

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ การวิเคราะห์ผลของคลื่นอุลตราโซนิกที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน การวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนการเติมสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน การวิเคราะห์ผลของมุมที่ทำต่อแนวระนาบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน และการพัฒนาแบบจำลองจากการทดลองค่าความต้านทานความร้อนกรณีมีอุลตราโซนิกประกอบ ดังนี้

4.1 ผลของคลื่นอุลตราโซนิกที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

การวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีมีและไม่มีคลื่นอุลตราโซนิกประกอบ ดังนี้

4.1.1 กรณีที่ไม่มีระบบคลื่นอุลตราโซนิกประกอบ

4.1.1.1 ผลของอุณหภูมิแหล่งความร้อนต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h_c)

พิจารณาว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นเท่ากัน และ ไม่มีความร้อนสูญเสียจากส่วนอะเดียแบติกเมื่อมีการติดตั้งฉนวนบริเวณอะเดียแบติกหนา 25.4 mm โดยฉนวนมีค่าการนำความร้อน(k) 0.04 W/m.K (<http://www.aeroflexinsulation.com/Insulation/aeroflex-ssh.htm>) โดยเมื่อคำนวณปริมาณความร้อนสูญเสียที่ส่วนอะเดียแบติก พบว่าค่าความร้อนสูญเสียมากที่สุดที่เกิดขึ้นคือ 2.52 W (3.15%) ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความร้อนที่ส่งผ่านจากส่วนทำระเหยสู่ส่วนควบแน่น จึงสามารถสมมติได้ว่าความร้อนที่ได้รับในส่วนทำระเหยเท่ากับความร้อนที่ระบายด้านส่วนควบแน่น

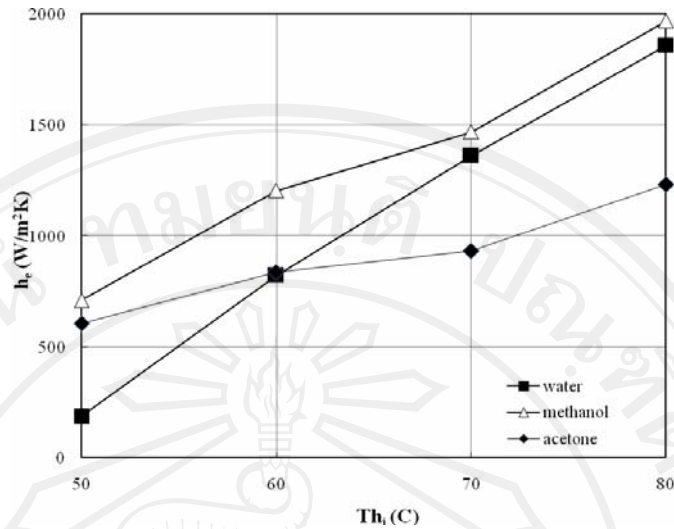
ผลการทดสอบของอุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงานภายในส่วนทำระเหย แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งอุณหภูมิน้ำร้อนด้านเข้าส่วนทำระเหย (อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อน) มีค่าระหว่าง 50 °C – 80 °C อัตราส่วนการเติมสารทำงานเท่ากับ 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกันในสารทำงาน 3 ประเภท (น้ำ เมทานอล อะซิโตน) เนื่องจากความปั่นป่วนจากการเดือดมากขึ้นตามอุณหภูมิ

ผลการวัดอุณหภูมิผนังด้านนอกของท่อความร้อน จากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ระดับความสูงจากปลายด้านล่างของส่วนทำระเหย 4, 18, 32 และ 46 cm ตามลำดับ โดยส่วนทำระเหยได้รับความร้อนจากน้ำถ่ายโอนความร้อน ที่แปรผันอุณหภูมิเป็น 50, 60, 70 และ 80 °C พบว่ามีระดับอุณหภูมิโดยเฉลี่ยจากทั้งสี่ตำแหน่งเป็น 49.0, 58.8, 67.8 และ 76.2 °C ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่า

ระดับอุณหภูมิแหล่งความร้อน 1.10, 1.30, 2.30 และ 3.90 °C ตามลำดับ โดยผลต่างระหว่างผลเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูง 4 cm และ 18 cm (หรือที่ระดับ 11 cm) กับผลเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูง 32 cm กับ 46 cm (หรือที่ระดับ 39 cm) อยู่ระหว่าง 0.10 – 0.20 °C เฉลี่ยเป็น 0.15 °C แสดงว่าสมมติฐานที่ว่าอุณหภูมิผนังท่อความร้อนส่วนทำระเหยที่ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนมีความสม่ำเสมอ (Uniform wall temperature) สามารถใช้ได้

สารทำงานเมทานอลและอะซิโตนให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าน้ำ ในช่วงอุณหภูมิ 50 °C - 60 °C และในกรณีที่อุณหภูมิน้ำถ่ายโอนความร้อนเพิ่มมากกว่า 60 °C ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอะซิโตนมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำและเมทานอลมีค่าใกล้เคียงกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ในกรณีที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนมีค่าระหว่าง 50 °C – 60 °C การเดือดของเมทานอลและอะซิโตน (จุดเดือดของเมทานอล 64 °C อะซิโตน 56.5 °C) จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าน้ำ ซึ่งมีจุดเดือดที่สูงกว่า (100 °C ที่ความดันบรรยากาศ) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเมทานอลและอะซิโตนจึงสูงกว่าน้ำ

อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นกว่าของอะซิโตน และใกล้เคียงกับของเมทานอลที่อุณหภูมิประมาณ 80 °C ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของความร้อนแฝงของน้ำ (ประมาณ 2,360 kJ/kg ที่ 60 °C) ที่มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเมทานอล (ประมาณ 1,117 kJ/kg ที่ 60 °C) และอะซิโตน (ประมาณ 511 kJ/kg ที่ 60 °C) ซึ่งจะพบว่า ที่อุณหภูมิระหว่าง 60 °C - 80 °C ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอะซิโตนจะมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงานที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนระหว่าง 50°C-80 °C ในกรณีที่ใช้น้ำ เมทานอล และอะซิโตนเป็นสารทำงาน

4.1.1.2 ผลของค่าความต้านทานการพาความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Z₃)

ฟอน (Z₃)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดภายในท่อเทอร์โมไซฟอนจากการทดลอง สามารถดัดแปลงให้อยู่ในรูปของความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของการเดือด (Z₃) ได้ดังต่อไปนี้

$$Z_3 = \frac{1}{h_{ei} A_{ei}} \quad (4.1)$$

จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเดือดภายในท่อเทอร์โมไซฟอนที่แสดงไว้ในบทที่ 2 พบว่า ค่า Z₃ สามารถคำนวณได้ตามสมการของ ESDU ดังนี้

$$Z_3 = Z_{3p} \quad \text{if } Z_{3p} < Z_{3f} \quad (4.2)$$

$$Z_3 = Z_{3p} F + Z_{3f} (1 - F)$$

เมื่อ

$$Z_{3f} = \frac{C \dot{Q}^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} L_e \Phi_2^{4/3}}; C = 0.235 \quad (4.3)$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} \dot{Q}^{0.4} (\pi D_i L_e)^{0.6}} \quad (4.4)$$

$$\Phi_2 = \left(\frac{q_{latent} k^3 \rho_l^2}{\mu_l} \right)^{1/4} \quad (4.5)$$

$$\Phi_3 = 0.32 \frac{\rho_l^{0.65} k_l^{0.3} C p_l^{0.7}}{\rho_v^{0.25} q_{latent}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (4.6)$$

โดย

Z_3 = ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อน (K/W)

Z_{3p} = ค่าความต้านทานความร้อนของอ่างของเหลว (K/W)

Z_{3f} = ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์ม (K/W)

$\dot{Q}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อน (m)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

L_e = ความยาวของส่วนทำระเหย (m)

ρ_l = ความหนาแน่นสารทำงานเหลว (kg/m^3)

ρ_v = ความหนาแน่นไอสารทำงาน (kg/m^3)

q_{latent} = ค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอ (J/kg)

k = ค่าการนำความร้อน (W/m.K)

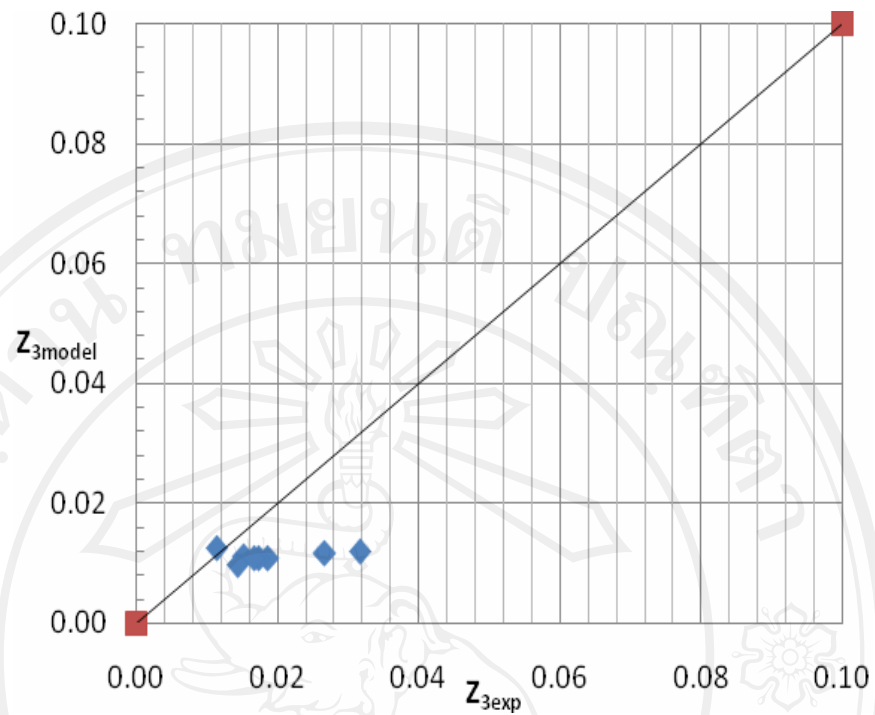
$C p_l$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)

μ_l = ค่าความหนืดของของเหลว (N.s/m^2)

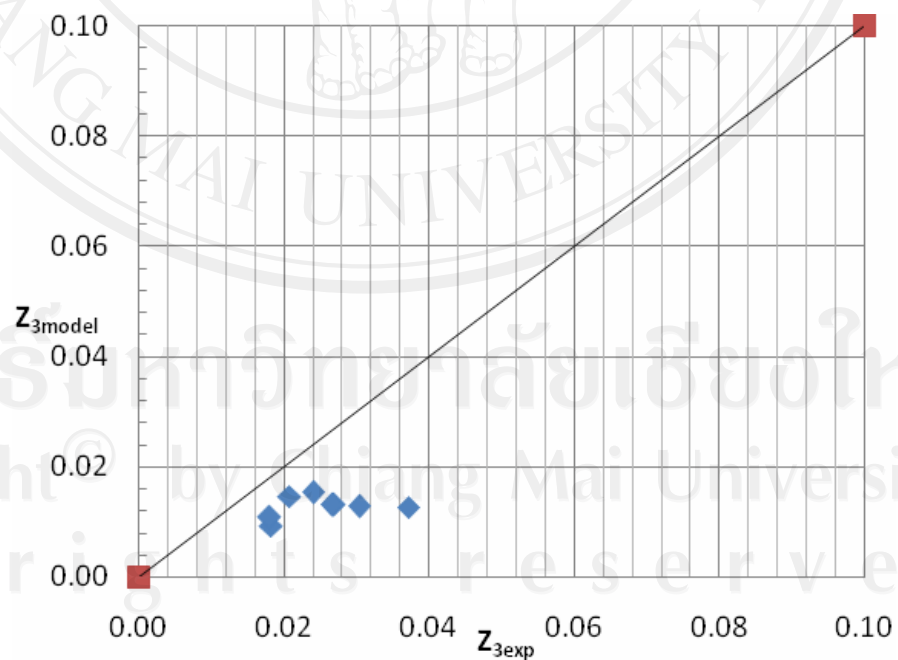
P_v = ความดันไอ (Pa)

P_a = ความดันบรรยากาศ (101.325 Pa)

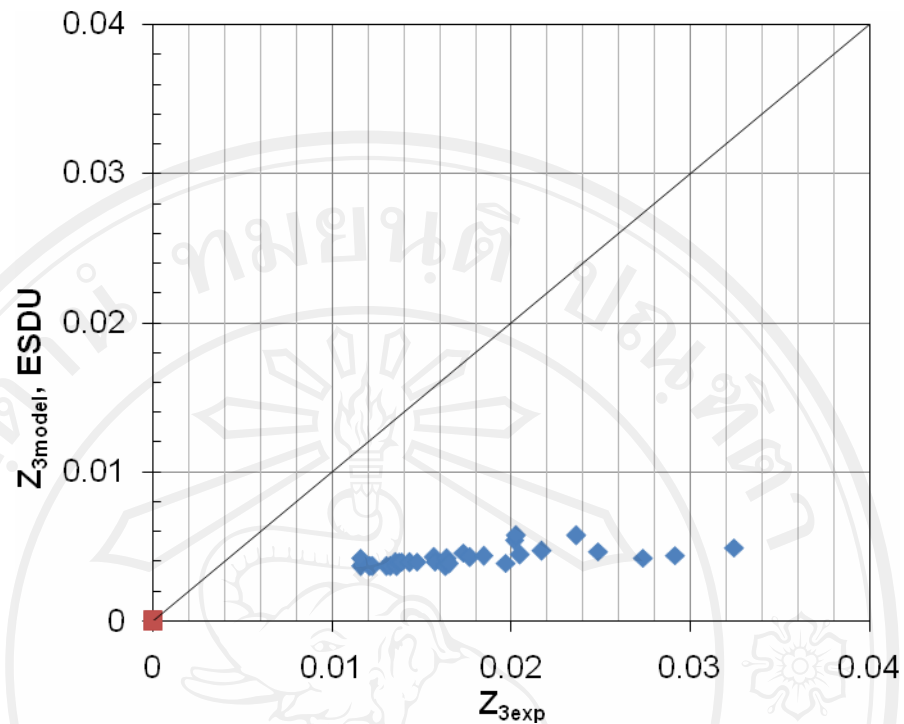
สำหรับสารทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ เมทานอล อะซิโตน และน้ำ ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลคำนวณค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของการเดือดตามวิธีการของ ESDU (Z_{3model}) ดังสมการที่ (4.2) กับผลการทดสอบจริง (Z_{3exp}) แสดงดังกราฟรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ตามลำดับ โดยได้แสดงเส้นทแยงกรณีค่าทั้งสองเท่ากันไว้เพื่อการวิจารณ์ด้วย



รูปที่ 4.2 ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานเมทานอล



รูปที่ 4.3 ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานอะซิโตน



รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานน้ำ กรณีไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก

รูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 ในกรณีของสารทำงานเมทานอล, อะซิโตน และน้ำ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าค่าจากการทดลองและแบบจำลองมีค่าแตกต่างกัน วิจัยนี้ได้ดังต่อไปนี้

- (1) กรณีที่ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของการเดือดต่ำ ($0.01 < Z_3 < 0.02$)

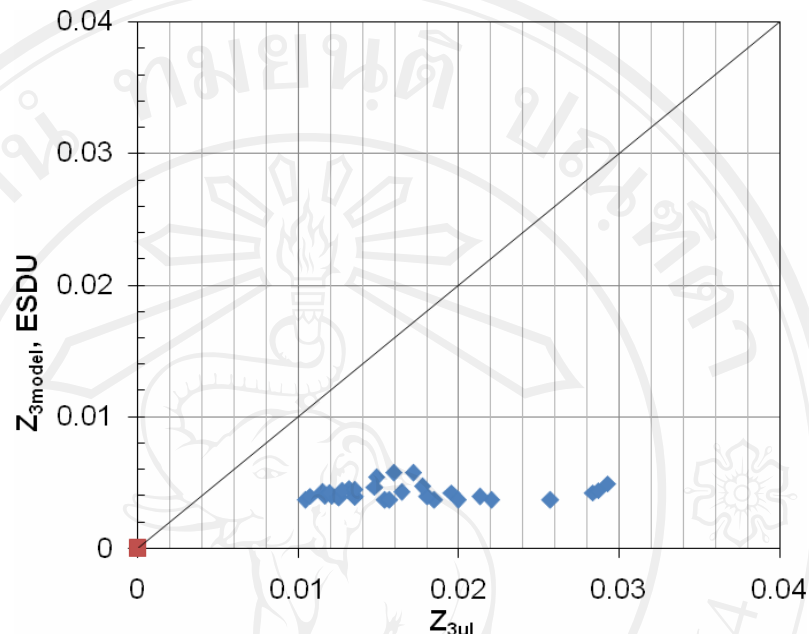
แบบจำลองสามารถทำนายผลการทดลองได้เป็นอย่างดีสำหรับสารทำงานทั้งสาม

- (2) กรณีที่ค่า Z_3 มากกว่า 0.02 แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณหาค่า Z_3 เนื่องจาก แบบจำลองของ ESDU ได้พัฒนามาจากผลการทดลองในช่วงที่มีการเดือดแบบแอ่งและแบบฟิล์ม (pool and film boiling) ที่อุณหภูมิประมาณ 80°C - 200°C ทำให้ใช้ทำนายผลได้ดีเมื่อสารทำงานเกิดการเดือดแบบแอ่งและฟิล์ม

4.1.2 กรณีที่มีระบบคลื่นอุลตราโซนิกประกอบ

กรณีที่ระบบติดตั้งเครื่องอุลตราโซนิก กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน ($Z_{3\text{model}}$) จาก ESDU กรณีสารทำงานน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.4 แล้วจะ

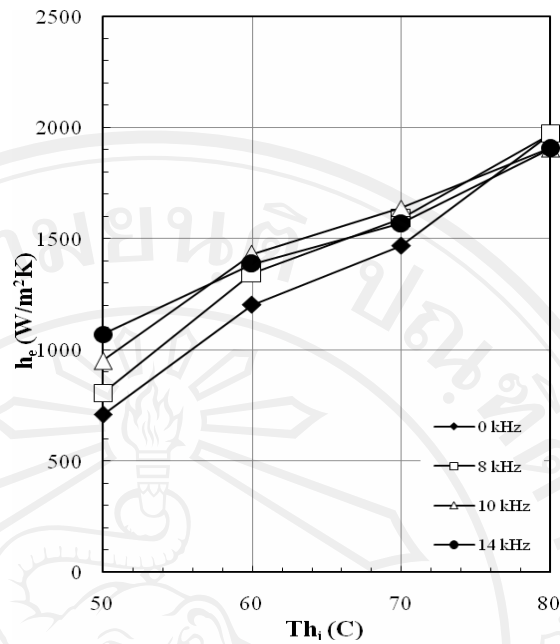
เห็นว่าค่า Z_{3model} ขยับเข้าใกล้เส้น 1:1 มากยิ่งขึ้น แสดงว่าอัลตราโซนิกมีส่วนช่วยทำให้ความต้านทานลดลง หรือทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนดีขึ้น



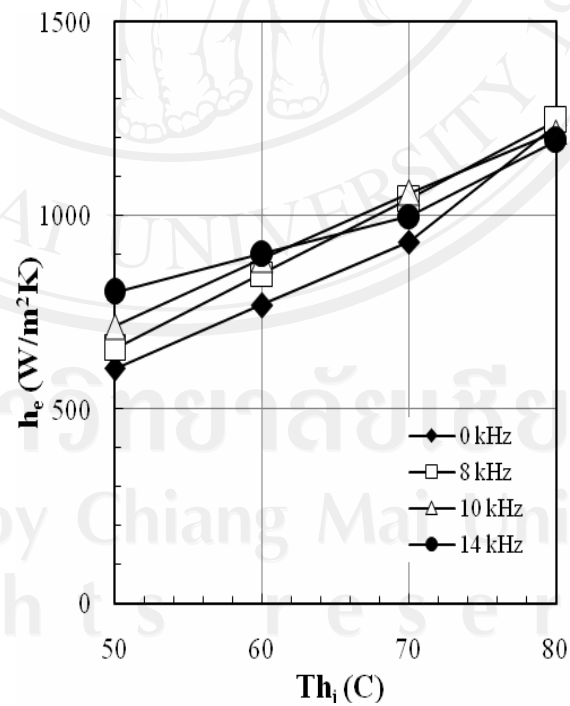
รูปที่ 4.5 ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานน้ำ กรณีมีคลื่นอัลตราโซนิก

4.1.2.1 ผลของความถี่คลื่นอัลตราโซนิกต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h_c)

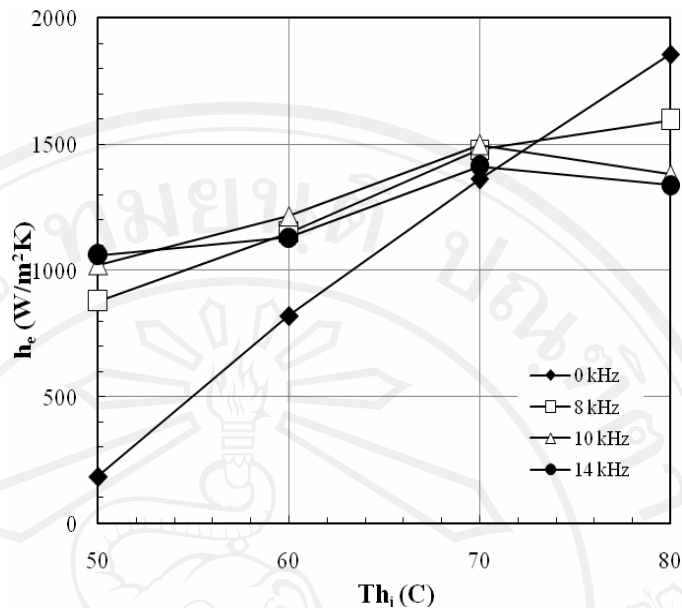
คลื่นอัลตราโซนิกมีอิทธิพลต่อการเดือดของสารทำงาน โดยผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือด (h_c) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งความร้อน (T_h) ระหว่าง $50\text{ }^{\circ}\text{C} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยความถี่เปลี่ยนแปลงระหว่าง 0 kHz ถึง 14 kHz แสดงในกราฟรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 คลื่นอัลตราโซนิกส่งผลให้เกิดการสั่นตัวในระนาบโมเลกุลของสารทำงาน ทำให้สารทำงานเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน ซึ่งนอกจากจะช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อกับสารทำงานสูงขึ้นแล้ว ยังมีส่วนช่วยให้สารทำงานมีการระเหยเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงาน กรณิใช้เมทานอลเป็นสารทำงาน และความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกมีค่า 0, 8, 10 และ 14 kHz ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงาน กรณีที่ใช้เอะซิโตนเป็นสารทำงาน และความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกมีค่า 0, 8, 10 และ 14 kHz ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงาน กรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน และความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกมีค่า 0, 8, 10 และ 14 kHz ตามลำดับ

ผลการทดสอบในรูปที่ 4.6 กรณีสารทำงานเมทานอล แสดงว่าที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อน 50°C คลื่นอัลตราโซนิกสามารถเพิ่มสมรรถนะของท่อเทอร์โมไซฟอนได้ประมาณ 50% และเมื่ออุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น พบว่าอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง และที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อน 80°C พบว่า สมรรถนะของท่อเทอร์โมไซฟอนมีค่าเท่ากันในทุกกรณี อธิบายได้ดังต่อไปนี้

- (1) กรณีที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนต่ำ (50 °C) การเดือดของเมทานอลจะเกิดได้ยากกว่าที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ดังนั้นในช่วงดังกล่าวนี้คลื่นอัลตราโซนิกจะช่วยให้เกิดความปั่นป่วนขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดมีค่ามากขึ้น และการเพิ่มความถี่ของคลื่นจะทำให้สมรรถนะของท่อความร้อนเพิ่มขึ้น
- (2) เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่า 50°C การเดือดของเมทานอลจะดีขึ้น หรือสารทำงานเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ดังนั้นอิทธิพลของคลื่นอัลตราโซนิกจึงลดลง และค่าสัมประสิทธิ์การเดือดของสารทำงานมีค่าคู่เข้าหากันที่อุณหภูมิ 80°C

กรณีที่ใช้อะซิโตนเป็นสารทำงาน ดังรูปที่ 4.7 ผลการทดลองมีลักษณะใกล้เคียงกับของเมทานอล คลื่นอัลตราโซนิกมีผลต่อสมรรถนะของระบบมาก ในช่วงอุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนต่ำ

และจะไม่ส่งผลในกรณีที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อน 80°C ซึ่งสารทำงานเกิดการเดือดได้ด้วยตนเอง

สำหรับรูปที่ 4.8 เมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงาน ผลการทดลองมีแนวโน้มคล้ายกับกรณีที่ใช้เมทานอลหรืออะซิโตนเป็นสารทำงานบ้าง กล่าวคือ

- (1) ที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อน 50°C คลื่นอุลตราโซนิกสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดได้สูงถึง 400% โดยประมาณ ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีของเมทานอลและอะซิโตน ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว น้ำไม่สามารถเดือดได้ด้วยตนเอง การใช้คลื่นอุลตราโซนิกกระตุ้นทำให้เกิดความปั่นป่วนและมีส่วนช่วยให้น้ำระเหยได้ดีขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดมากขึ้น
- (2) เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อน 70°C ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน
- (3) ที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อน 80°C พบว่า การใช้คลื่นอุลตราโซนิกกลับส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดลดลง ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเกิดการแห้ง (Dry out) ของพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน ทำให้พื้นผิวการถ่ายเทความร้อนสูญเสียไปส่วนหนึ่ง จากการสร้างแรงผลักดันสารทำงานออกจากพื้นผิวโดยคลื่นอุลตราโซนิก

อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ดังกล่าวกลับไม่เกิดกับกรณีที่ใช้เมทานอลหรืออะซิโตนเป็นสารทำงาน ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 80°C คลื่นก่อให้เกิดการเดือดแบบปั่นป่วนมากกว่า โอกาสการเกิด Dry out สูงมากกว่าแต่หากพิจารณาถึงสภาพการเปียกติดพื้นผิว (Wet ability) พบว่าเมทานอลกับอะซิโตนมีความสามารถในการเกาะติดพื้นผิวได้ดีกว่าน้ำ ซึ่งความแตกต่างของสภาพความสามารถในการเปียก (Wetability) หรือ การติดแน่น (Adhesion) ของอะซิโตนและเมทานอลที่มากกว่าน้ำ เนื่องจากแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้า (Interface) ระหว่างของเหลวหรือไอกับผิวของแข็ง ทำให้เกิดหยดของไหลลงค้างบนผิวของของแข็ง ความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างวัสดุ 2 ชนิดขึ้นกับกลไกระหว่างวัสดุทั้งสองทั้งในด้าน กลศาสตร์ (Mechanical adhesion) เคมี (Chemical adhesion) การแพร่กระจาย (Dispersion adhesion) อิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic adhesion) และการแพร่ (Diffusive adhesion) และพื้นที่ผิวหน้าของวัสดุทั้งสองสัมผัสกัน (Surface area) การที่วัสดุทั้งสองจะเกิดการเปียกซึ่งกันและกันจะทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากยิ่งขึ้นกว่ากรณีที่ไม่เปียกซึ่งกันและกัน โดยการเปียกนี้จะขึ้นกับพลังงานที่ผิวหน้า (Surface energy) ของวัสดุเป็นสำคัญ (<http://en.wikipedia.org/wiki/Adhesion>) จึงเป็นเหตุผลที่การใช้น้ำเป็นสารทำงานร่วมกับคลื่นอุลตราโซนิกเกิดปรากฏการณ์ Dry out ขึ้นง่ายกว่ากรณีของการใช้เมทานอลและอะซิโตน

4.1.2.2 ผลของความถี่คลื่นอุลตราโซนิกต่ออัตราส่วนพลังงาน

อัตราส่วนพลังงาน (Energy ratio) คือ อัตราส่วนพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการป้อนคลื่นอุลตราโซนิก (kWh_{th}) ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับหัวกำเนิดคลื่นอุลตราโซนิก (kWh_{elec}) ดังสมการที่ (4.7) เพราะการสร้างและป้อนคลื่นอุลตราโซนิกให้กับระบบนั้นต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า คำนีจึงใช้เปรียบเทียบสัดส่วนของพลังงานที่ป้อนให้กับระบบกับพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวอุลตราโซนิกที่ 8 kHz, 10 kHz และ 14 kHz มีค่าเท่ากับ 6.41 W, 27.94 W และ 65.85 W ตามลำดับ

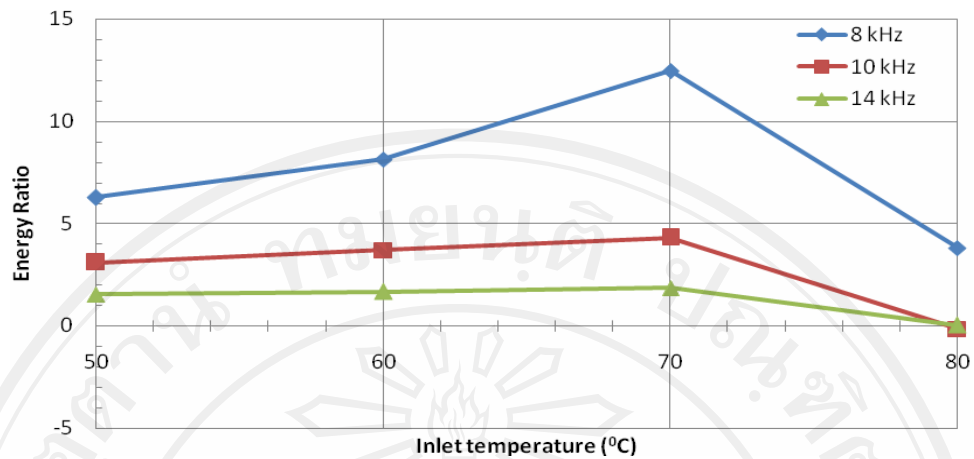
$$Energy\ ratio = \frac{\Delta Q}{P} = \frac{Q_{ul} - Q_{no,ul}}{P}; \frac{kWh_{th}}{kWh_{elec}} \quad (4.7)$$

โดย ΔQ = ผลต่างของพลังงานความร้อนเมื่อป้อนคลื่นกับไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก (kWh_{th})
 P = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างคลื่นอุลตราโซนิก (kWh_{elec})

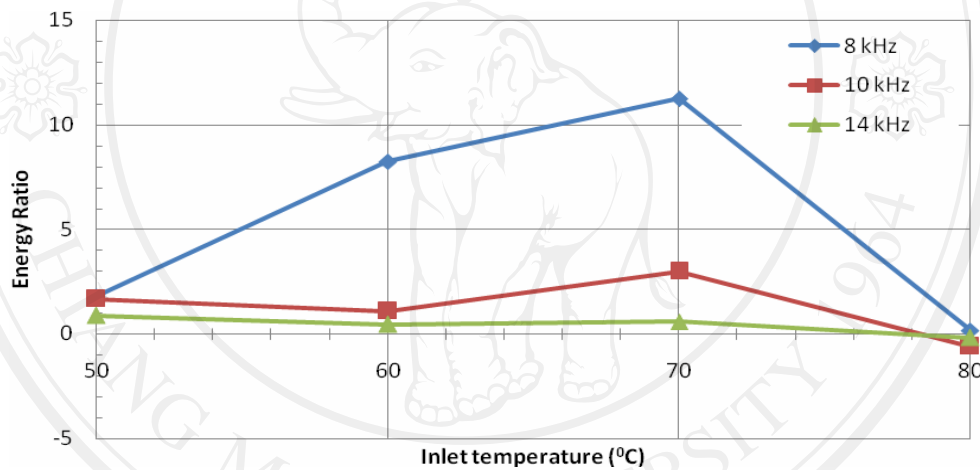
รูปที่ 4.9 แสดงค่าอัตราส่วนพลังงานกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน ของสารทำงานเมทานอลที่ความถี่อุลตราโซนิก 8, 10 และ 14 kHz พบว่าอัตราส่วนพลังงานมีค่าเฉลี่ย 7.67, 2.73 และ 1.27 ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนมากกว่า 70 °C ค่าอัตราส่วนของพลังงานเริ่มลดลง เพราะเมทานอลเริ่มเดือด คลื่นอุลตราโซนิกจึงไม่ทำให้สารทำงานเดือดเพิ่มขึ้น กรณีของอะซิโตนดังรูปที่ 4.10 ก็เช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นค่าอัตราส่วนพลังงานกลับน้อยลง

สำหรับกรณีสารทำงานน้ำ ดังรูปที่ 4.11 พบว่าที่ 50 °C มีค่าอัตราส่วนพลังงานที่ความถี่ 8, 10 และ 14 kHz เท่ากับ 25.58, 6.45 และ 2.67 ตามลำดับ และจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อถึงระดับหนึ่งคลื่นอุลตราโซนิกกลับทำให้ค่าการถ่ายเทพลังงานความร้อนลดลง ค่าอัตราส่วนพลังงานจึงมีค่าต่ำกว่าศูนย์ เนื่องจากคลื่นอุลตราโซนิกก่อให้เกิดภาวะวิกฤติเนื่องจากการแห้ง (Dry out) ภายในท่อความร้อน ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่มีคลื่นน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีคลื่น

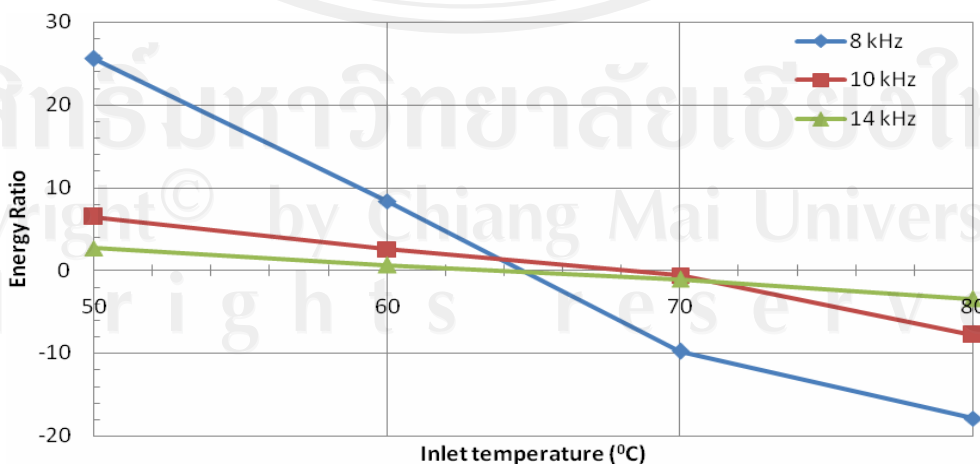
เมื่อพิจารณาอัตราส่วนพลังงานความร้อนถ่ายเทที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการป้อนคลื่นอุลตราโซนิกต่อ ช่วงการทำงานที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า คลื่นความถี่ที่เหมาะสมที่สุดต่อการเลือกใช้คือ 8 kHz แม้ว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะน้อยกว่าที่ 10 kHz และ 14 kHz ดังนั้นในการทดสอบและวิเคราะห์ในส่วนถัดไป จะพิจารณาความถี่คลื่นอุลตราโซนิกที่ 8 kHz เท่านั้น



รูปที่ 4.9 ค่าอัตราส่วนพลังงานกรณีสารทำงานเมทานอล และคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 8, 10, 14 kHz



รูปที่ 4.10 ค่าอัตราส่วนพลังงานกรณีสารทำงานอะซิโตน และคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 8, 10, 14 kHz



รูปที่ 4.11 ค่าอัตราส่วนพลังงานกรณีสารทำงานน้ำ และคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 8, 10, 14 kHz

4.2 ผลของอัตราส่วนการเติมสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

อัตราส่วนการเติมสารทำงานมีผลต่อสมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ทั้งในกรณีมีและไม่มีกลิ่นอุลตราโซนิก แสดงเฉพาะสารทำงานน้ำ โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเติม คิดเป็นร้อยละของปริมาตรส่วนทำระเหย 2 ค่า คือ 50% กับ 100% ผลทดสอบดังรูปที่ 4.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับอุณหภูมิแหล่งความร้อน อัตราการเติมสารทำงานที่ 50% และ 100% พบว่า

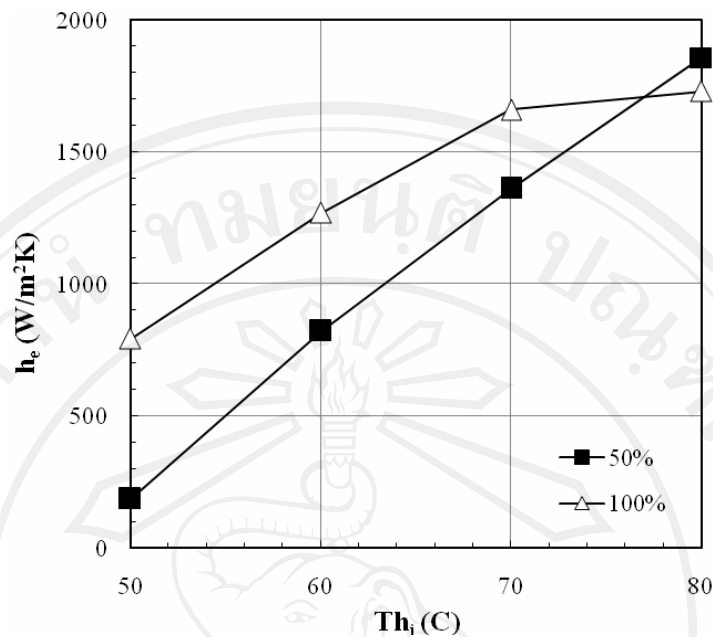
- (1) เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นตามเช่นกัน
- (2) การเติมสารทำงาน 100% ของส่วนทำระเหยจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า กรณีการเติมสารทำงาน 50% ของส่วนทำระเหย โดยมากกว่าอยู่ประมาณ 20% - 320% ในช่วงอุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนระหว่าง 50 – 76 °C
- (3) ที่อุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนสูงกว่า 76 °C พบว่าการเติมสารทำงานที่ 50% โดยปริมาตรของส่วนทำระเหย จะมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า

ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้คือ การถ่ายเทความร้อนของการเดือดแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

- (1) การเดือดแบบแอ่งในส่วนที่สารทำงานท่วมถึง และ
- (2) การเดือดแบบฟิล์มในส่วนของคอนเดนเสทที่ไหลย้อนกลับมาจากส่วนควบแน่นเข้าสู่ส่วนทำระเหย

ในกรณีที่อุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนต่ำ (ในกรณีนี้คือ 50 – 76 °C) คอนเดนเสทมีสภาพเป็นหยดๆ ยังไม่เป็นฟิล์ม ทำให้ปริมาณของคอนเดนเสทที่ไหลย้อนกลับมาน้อย ส่งผลให้การเดือดแบบฟิล์มเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นการเติมสารทำงานเพียง 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย จะส่งผลให้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของส่วนระเหยไม่ได้ใช้ประโยชน์ประมาณ 50% ดังนั้นในกรณีนี้การเติมสารทำงานที่ 100% จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนดีกว่า

ในทางกลับกัน กรณีที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนสูงกว่า 76 °C การเดือดของน้ำดีขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคอนเดนเสทที่ไหลย้อนกลับมาเพิ่มมากขึ้น ทำให้การเดือดแบบฟิล์มเกิดขึ้นบนพื้นผิวของส่วนทำระเหยที่อยู่เหนือระดับน้ำในท่อ โดยแท้จริงแล้วการเดือดแบบฟิล์มจะมีสมรรถนะการส่งถ่ายความร้อนที่สูงกว่าการเดือดแบบแอ่ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าช่วงอุณหภูมิการทำงานดังกล่าวนี้ สมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่เติมน้ำ 50% ซึ่งมีผลของการเดือดแบบฟิล์มมากกว่า ค่าจึงสูงกว่ากรณี 100% ซึ่งเป็นการเดือดแบบแอ่ง



รูปที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนกรณีใช้น้ำเป็นสารทำงาน ร้อยละการเติมสารทำงานในส่วนทำระเหย 50% และ 100%

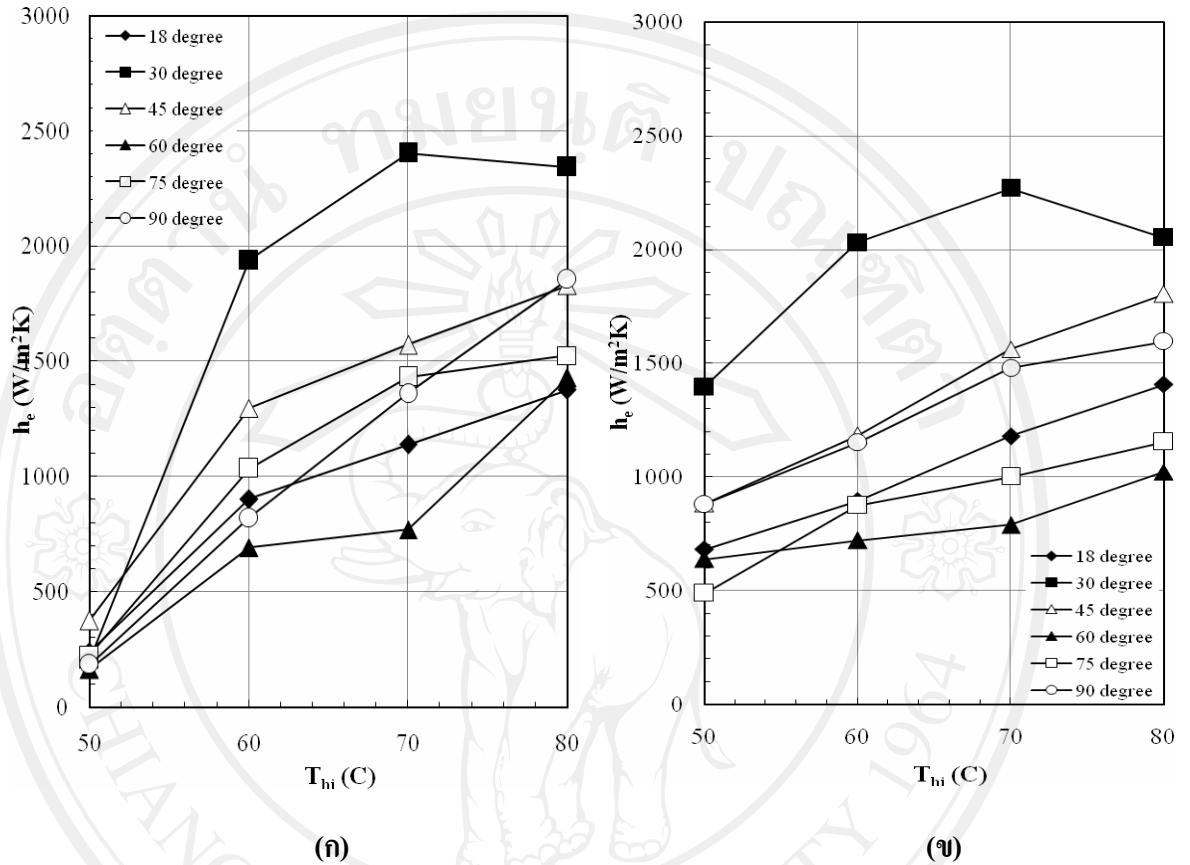
4.3 การวิเคราะห์หุ้มที่ทำต่อแนวระนาบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

งานในส่วนนี้จะศึกษาผลของหุ้มที่ทำต่อแนวระนาบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ที่มีต่อสมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนทั้งในกรณีมีและไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก สารทำงานที่ใช้คือ น้ำ และคลื่นอุลตราโซนิกที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีความถี่ 8 kHz

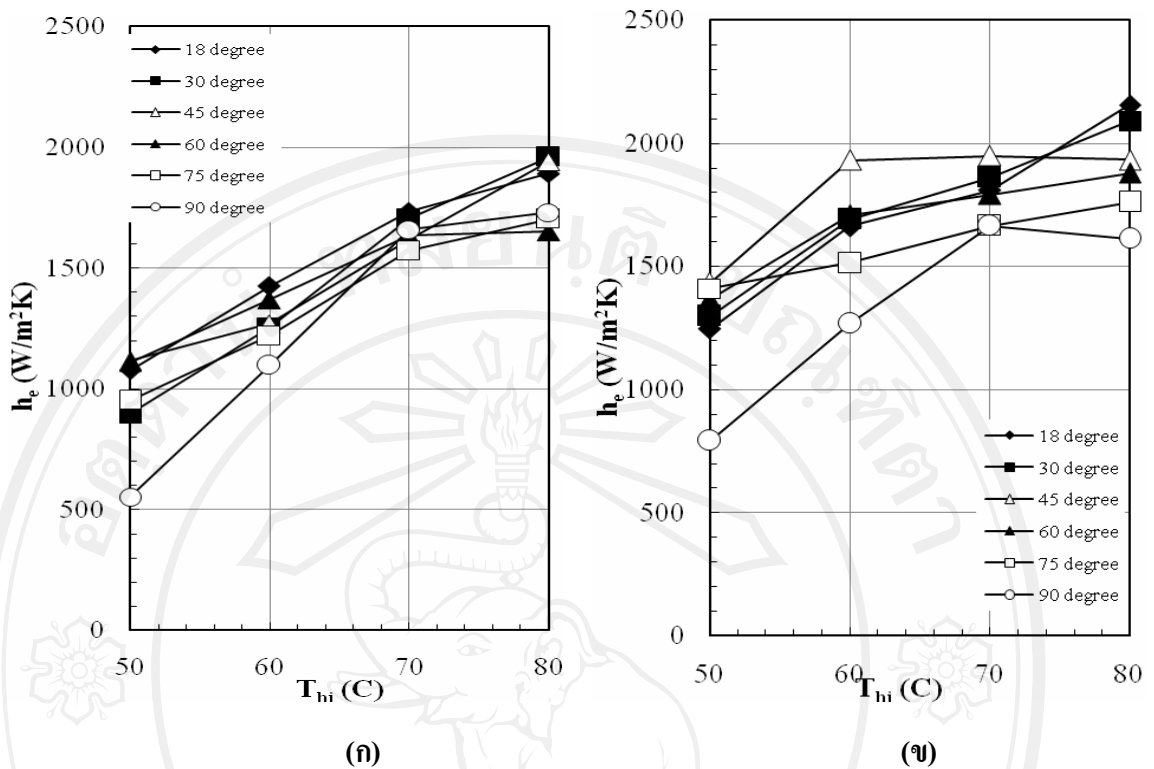
ผลของหุ้มเอียงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ที่หุ้ม 18, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา กับแนวระนาบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิแหล่งความร้อน โดยใช้น้ำ เป็นสารทำงาน แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกันในทุกๆกรณี ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 โดยที่หุ้ม 30 องศาจากแนวระนาบจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดถึง 2,404.2 W/m²K แล้วลดหลั่นลงไป ผลของการเติมสารทำงานที่ 50% และ 100% เป็นเช่นเดียวกับผลในหัวข้อ 4.2 ซึ่งได้บรรยายไปในเบื้องต้นแล้ว

อนึ่ง ผลของหุ้มเอียงที่มีต่อสมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนั้น พบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lock (1992) ซึ่งพบว่าที่หุ้มเอียงท่อประมาณ 30-60 องศา สมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจะสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของการไหลสวนทางกัน

ระหว่างคอนเดนเสทและไอ รวมถึงวิทยานิพนธ์ของ สุระ ดันดี (2548) พบว่า มุมเอียง 40–60 องศา ของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดเป็นมุมที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนระหว่าง 50 °C -80 °C ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ที่ปริมาตรการเติมสารทำงานส่วนทำระเหย 50% ของมุมเอียง 18, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ตามลำดับ (ก) ไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก (ข) มีคลื่นอุลตราโซนิก



รูปที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนระหว่าง 50 °C -80 °C ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ที่ปริมาตรการเดิมสารทำงานส่วนทำระเหย 100% ของมุมเอียง 18, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ตามลำดับ (ก) ไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก (ข) มีคลื่นอุลตราโซนิก

4.4 แบบจำลองจากการทดลองค่าความต้านทานความร้อนกรณีมีคลื่นอุลตราโซนิกประกอบ

งานในส่วนนี้คือการพัฒนาแบบจำลองจากการทดลองเพื่อใช้ทำนายค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน ที่เพิ่มสมรรถนะด้วยคลื่นอุลตราโซนิก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ในกรณีที่ใช้เมทานอล หรืออะซีโตนเป็นสารทำงาน จะพัฒนาแบบจำลองจากการทดลองจากสมการของ ESDU ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก ดังต่อไปนี้

$$Z_{3,ul} = C_0 \left(\frac{f}{f_{max}} \right)^{C_1} (Z_{3,noul})^{C_2} \quad (4.8)$$

โดย $Z_{3,ul}$, $Z_{3,noul}$ = ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนในกรณีที่ไม่มีและไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก (K /W)

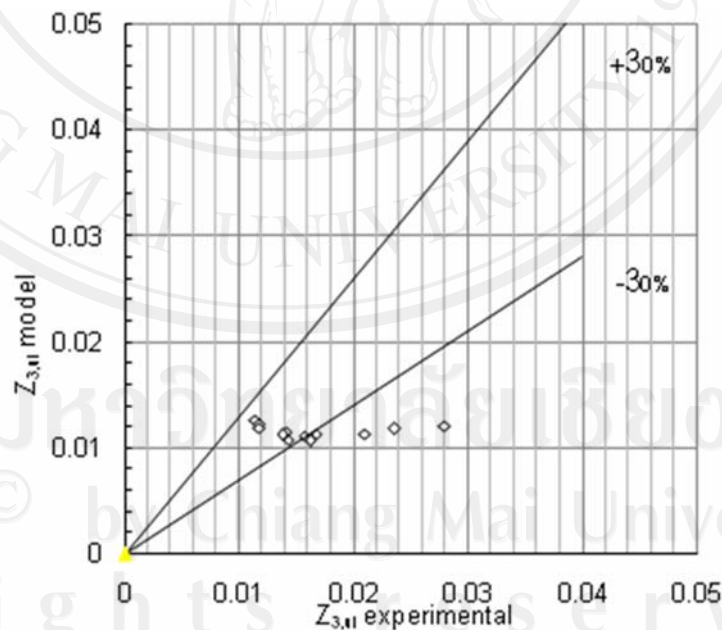
$$\frac{f}{f_{\max}} = \text{อัตราส่วนความถี่ต่อความถี่สูงสุดของคลื่นอุลตราโซนิกที่ใช้}$$

จากสมการข้างต้น ค่าความต้านทานความร้อนกรณีมีคลื่นอุลตราโซนิกเป็นฟังก์ชันของผลคูณระหว่างค่าคงที่กับองค์ประกอบ (Factor) ของความถี่ที่ป้อนต่อความถี่สูงสุด $\left(\frac{f}{f_{\max}}\right)$ และค่าความต้านทานความร้อนกรณีไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก ($Z_{2,noul}$) จากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยหลายมิติ ทำให้สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์ได้ดังต่อไปนี้

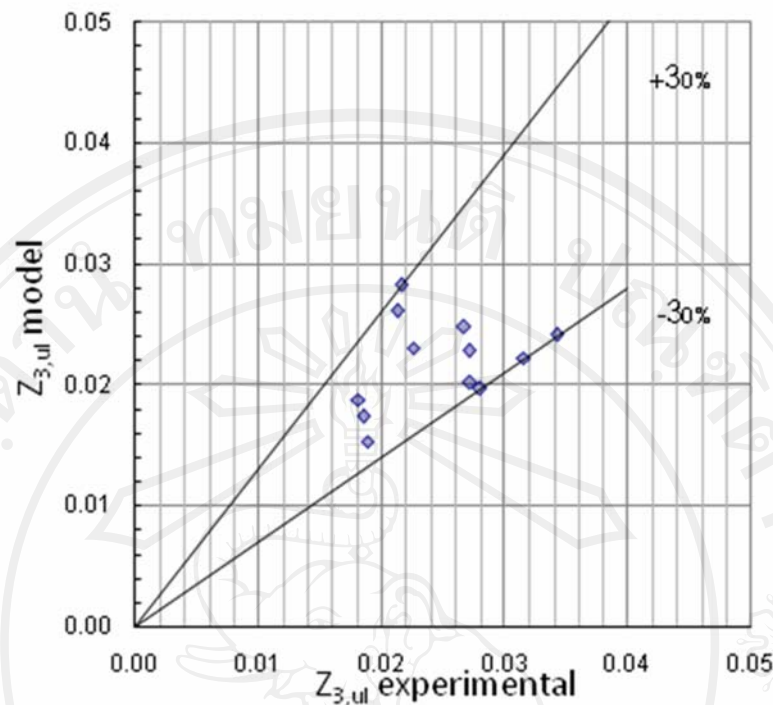
$$\text{เมทานอล} \quad Z_{3,ul} = 0.26999 \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^{-0.11323} (Z_{3,noul})^{0.71271} \quad (4.9)$$

$$\text{อะซีโตน} \quad Z_{3,ul} = 0.69934 \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^{-0.36552} (Z_{3,noul})^{0.81684} \quad (4.10)$$

สมการที่พัฒนาขึ้น สามารถทำนายผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, SD) เท่ากับ 0.06503 และ 0.03513 ในกรณีของเมทานอลและอะซีโตนตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในส่วนการทำระเหยของการทดลอง กับค่าคำนวณตามแบบจำลองจากการทดลอง โดยใช้เมทานอลเป็นสารทำงาน



รูปที่ 4.16 ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในส่วนการทำระเหยของการทดลอง กับค่าคำนวณตามแบบจำลองจากการทดลอง โดยใช้อะซิโตนเป็นสารทำงาน

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าทั้งสองรูปมีแนวโน้มที่ไม่ไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากค่าคุณสมบัติของสารสองชนิดนี้อยู่ในช่วงแตกต่างกัน ได้แก่ ความหนาแน่น (เมทานอล 0.435 kg/m^3 , อะซิโตน 1.15 kg/m^3) ความหนืดสัมบูรณ์ (เมทานอล 0.000442 N.s/m^2 , อะซิโตน 0.000267 N.s/m^2) ค่าการนำความร้อน (เมทานอล 0.195 W/m.K , อะซิโตน 0.154 W/m.K) ค่าความร้อนจำเพาะ (เมทานอล 2603 J/kg.K , อะซิโตน 2211 J/kg.K) โดยเฉพาะค่าความร้อนของการเปลี่ยนสถานะ (Latent heat) อะซิโตน 523 kJ/kg ในขณะที่เมทานอล $1,153\text{ kJ/kg}$ เมื่อนำมาคำนวณค่าความต้านทาน Z_{3r} และ Z_{3p} ดังสมการที่ (3.8) ถึง (3.11) จึงให้แนวโน้มของค่าแตกต่างกัน

ในกรณีของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานนั้น พบว่าสมการของ ESDU มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองของการเดือดของน้ำขึ้นมาใหม่ โดยใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลายมิติ (Multiple Regression Technique) โดยสมการที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นกรณีที่ไม่มีการลื่นไหลของไอ และได้รวบรวมผลของมุมเอียง และอัตราส่วนการเติมสารทำงานเข้าไว้ด้วยกัน ดังต่อไปนี้

$$Z_{3,noul,model} = 90.0069 \cdot (F)^{3.2199} \cdot (\beta)^{-9.9786} \cdot (Z_{3,noul,ESDU})^Y \quad (4.11)$$

$$Y = 3.9412 + 1.565F - 5.4024F^2 + 0.09707F\beta + 1.756\beta^2 \quad (4.12)$$

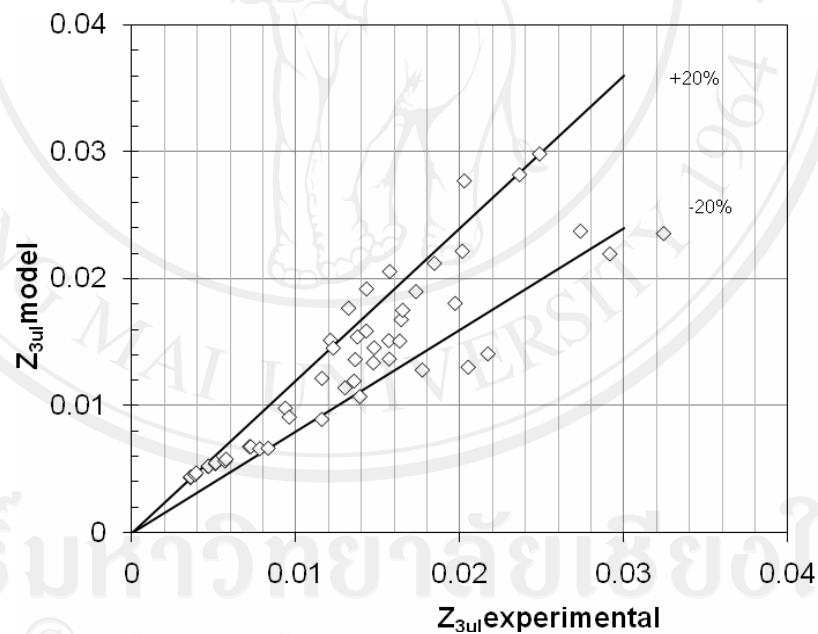
โดย $Z_{3,noul,model}$ = ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อน ของแบบจำลอง กรณีไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก (K/W)

F = ค่าอัตราส่วนของปริมาตรสารทำงานส่วนทำระเหย

β = มุมที่ท่อความร้อนทำกับแนวระนาบ

$Z_{3,noul,ESDU}$ = ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของแบบจำลอง ESDU กรณีไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก (K/W)

สมการที่พัฒนาขึ้น มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.2519 และการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองกับค่าปรับปรุงการคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานน้ำ

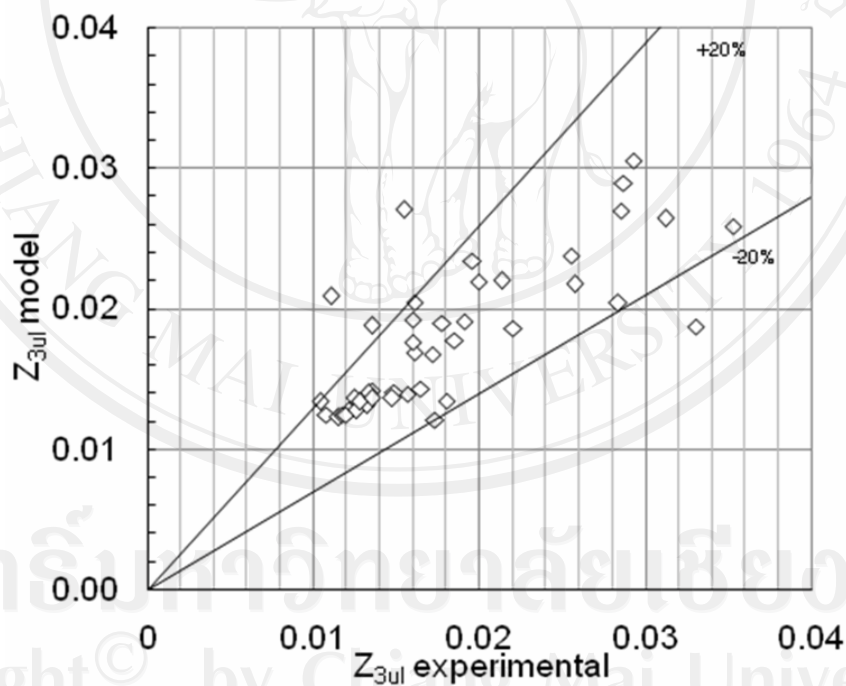
กรณีที่มีคลื่นอุลตราโซนิก แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นฟังก์ชันของค่าการเติมสารทำงานของส่วนทำระเหย มุมเอียงที่ทำต่อแนวระนาบ ความถี่ที่ป้อนต่อความถี่สูงสุด ค่าความต้านทานความร้อนกรณีไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก ดังต่อไปนี้

$$Z_{3,ul} = 0.99306 \cdot (F)^{2.7262} \cdot (\beta)^M \cdot (Z_{3,noul})^N \cdot \left(\frac{f}{f_{\max}} \right)^{-1.6056} \quad (4.13)$$

$$M = -0.22133F + 1.1821 \frac{f}{f_{\max}} - 0.64467 \quad (4.14)$$

$$N = 2.052F - 0.03906\beta - 1.6056 \frac{f}{f_{\max}} + 0.005136 \quad (4.15)$$

สมการที่พัฒนาขึ้น มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.19348 และการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในส่วนการทำระเหยของการทดลอง กับค่าคำนวณตามแบบจำลองจากการทดลอง โดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน