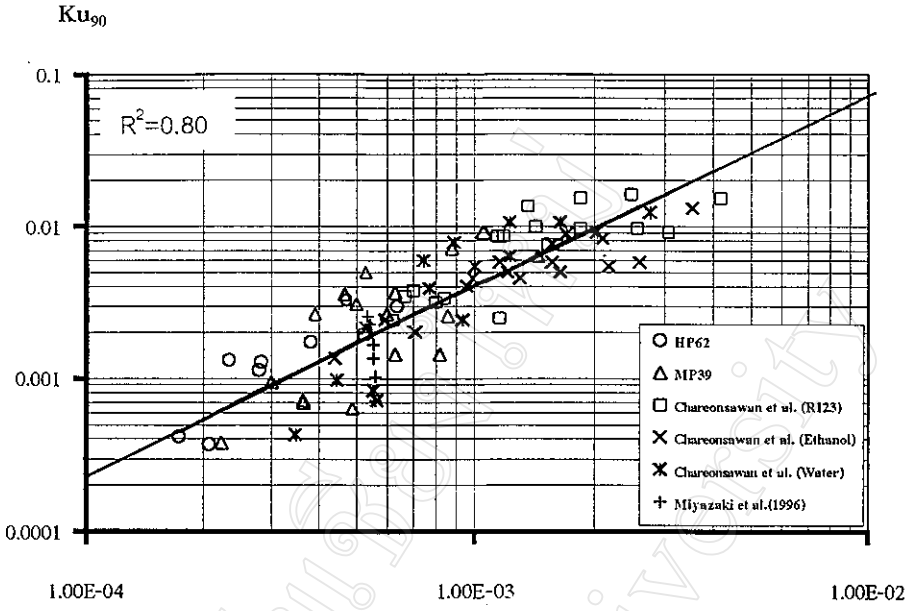
$$Ku_0 = 0.7\left[\left(\frac{D_i}{L_e^{0.9}L_t^{0.1}}\right)\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.1}\left(\frac{\sigma^2\rho_v}{\mu_v^3\omega}\right)^{0.01}Pr^{-1.2}N^{0.2}\right]^{1.34} \quad (4.2)$$

และความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติที่มุมเอียงการทำงาน -90 องศา แสดงในสมการที่ (4.3)

$$Ku_{-90} = 0.019\left[\left(\frac{D_i^{0.7}}{L_e^{0.6}L_t^{0.1}}\right)\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.07}\left(\frac{\sigma^2\rho_v}{\mu_v^3\omega}\right)^{0.05}Pr^{-1.2}N^{0.3}\right]^{1.52} \quad (4.3)$$

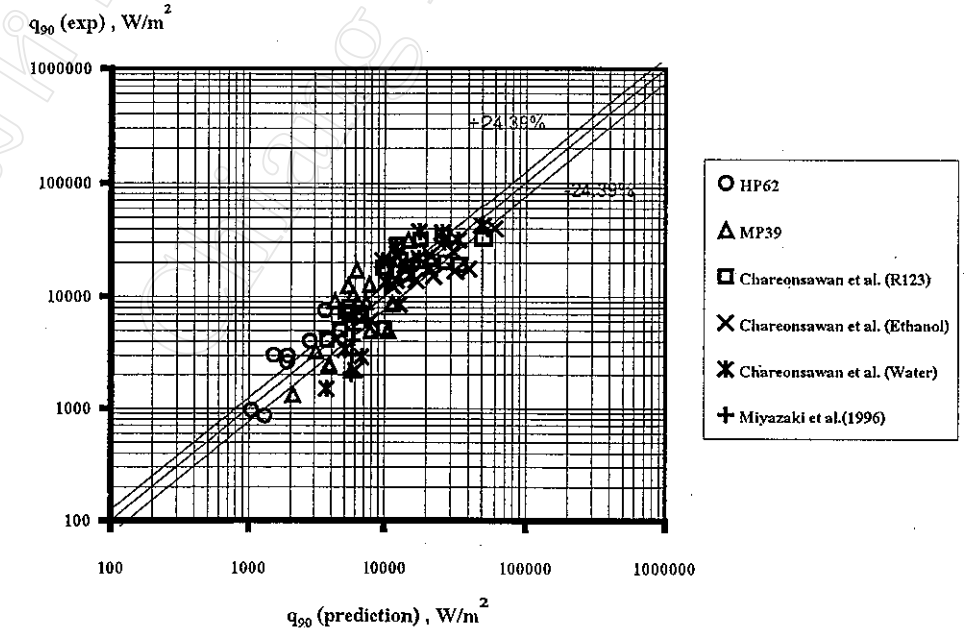
รูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาได้ต่อค่า Kutateladze number (Ku) เส้นในกราฟ คือ สมการแนวโน้มของ Chareonsawan et al. (2002) ที่ลากผ่านจุดการทดลองของงานวิจัยนี้ที่สภาวะมุมเอียง 90 องศา โดยมีข้อมูลการทดลองของ Chareonsawan et al. (2002) และ Miyazaki et al. (1996) รวมอยู่ด้วย โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้ จะมีเพียงข้อมูลที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่มากกว่าค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวมกับค่าการนำความร้อน ของท่อคาปิลลารี่ทองแดง และเป็นข้อมูลของท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตเท่านั้น เพราะเป็นลักษณะเฉพาะของท่อความร้อนแบบคาปิลลารี่ จะพบว่าจุดการทดลองของข้อมูลทุกชุดนั้นจะกระจายอยู่รอบๆเส้นสมการ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ(The coefficient of determination, R^2) 0.80 นั่นหมายความว่า ข้อมูลการทดลองของผู้วิจัยเข้ากับสมการการทำนายของ Chareonsawan et al. (2002) ได้เป็นอย่างดี

จากนั้นพิสูจน์ว่าสมการที่ (4.1) สามารถนำมาใช้ได้จริง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทำนายจากสมการที่ (4.1) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลอง โดยจะพิจารณารวมถึงข้อมูลการทดลอง ของ Chareonsawan et al. (2002) และ Miyazaki et al. (1996) ด้วย เส้นที่ลากผ่านกลุ่มของชุดข้อมูล คือ เส้นที่ได้จากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของข้อมูลการทดลองที่เท่ากับ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสมการ (4.1) พบว่าข้อมูลทั้งหมดจะกระจายรอบๆเส้น แต่เนื่องจากท่อความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยของ Miyazaki et al. (1996) นั้น มีความยาวของส่วนกันความร้อนที่ยาวกว่าความยาวของส่วนกันความร้อนในงานวิจัยนี้ ทำให้ก้อนไอที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายความร้อนไปถึงส่วนควบแน่นได้น้อย อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงต่ำกว่าที่ทำนายไว้ แต่อย่างไรก็ตามค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกราฟนี้มีค่าเท่ากับ 24.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ จึงสรุปได้ว่าสมการ (4.1) สามารถนำมาใช้ได้กับท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบที่ใช้ HP62 และ MP39 เป็นสารทำงาน ที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา



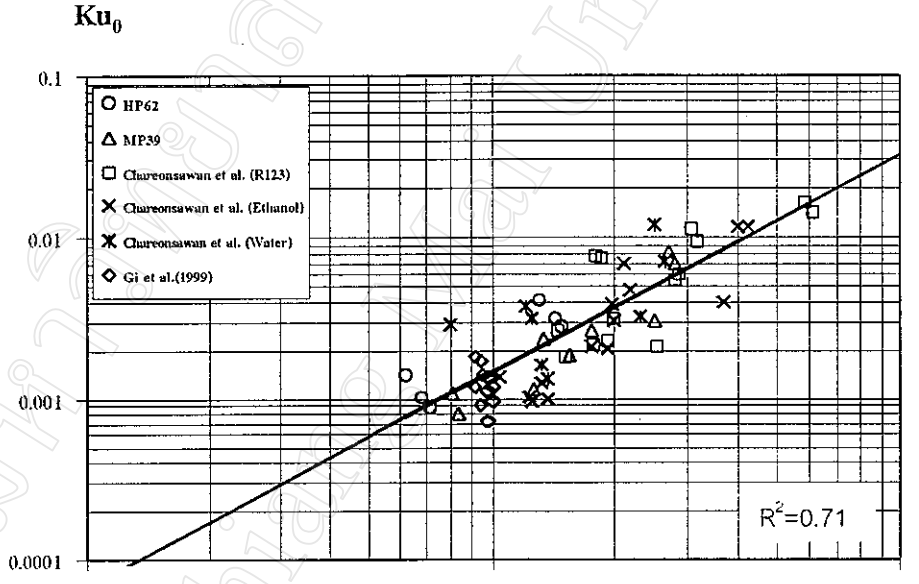
$$\left[\left(\frac{D_i^{1.2}}{L_e^{0.7}L_t^{0.5}}\right)\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.01}\left(\frac{\sigma^2\rho_v}{\mu_v^3\omega}\right)^{0.01}\mathrm{Pr}^{-1.2}\,\mathrm{N}^{0.05}\right]$$

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาได้ต่อค่า Kutateladze number (Ku) ที่มุมเอียงการทำงาน 90 องศา



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณในสมการ (4.1) ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง

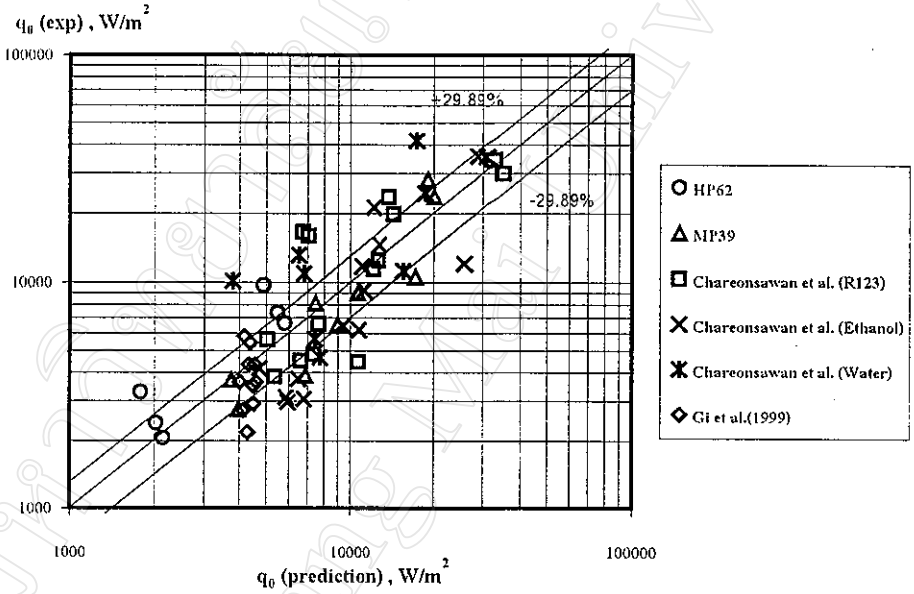
รูปที่ 4.16 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาได้ต่อค่า Kutateladze number (Ku) เส้นในกราฟ คือ สมการแนวโน้มของ Chareonsawan et al. (2002) ที่ลากผ่านจุดการทดลองของงานวิจัยนี้ที่สภาวะมุมเอียง 0 องศา โดยมีข้อมูลการทดลองของ Chareonsawan et al. (2002) และ Gi et al.(1999)รวมอยู่ด้วย โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้จะมีเพียงข้อมูลที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวมกับค่าการนำความร้อนของท่อคาปิลลารี่ทองแดง และเป็นข้อมูลของท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต เช่น จะพบว่าจุดการทดลองของข้อมูลทุกชุดนั้นจะกระจายอยู่รอบๆ เส้นสมการ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ 0.71 นั่นหมายความว่า ข้อมูลการทดลองของผู้วิจัยเข้ากับสมการการทำนายของ Chareonsawan et al. (2002) ได้เป็นอย่างดี



$$\left[\left(\frac{D_i}{L_e^{0.9}L_t^{0.1}}\right)\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.1}\left(\frac{\sigma^2\rho_v}{\mu_v^3\omega}\right)^{0.01}\mathrm{Pr}^{-1.2}\,\mathrm{N}^{0.2}\right]$$

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาได้ต่อค่า Kutateladze number (Ku) ที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา

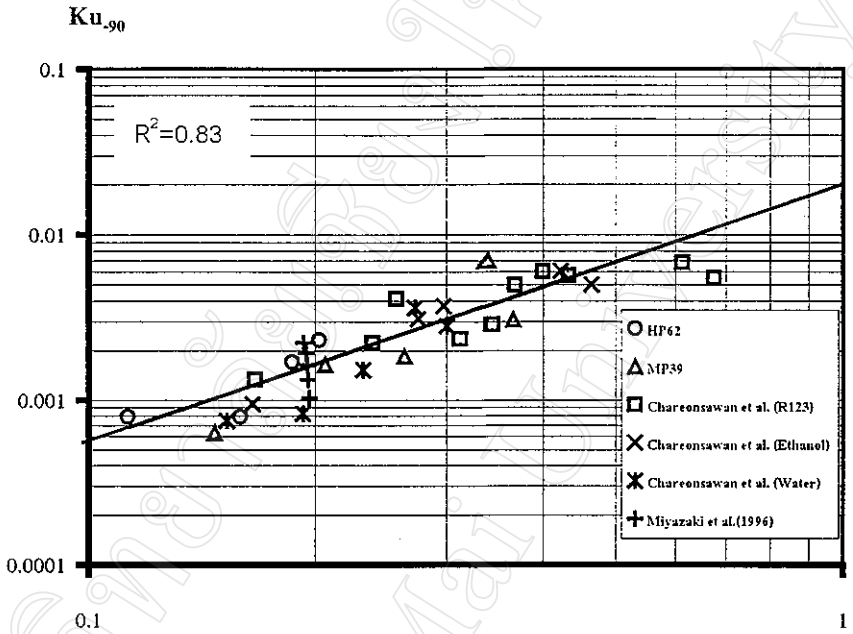
จากนั้นพิสูจน์ว่าสมการที่ (4.2) สามารถนำมาใช้ได้จริง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทำนายจากสมการที่ (4.2) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลอง โดยจะพิจารณารวมถึงข้อมูลการทดลอง ของ Chareonsawan et al. (2002) และ Gi et al.(1999) ด้วย เส้นที่ลากผ่านกลุ่มของชุดข้อมูล คือ เส้นที่ได้จากจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของข้อมูลการทดลองที่เท่ากับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสมการ (4.2) พบว่าข้อมูลทั้งหมดจะกระจายรอบๆเส้น โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 29.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ จึงสรุปได้ว่าสมการ (4.2) สามารถนำมาใช้ได้กับท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบที่ใช้ HP62 และ MP39 เป็นสารทำงาน ที่มุมเอียงการทำงาน 0 องศา



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณในสมการ (4.2) ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง

รูปที่ 4.18 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาได้ต่อค่า Kutateladze number (Ku) เส้นในกราฟ คือ สมการแนวโน้มของ Chareonsawan et al. (2002) ที่ลากผ่านจุดการทดลองของงานวิจัยนี้ที่สภาวะมุมเอียง -90 องศา โดยมีข้อมูลการทดลองของ Chareonsawan et al. (2002) และ Miyazaki et al.(1996) รวมอยู่ด้วย โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้จะมีเพียงข้อมูลที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดรวมกับค่าการนำความร้อนของท่อคาปิลลารี่ทองแดง และ เป็นข้อมูลของท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตเท่านั้น เพราะเป็นลักษณะเฉพาะของท่อความร้อนแบบ

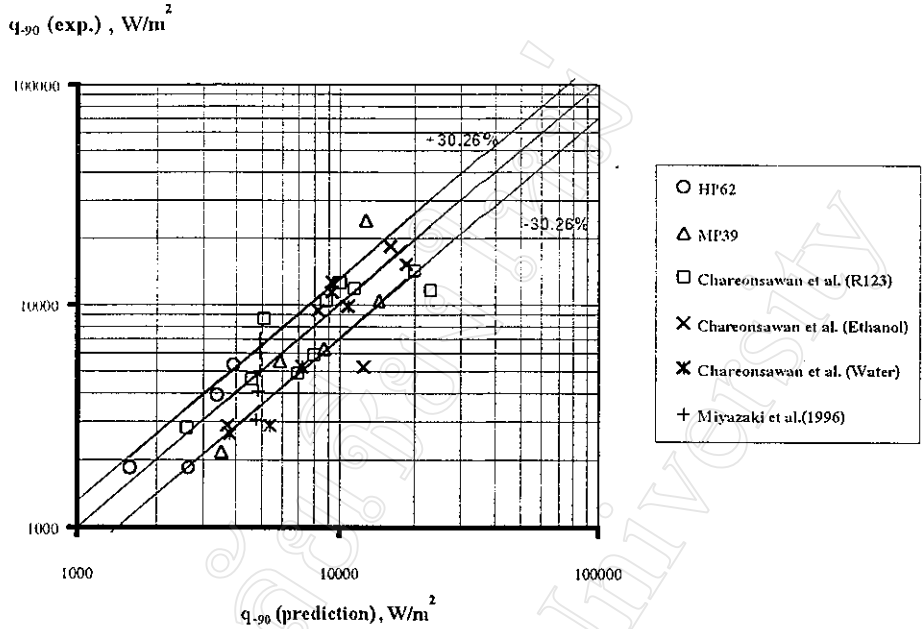
คาปิลลารี่ จะพบว่าจุดการทดลองของข้อมูลทุกชุดนั้นจะกระจายอยู่รอบๆเส้นสมการ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 0.83 นั่นหมายความว่า ข้อมูลการทดลองของผู้วิจัยเข้ากับสมการการทำนายของ Chareonsawan et al. (2002) ได้เป็นอย่างดี



$$\left[\left(\frac{D_i^{0.7}}{L_e^{0.6}L_t^{0.1}}\right)\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.07}\left(\frac{\sigma^2\rho_v}{\mu_v^3\omega}\right)^{0.05}\mathrm{Pr}^{-1.2}\,N^{0.3}\right]$$

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาได้ต่อค่า Kutateladze number (Ku) ที่มุมเอียงการทำงาน -90 องศา

จากนั้นพิสูจน์ว่าสมการที่ (4.3) สามารถนำมาใช้ได้จริง ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ทำนายจากสมการที่ (4.3) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลอง โดยจะพิจารณารวมถึงข้อมูลการทดลอง ของ Chareonsawan et al. (2002) และ Miyazaki et al.(1996) ด้วย เส้นที่ลากผ่านกลุ่มของชุดข้อมูล คือ เส้นที่ได้จากจากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของข้อมูลการทดลองที่เท่ากับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสมการ (4.3) พบว่าข้อมูลทั้งหมดจะกระจายรอบๆเส้น โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 30.26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่า ยอมรับได้ จึงสรุปได้ว่าสมการ (4.3) สามารถนำมาใช้ได้กับท่อความร้อนชนิดสั่นแบบวงรอบที่ใช้ HP62 และ MP39 เป็นสารทำงาน ที่มุมเอียงการทำงาน -90 องศา



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณในสมการ (4.3) ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University