

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถแยกพิจารณาเป็นหัวข้อต่างๆ ตามลำดับคือ คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน รูปแบบการไหล ปรากฏการณ์การไหลภายในท่อ และแผนภูมิรูปแบบการไหล ดังนี้

4.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน

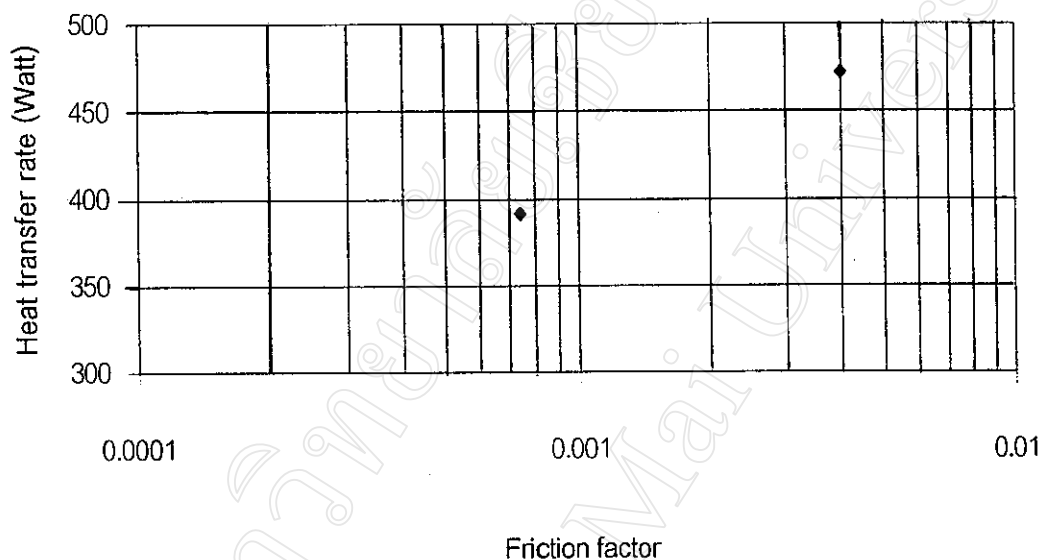
ในการทดสอบมีการกำหนดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไว้ 3 ค่า คือ 0.00074, 0.004 และ 0.001 แต่เนื่องจากการสร้างท่อแก้วให้พื้นผิวภายในท่อมีความขรุขระนั้นทำได้ยากมากอีกทั้งเป็นการศึกษาเชิงคุณภาพจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องหาผลการทดลองในช่วงกว้างจึงทำการศึกษาผลกระทบของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพียง 2 ค่าเท่านั้น คือ 0.00074 และ 0.004 ซึ่งในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก โดยทำการศึกษาผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน และมุมเอียง ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนี้

4.1.1 ผลกระทบของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จากการทดลองคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CEOHP ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.00074 และ 0.004 ณ อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 60°C - 80°C อุณหภูมิแหล่งคายความร้อน 20°C มุมเอียง $0 - 90$ องศา พบว่า ในทุกอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน และทุกมุมเอียง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเหมือนกัน ดังแสดงในภาคผนวก ค1 - ค6 ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะผลการทดลองที่เห็นผลกระทบของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างชัดเจนมาแสดงดังรูป 4.1 ซึ่งพบว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.00074 เป็น 0.004 อัตราการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 392 วัตต์ เป็น 472 วัตต์ สาเหตุที่อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจาก เมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น พื้นผิวภายในท่อก็จะมีความขรุขระมากขึ้น ฟองไอจึงเคลื่อนที่ได้ช้าลง ทำให้การรวมตัวของฟองไอเกิดขึ้นได้ยาก ฟองไอยิ่งมีขนาดเล็กและความถี่ของการตันอุณหภูมิจึงมีค่าสูง ฟองไอยิ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น เนื่องจากงาน

วิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่ จึงไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้อื่นได้ แต่จะเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

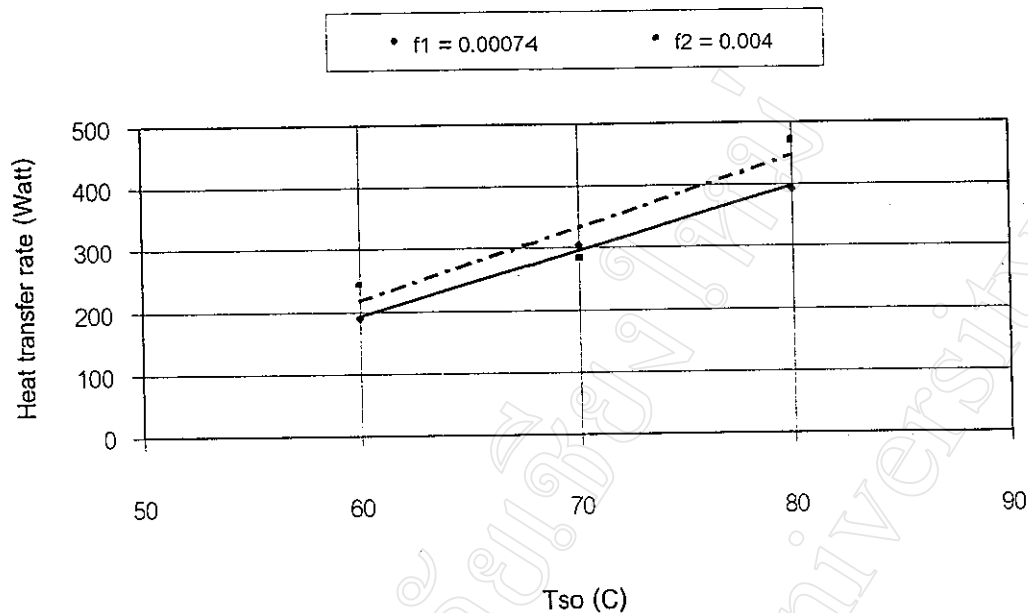
สรุปได้ว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับทุกๆ อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนและมุมเอียง โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้นที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.004 สำหรับอุณหภูมิแหล่งความร้อน 80°C และ มุมเอียง 70 องศา มีค่าเท่ากับ 472 วัตต์



รูป 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP ที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 80°C มุมเอียง 70 องศา (ID 2 mm, Le 50 mm, Lt 15 m, 28 โค้งเกลียว)

4.1.2 ผลกระทบของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน

ผลการทดลองทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก ค1 – ค6 ซึ่งพบว่าในทุกลมุมเอียงและทุกค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนจะมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะผลการทดลองที่เห็นผลกระทบของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนอย่างชัดเจนมาแสดงดังรูป 4.2 ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 60°C เป็น 80°C อัตราการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP สำหรับแต่ละค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นั่นคือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 189 วัตต์ เป็น 392 วัตต์ และ จาก 242 วัตต์ เป็น 472 วัตต์ สำหรับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.00074 และ 0.004 ตามลำดับ สาเหตุที่อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจาก เมื่ออุณหภูมิแหล่งให้



รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP ที่มุมเอียง 70 องศา (ID 2 mm, Le 50 mm, Lt 15 m, 28 โค้งเกลียว)

ความร้อนมีค่ามากขึ้น ฟองไอเกิดขึ้นได้ง่ายและเร็ว ความดันจึงเพิ่มขึ้น ฟองไอสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนทำระเหยได้เร็วและบ่อยครั้ง ทำให้ CEOHP สามารถถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่ จึงไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้อื่นได้ แต่จะเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

สรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับทุกๆ มุมเอียงและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 80°C และมุมเอียง 70 องศา สำหรับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.00074 และ 0.004 มีค่าเท่ากับ 392 วัตต์ และ 472 วัตต์ ตามลำดับ

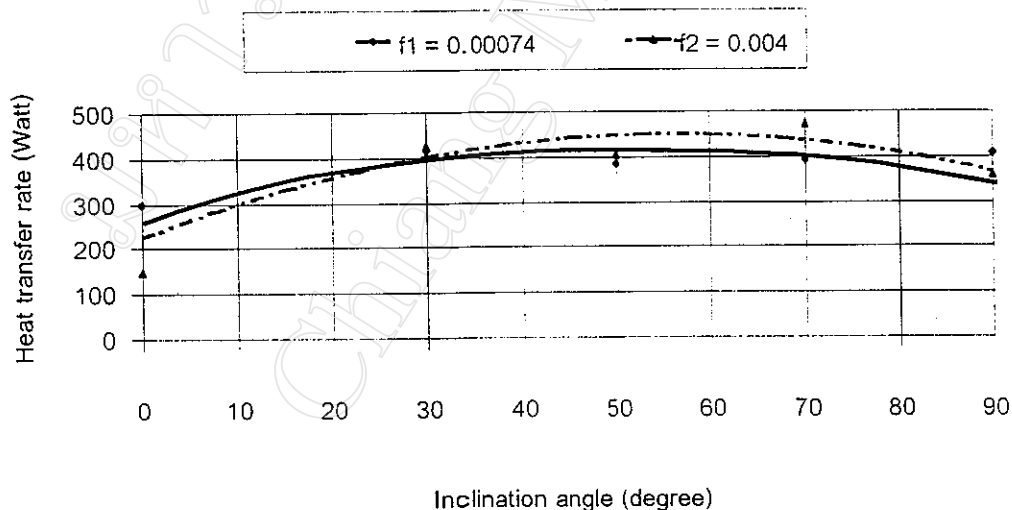
4.1.3 ผลกระทบของมุมเอียง

ผลการทดลองทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก ค1 - ค6 ซึ่งพบว่าในทุกอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน และทุกค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน มีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP เหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะผลการทดลองที่เห็นผลกระทบของมุมเอียงอย่างชัดเจนมาแสดงดังรูป 4.3 ซึ่งพบว่าเมื่อมุมเอียงมีค่ามากขึ้นจาก 0 ถึง 50 องศา อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ด้วย หลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง เมื่อมุมเอียงมีค่ามากกว่า 50 องศา โดยจะเหมือนกันทั้งสองสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน นั่นคือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของ CEOHP จะเกิดขึ้นที่มุมเอียง 50 องศา สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 80°C จะมีค่าเท่ากับ 416 วัตต์ และ 472 วัตต์ ที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็น 0.00074 และ 0.004 ตามลำดับ สาเหตุที่อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงสุดที่มุมเอียงช่วง 50-70 องศา อาจเนื่องมาจาก ที่มุมเอียงนี้ ฟองไอน้ำขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยและความถี่ของการสั่นมาก ทำให้ฟองไอน้ำมีโอกาสถ่ายเทความร้อนด้วยการเปลี่ยนสถานะได้มากขึ้น

จากงานวิจัยของ Gi et al. (1999) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของมุมเอียงที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP ในช่วง 30- 90 องศาจากแนวระดับ พบว่าที่มุมเอียงน้อยๆ อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ที่อัตราการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP มีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 50 องศา เช่นเดียวกัน

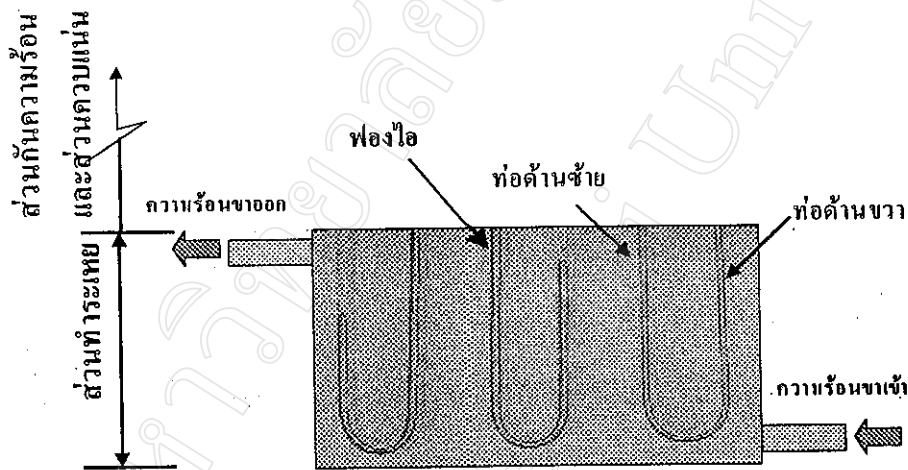
สรุปได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของ CEOHP เกิดขึ้นที่มุมเอียงในช่วง 30-70 องศา สำหรับทุกๆ อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 80°C สำหรับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.00074 และ 0.004 มีค่าเท่ากับ 416 วัตต์ และ 472 วัตต์ ตามลำดับ



รูป 4.3 ผลกระทบของมุมเอียงที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ CEOHP ที่ $T_{so} 80^{\circ}\text{C}$ (ID 2 mm, Le 50 mm, Li 15 m, 28 โค้งเกลียว)

4.2 รูปแบบการไหล

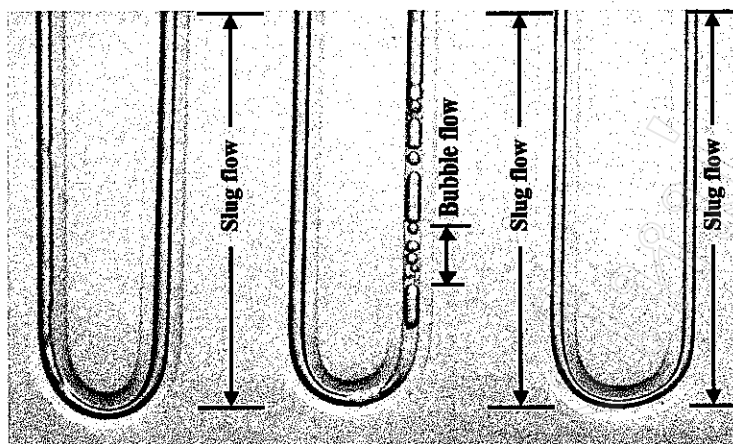
ในการสังเกตรูปแบบการไหลของ CEOHP จะเลือกสังเกตที่ส่วนทำระเหย เพราะ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดที่ส่วนทำระเหยโดยที่มีทิศทางการไหลเข้า-ออกของน้ำมันซิลิโคนผ่านส่วนทำระเหยแสดงในรูป 4.4 ซึ่งในการอธิบายผลจะอ้างอิงจากระบบในรูป 4.4 ทั้งหมด ความยาวของฟองไอละวัดจากระยะห่างของปลายทั้งสองข้างของฟองที่เวลาใดๆ และการวัดการขยายตัวและยุบตัวของฟองไอละวัดเทียบกับความยาวเดิมที่เวลาเปลี่ยนแปลงไปโดยคิดเป็น เปอร์เซ็นต์ เช่น ที่เวลา 0.5 วินาที ฟองไอละยาว 10 มิลลิเมตร เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 1 วินาที ฟองไอละยาว 50 มิลลิเมตร ดังนั้น ฟองไอละขยายตัว 40 มิลลิเมตร คิดเป็น 80 % ของความยาวเดิม



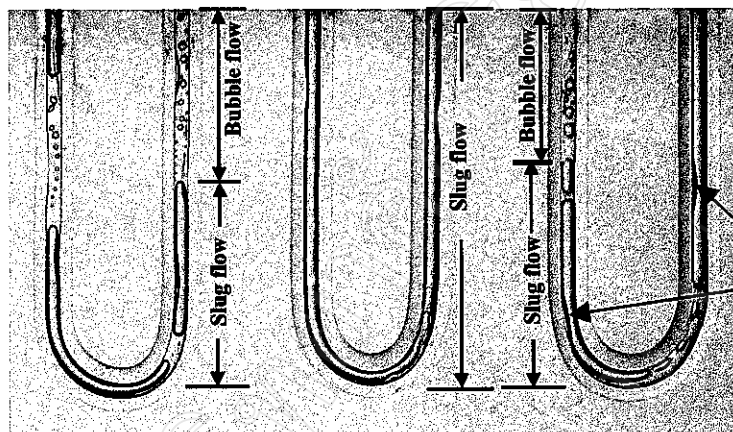
รูป 4.4 ตัวอย่างแสดงทิศทางการไหลเข้า-ออกของน้ำมันซิลิโคนผ่านส่วนทำระเหย

4.2.1 ผลกระทบของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาผลของความเสียดทานของผนังภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผิวด้านในของท่อ ดังนั้นชุดทดสอบทั้ง 2 ชุดจะทดสอบที่เงื่อนไขเดียวกัน จากผลการทดลองสังเกตรูปแบบการไหลที่ส่วนทำระเหยโดยแปรค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานพบว่า ในทุกอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนและทุกมุมเอียง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีผลกระทบต่อรูปแบบการไหลของ CEOHP เหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะรูปเห็นผลกระทบของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอย่างชัดเจนมาแสดงดังรูป 4.5 ซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่า 0.00074 รูปแบบการไหลส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Slug flow และมีการไหลแบบ Bubble flow เกิดขึ้นปะปนเพียงเล็กน้อย โดยที่ความยาวฟองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-130 mm. สัดส่วน



ก. $f = 0.00074$



ข. $f = 0.004$

ผิวขรุขระภายใน
ทำขึ้นเพื่อเพิ่ม f

รูป	สัมประสิทธิ์ ความเสียดทาน	Q (W)	ความยาวฟองไอล (mm)	Flow pattern
ก	0.00074	391.9	5 - 130	Slug flow
ข	0.004	471.9	30 - 40	Slug flow

รูป 4.5 รูปแบบการไหลของ CEOHP ที่ $T_{so} 80^{\circ}\text{C}$ มุมเอียง 70° Lt 11.5 m ,Le 50mm

Di 2 mm , N 28 turn

ช่องว่างเฉลี่ยประมาณ 0.8 และมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 392 วัตต์ เมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.004 พบว่าฟองไอลจะเกิดการแตกตัวได้ง่าย ดังนั้นรูปแบบการไหลจึงเป็นแบบ Slug flow ที่มีความยาวฟองไอลเฉลี่ยลดลงประมาณ 30-40 mm หรือคิดเป็น 30% ของความยาวเดิม และการไหลแบบ Bubble flow จะเกิดเพิ่มขึ้น สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเป็น 0.45 อัตรา

การถ่ายเทความร้อนเป็น 472 วัตต์ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากเมื่อความเสียดทานที่ผิวภายในท่อเพิ่มขึ้น ผิวภายในท่อจะขรุขระ ทำให้การรวมตัวของฟองไอน้ำที่ส่วนทำระเหยเกิดขึ้นได้ยาก ฟองไอน้ำจึงมีขนาดเล็ก และสามารถเคลื่อนที่ไปถ่ายเทความร้อน โดยการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นได้มากขึ้น เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่ จึงไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้อื่นได้ แต่จะเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

สรุปได้ว่าเมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลยังคงเป็นแบบ Slug flow แต่ความยาวฟองไอน้ำเฉลี่ยมีค่าลดลง โดยที่ความยาวฟองไอน้ำเฉลี่ยที่ส่วนทำระเหยของ CEOHP ที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 80°C และมุมเอียง 70 องศา จะมีค่าลดลง 30% ของความยาวเดิม และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยจะมีค่าลดลง 44%

4.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน

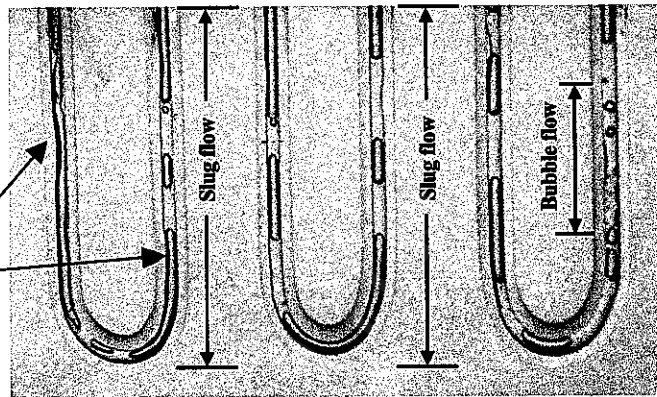
ในการทดสอบที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนจาก 60°C ถึง 80°C พบว่าในทุกๆ มุมเอียงและทุกค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนมีผลต่อรูปแบบการไหลเหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะรูปเห็นผลกระทบของอุณหภูมิแหล่งความร้อนอย่างชัดเจนมาแสดงดังรูป 4.6 ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 60°C ถึง 80°C รูปแบบการไหลยังคงเป็นแบบ Slug flow แต่ฟองไอน้ำจะมีความยาวลดลงประมาณ 20-30 mm หรือคิดเป็น 40% ของความยาวเดิม และสัดส่วนช่องว่างก็จะมีค่าลดลงจาก 0.7 เป็น 0.4 ยิ่งกว่านั้นการไหลแบบ Bubble flow จะเกิดมากขึ้นด้วย โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่ามากขึ้นจาก 239 เป็น 406 วัตต์ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน ความดันที่ส่วนทำระเหยจะมีค่ามากขึ้น ทำให้ฟองไอน้ำถูกขับให้เคลื่อนที่ขึ้นไปอย่างรุนแรง ฟองไอน้ำจึงเกิดการแตกตัวเป็นฟองไอน้ำเล็กๆ แล้วเคลื่อนที่ไปถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นได้มากขึ้น

จากงานวิจัยของ Gi et al. (1999) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิการทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของสารทำงานภายในท่อ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ฟองไอน้ำจะมีความยาวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ นั่นคือความยาวฟองไอน้ำน้อยสุดจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 80°C ถึงแม้ว่า CEOHP ที่ใช้จะมีความยาวส่วนทำระเหย ส่วนไม่มีการถ่ายเทความร้อน และส่วนควบแน่น รวมทั้งจำนวนโค้งเลี้ยวแตกต่างกัน แสดงว่าความยาวฟองไอน้ำไม่ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อซึ่งมีขนาดเท่ากันเท่านั้น

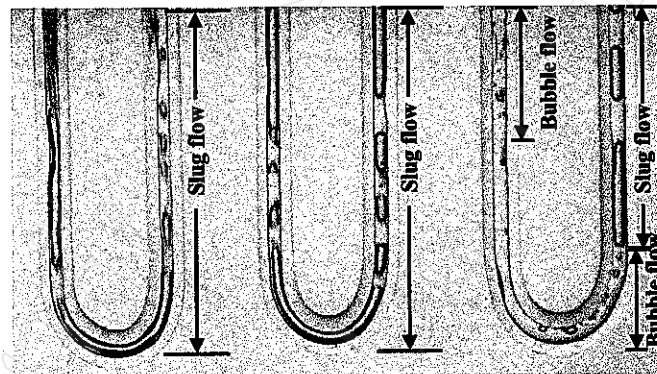
สรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลยังคงเป็นแบบ Slug flow แต่ความยาวฟองไอน้ำเฉลี่ยมีค่าลดลง โดยที่ความยาวฟองไอน้ำเฉลี่ยที่ส่วนทำระเหยของ CEOHP

ก. Tso 60 °C , Tsi 20 °C

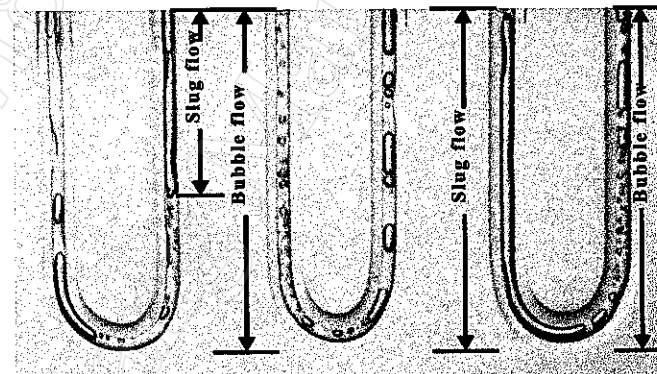
ผิวขรุขระ
ภายในทำขึ้น
เพื่อเพิ่ม f



ข. Tso 70 °C , Tsi 20 °C



ค. Tso 80 °C , Tsi 20 °C



รูป	Tso (°C)	Q (W)	ความยาวฟอง (mm)	Flow pattern
ก	60	238.7	5- 100	Slug flow
ข	70	322.9	3 – 80	Slug flow
ค	80	375.0	3 - 65	Slug and Bubble flow

รูป 4.6 รูปแบบการไหลของ CEOHP ที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.004 และ
มุมเอียง 90° Lt 11.5 m ,Le 50mm ,Di 2 mm , N 28 turn

มีค่าลดลง สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.004 และมุมเอียง 90 องศา จะมีค่าลดลง 40% ของความยาวเดิม และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยจะมีค่าลดลง 43% ดังแสดงในรูป 4.7

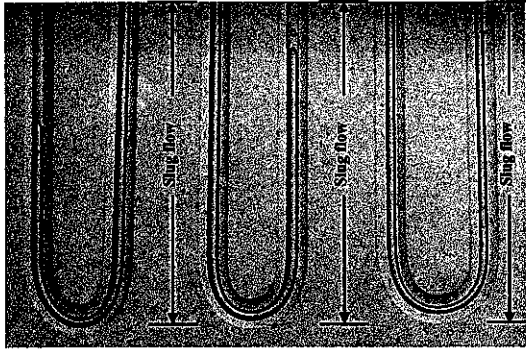
4.2.3 ผลกระทบของมุมเอียง

ในการทดสอบที่มุมเอียงจาก 0 ถึง 90 องศาจากแนวระดับ พบว่าในทุกๆ อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนและทุกค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน มุมเอียงมีผลต่อรูปแบบการไหลเหมือนกันหมด ดังนั้นจึงเลือกเฉพาะรูปเห็นผลกระทบของมุมเอียงอย่างชัดเจนมาแสดงดังรูป 4.8 ซึ่งพบว่าเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 0° ถึง 50° รูปแบบการไหลยังคงเป็นแบบ Slug flow แต่ฟองไอละมีความยาวลดลงประมาณ 40 mm หรือคิดเป็น 33% ของความยาวเดิม สัดส่วนช่องว่างมีค่าลดลงจาก 0.9 เป็น 0.45 โดยที่การไหลแบบ Bubble flow จะเกิดขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นเมื่อมุมเอียงมากกว่า 50 องศา ฟองไอละมีความยาวเพิ่มขึ้นประมาณ 10-20 mm หรือคิดเป็น 28% ของความยาวเดิม สัดส่วนช่องว่างมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.45 เป็น 0.6 โดยที่การไหลแบบ Bubble flow ยังคงเกิดขึ้นเพิ่มขึ้น สาเหตุที่มุมเอียง 50 องศา มีความยาวฟองไอละเฉลี่ยและสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดอาจเนื่องมาจากที่มุมเอียงนี้ ฟองไอละที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนขึ้นได้ง่าย ทำให้อัตราการขยายตัวของฟองไอละมีค่าน้อยส่งผลให้ความยาวของฟองไอละลดลงและสามารถถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นได้มากขึ้นดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.3 เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่ จึงไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้อื่นได้ แต่จะเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

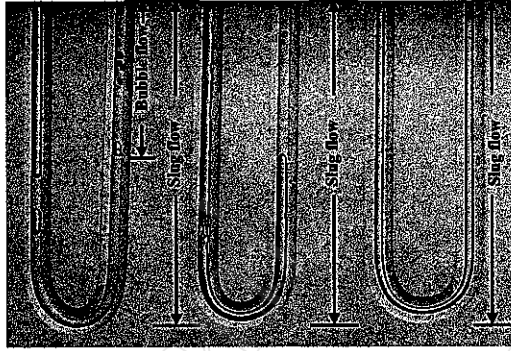
สรุปได้ว่ารูปแบบการไหลภายในท่อของ CEOHP ในทุกๆ มุมเอียงจะเป็นแบบ Slug flow ที่มีรูปแบบการไหลแบบ Bubble flow ปะปนอยู่เล็กน้อย ความยาวฟองไอละและสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดจะเกิดขึ้นที่มุมเอียง 50 องศา ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.00074 และอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 60°C โดยมีค่าเท่ากับ 5 mm และ 0.45 ตามลำดับ

4.3 ปฏิกิริยาการไหลภายในท่อ

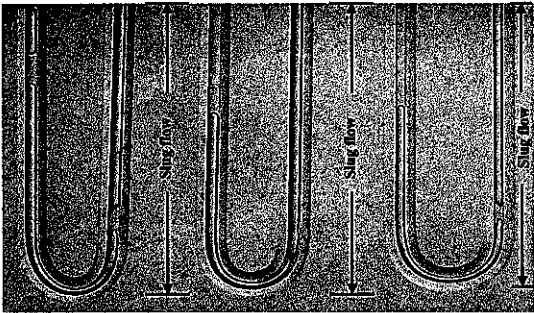
ในการพิจารณาปฏิกิริยาการไหลภายในท่อ จะสังเกตเกี่ยวกับความเร็วฟองไอละเฉลี่ย การขยายตัวของฟองไอละ ความถี่ของการสั่นของอุณหภูมิ และช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการสั่นซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิสารทำงานในส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน



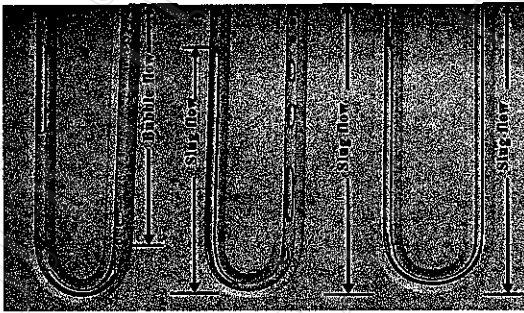
ก. มุมเอียง 0 องศา



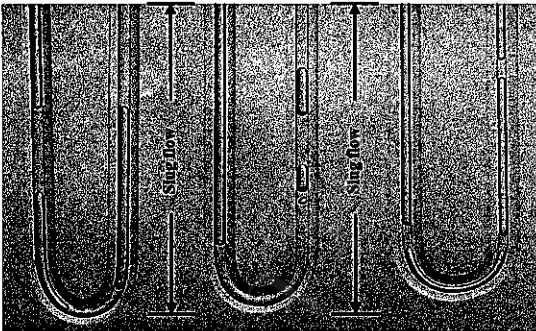
ง. มุมเอียง 70 องศา



ข. มุมเอียง 30 องศา



จ. มุมเอียง 90 องศา



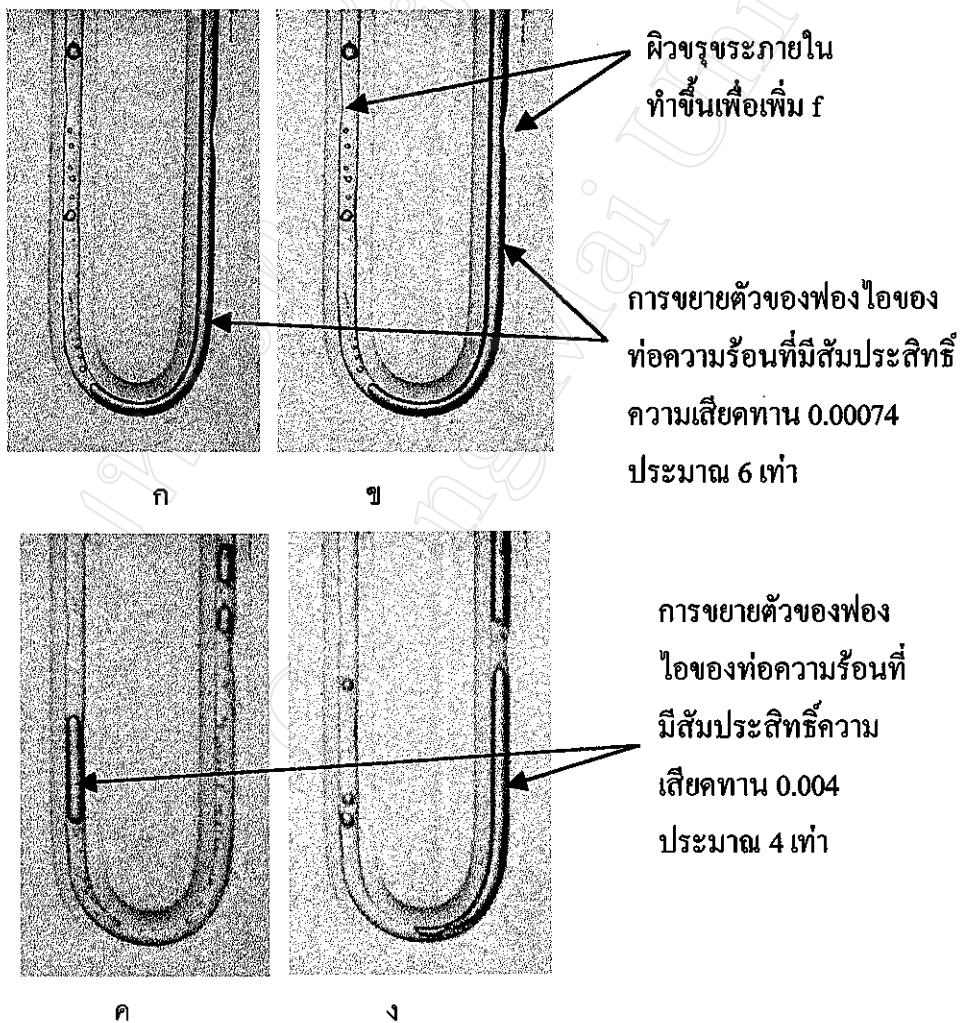
ค. มุมเอียง 50 องศา

รูป	มุม	Q (W)	ความยาวฟอง (mm)	Flow pattern
ก	0	102.33	100	Slug Flow
ข	30	219.9	10 - 40	Slug Flow
ค	50	223.0	5 - 40	Slug Flow
ง	70	188.7	3 - 120	Slug Flow
จ	90	185.4	3 - 70	Slug Flow

รูป 4.7 รูปแบบการไหลของ CEOHP ที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.00074 และอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 60°C Lt 11.5 m ,Le 50mm ,Di 2 mm , N 28 turn

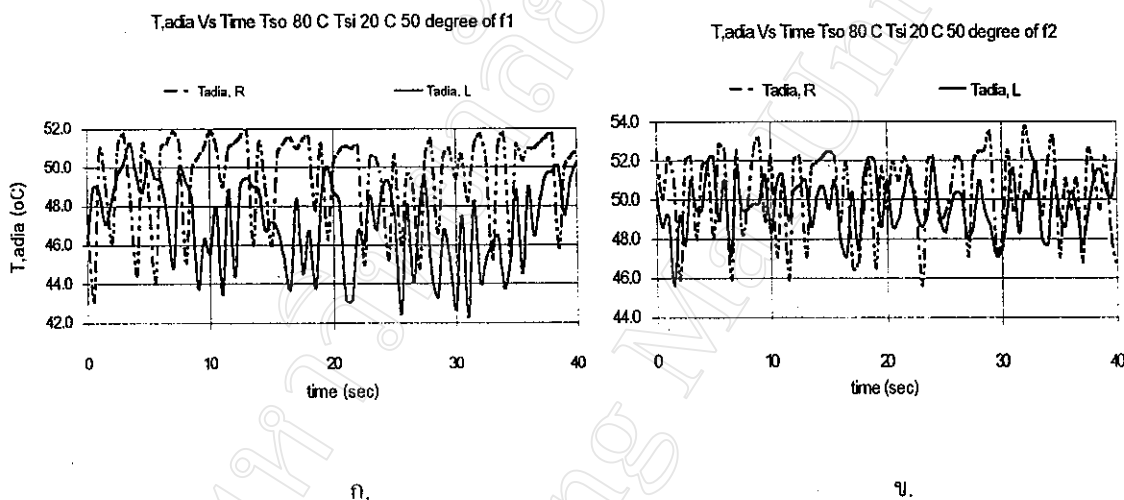
4.3.1 ผลกระทบของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จากการสังเกตจากภาพถ่ายวีดิทัศน์ซึ่งตัดมาให้เห็นเฉพาะ โค้งเดี่ยวที่ 1 จากขวามือ ดังแสดงในรูป 4.4 พบว่าในทุกอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนและทุกมุมเอียง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีผลกระทบต่อปรากฏการณ์การไหลภายในท่อเหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาเฉพาะการทดลองที่เห็นผลกระทบของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอย่างชัดเจนนั่นคือปรากฏการณ์การไหลภายในของ CEOHP ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 80°C และมุมเอียง 50 องศา ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 2 mm ความยาวส่วนทำระเหย ส่วนไม่มีการถ่ายเทความร้อน และส่วนควบแน่นคือ 50 mm ความยาวรวมของท่อคือ 11.5 m และมี 28 โค้งเดี่ยว พบว่าที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.00074 ในส่วนทำระเหยฟองไอจะเคลื่อนที่ขึ้นในท่อด้านซ้ายซึ่งใช้เวลา 0.6 sec และเคลื่อนที่ขึ้นทางท่อด้านขวาใช้เวลา 0.4 sec ด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 0.75 m/s และในหนึ่งโค้งเดี่ยวจะมี



รูป 4.8 การขยายตัวของฟองไอเมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น

ไอวิ่งผ่านส่วนทำระเหยอยู่ประมาณ 6-7 ฟองต่อวินาที และฟองที่มีขนาดประมาณ 3-5 mm จะเกิดการขยายตัวรวมกับฟองไออื่นจนมีความยาวประมาณ 10-30 mm แล้วจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนในส่วนควบแน่นฟองไอยาวจะเคลื่อนที่จากปากทางเข้าส่วนควบแน่นด้วยความเร็ว 1.25 m/s ในหนึ่งโค้งเลี้ยวจะมีจำนวนฟองไอวิ่งผ่านส่วนควบแน่นอยู่ประมาณ 8-9 ฟองต่อวินาที ส่วนที่สัมผัสประสิทธิภาพความเสียดทาน 0.004 ในส่วนทำระเหยฟองไอจะเคลื่อนที่ขึ้นท่อด้านซ้ายใช้เวลา 0.56 sec และเคลื่อนที่ขึ้นทางท่อด้านขวาใช้เวลา 0.32 sec ด้วยความเร็วเฉลี่ยประมาณ 0.4 m/s และในหนึ่งโค้งเลี้ยวจะมีจำนวนฟองไอวิ่งผ่านส่วนทำระเหยอยู่ประมาณ 4-5 ฟองต่อวินาที และฟองที่มีขนาดประมาณ 5 mm จะเกิดการขยายตัวรวมกับฟองไออื่นจนมีความยาวประมาณ 10-20 mm แล้วจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ในส่วนควบแน่นฟองไอยาวจะเคลื่อนที่จากปากทางเข้าส่วนควบแน่นด้วย



รูป 4.9 แสดงผลการสั่นของอุณหภูมิที่ส่วนไม่ถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลาของท่อความร้อน

CEOHP ที่ $T_{so} 80^{\circ}\text{C}$ และมุมเอียงเป็น 50 องศา ($Di 2\text{ mm}$, $Le 50\text{ mm}$, $Lt 15\text{ m}$, 28 โค้งเลี้ยว)

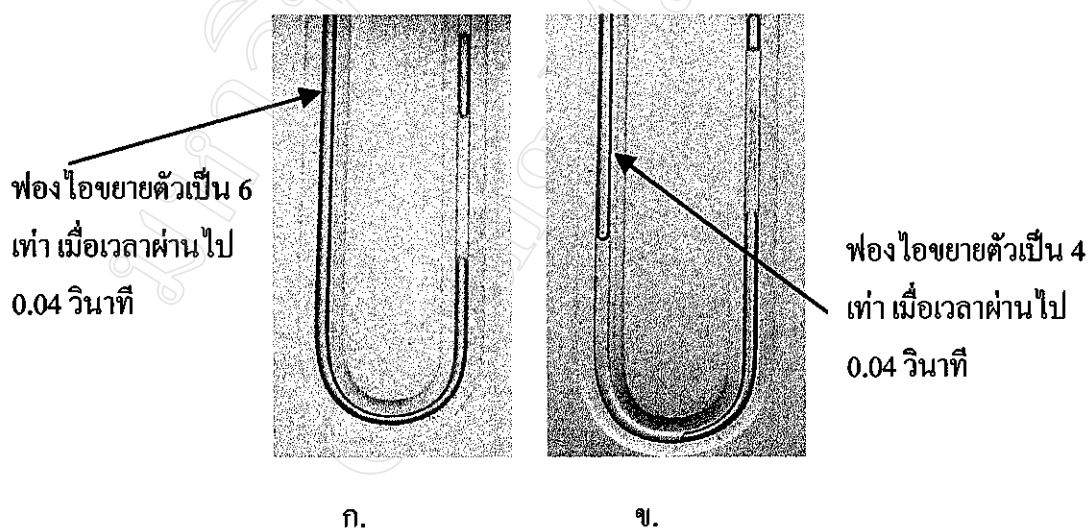
ความเร็ว 0.75 m/s ในหนึ่งโค้งเลี้ยวจะมีจำนวนฟองไอวิ่งผ่านส่วนควบแน่นอยู่ประมาณ 8-9 ฟองต่อวินาที ดังนั้นเมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของฟองไอลดลงจาก 0.75 เป็น 0.4 m/s เนื่องจากผลของความเสียดทานทำให้การรวมตัวเกิดขึ้นได้ยาก การขยายตัวของฟองไอยิ่งลดลงจาก 6 มาเป็น 4 เท่า ตามรูป 4.8 (เป็นรูปของโค้งเลี้ยวที่ 1 จากขวามือในรูป 4.4 ซึ่งการขยายตัวของฟองนั้นจะวัดได้โดยการขยายตามแนวแกนของท่อเทียบกับกับเวลา) และฟองไอจะเคลื่อนที่เข้าปากทางส่วนควบแน่นด้วยความเร็วลดลงด้วยเช่นกัน ส่วนความถี่ของการสั่น

ฟองไอจะเคลื่อนที่เข้าปากทางส่วนความแน่นด้วยความเร็วลดลงด้วยเช่นกัน ส่วนความถี่ของการสั่นจะเพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 0.56 คาบต่อวินาที และช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะลดลงจาก 4 เป็น 3°C ดังรูป 4.9 เนื่องจากผลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่มีต่อรูปแบบการไหลดังที่กล่าวข้างต้น ทำให้ฟองไอมีขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงสามารถเกิดการสั่นได้มากขึ้นในขณะที่ระยะการเคลื่อนที่ของฟองไอลดลง ทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลง เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่ จึงไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้อื่นได้ แต่จะเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

สรุป เมื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน สำหรับที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 80°C และ มุมเอียง 50 องศา CEOHP จะมีความเร็วเฉลี่ยของฟองไอลดลง 47% การขยายตัวของฟองไอจึงลดลง 33% ความถี่ของการสั่นจะเพิ่มขึ้น 47% ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะลดลง 25%

4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน

ในการสังเกตจากภาพถ่ายวิดีโอที่ช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนจาก 60°C ถึง 80°C พบว่าในทุกมุมเอียงและทุกสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนมีผลต่อปรากฏการณ์การไหลภายในท่อเหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาเฉพาะการทดลองที่เห็นผลกระทบของอุณหภูมิแหล่งความร้อนอย่างชัดเจน นั่นคือปรากฏการณ์การไหลภายในของ CEOHP ที่

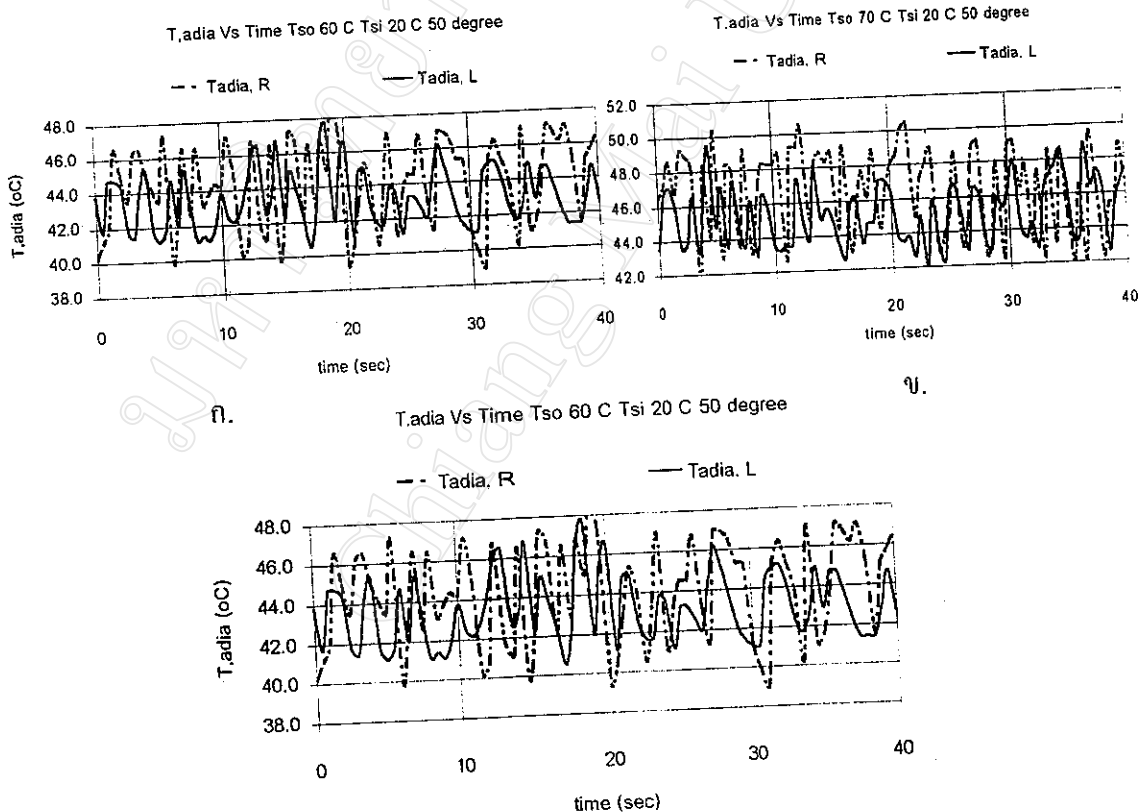


รูป 4.10 การขยายตัวของฟองไอเมื่อค่าความร้อนเพิ่มขึ้น

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.004 และมุมเอียง 50 องศา ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ที่ท่อด้านขวาในส่วนทำระเหยฟองไอจะเคลื่อนที่ขึ้นใช้เวลาเท่าเดิมคือ 0.32 sec ที่ท่อด้านซ้ายในส่วนทำระเหยฟองไอจะเคลื่อนที่ขึ้นใช้เวลาดลดลงจาก 0.56 ไปยัง 0.16 sec ความเร็วฟองไอ

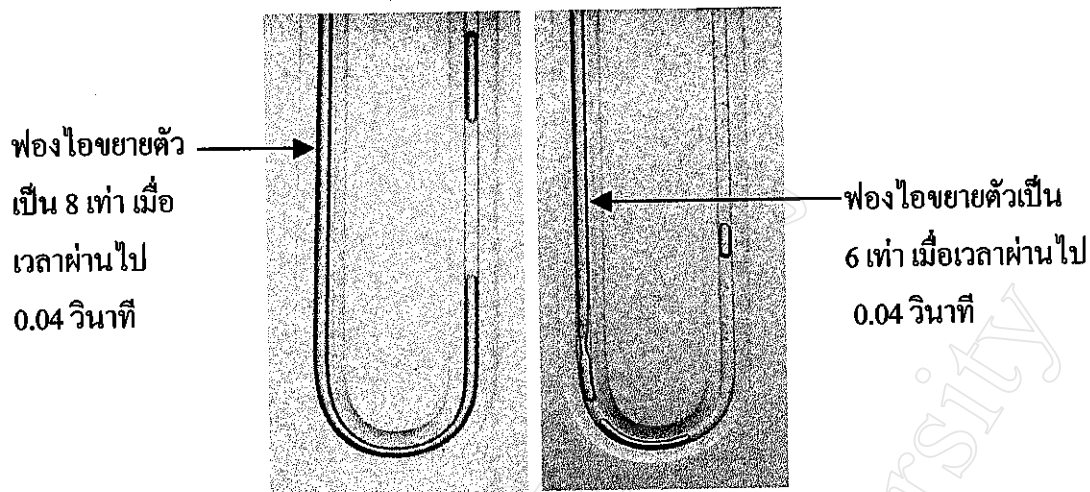
ลดลงจาก 7 เป็น 4 ฟองต่อวินาที และฟองไอจะเกิดการขยายตัวน้อยลงจาก 6 เท่า เป็น 4 เท่า ดังรูป 4.10 ในส่วนควบแน่นฟองไอยาจะเคลื่อนที่จากปากทางเข้าส่วนควบแน่นด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 0.75 m/s ในหนึ่งโคงเกลียวจะมีจำนวนฟองไอ้วงผ่านส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 7 ฟองต่อวินาที ความถี่ของการสั่นจะเพิ่มขึ้นจาก 0.45 เป็น 0.56 คาบต่อวินาที และช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะลดลงจาก 4.5 เป็น 3°C ดังรูป 4.11 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้น ผลต่างความดันระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นจะมีค่ามากขึ้นด้วยทำให้ฟองไอเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่ จึงไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของผู้อื่นได้ แต่จะเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไป

สรุป เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน สำหรับที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.004 และมุมเอียง 50° องศา CEOHP จะมีความเร็วเฉลี่ยของฟองไอเพิ่มขึ้น 50% การขยายตัวของฟองไอจึงลดลง 33% ความถี่ของการสั่นจะเพิ่มขึ้น 24% ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะลดลง 33%



ก.

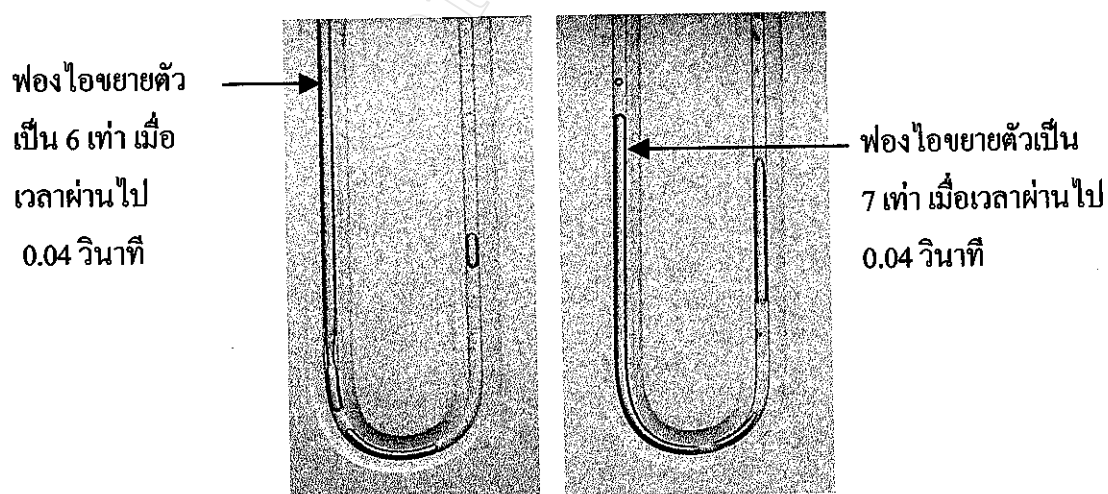
รูป 4.11 แสดงผลการสั่นของอุณหภูมิที่ส่วนไม่ถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลาของท่อความร้อน CEOHP ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.004 มุมเอียง 50° องศา (Di 2 mm, Le 50 mm, Li 15 m, 28 โคงเกลียว)



รูป 4.12 การขยายตัวของฟองไอลดลง

4.3.3 ผลกระทบของมุมเอียง

ในการสังเกตจากภาพถ่ายวีดิทัศน์ในช่วงมุมเอียงจาก 0 องศา ถึง 90 องศา พบในทุกอุณหภูมิแหล่งความร้อนและทุกสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ว่ามุมเอียงมีผลต่อปรากฏการณ์การไหลภายในท่อเหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาเฉพาะการทดลองที่เห็นผลกระทบของมุมเอียงอย่างชัดเจน นั่นคือปรากฏการณ์การไหลภายในของ CEOHP ที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.00074 และอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 60°C ซึ่งพบว่าเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 50 องศา ที่ท่อด้านซ้ายและด้านขวาในส่วนทำระเหยฟองไอจะเคลื่อนที่ขึ้นใช้เวลาลดลงจาก 0.8 เป็น 0.3 sec ความเร็วฟองไอเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นจาก 0.3 เป็น 0.5 m/s และในหนึ่งโค้งเลี้ยวจะมีจำนวนฟองไอวิ่งผ่านส่วนทำระเหยลดลงจาก 9 เป็น 7 ฟองต่อวินาที และฟองไอจะเกิดการขยายตัวน้อยลงจาก 8 เท่า เป็น

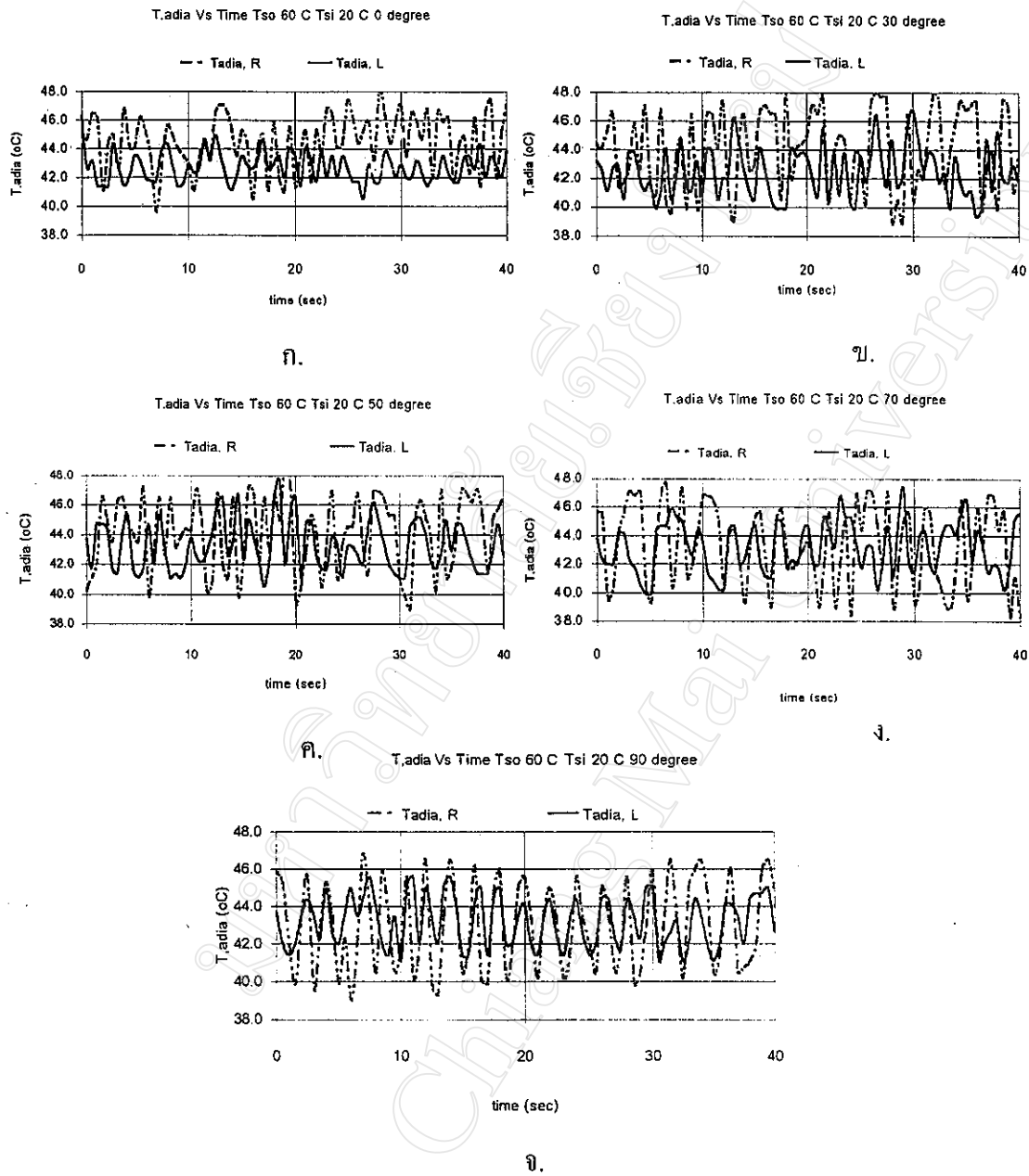


รูป 4.13 การขยายตัวของฟองไอเพิ่มขึ้น

6 เท่า ดังรูป 4.12 ในส่วนควบแน่นฟองไอยาจะเคลื่อนที่จากปากทางเข้าส่วนควบแน่นด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 0.75 m/s ในหนึ่งโคงค์จะมีจำนวนฟองไอยิ่งผ่านส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 8 ฟองต่อวินาที ความถี่ของการสั่นจะเพิ่มขึ้นจาก 0.4 เป็น 0.5 คาบต่อวินาที และช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะลดลงจาก 3 เป็น 1.5°C เมื่อมูมเอียงมากกว่า 50 องศา ที่ท่อด้านซ้ายและด้านขวาในส่วนทำระเหย ฟองไอยจะเคลื่อนที่ขึ้นใช้เวลาเพิ่มขึ้นจาก 0.3 เป็น 0.7 sec ความเร็วฟองไอยจะลดลงจาก 0.5 เป็น 0.4 m/s และในหนึ่งโคงค์จะมีจำนวนฟองไอยิ่งผ่านส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นจาก 7 เป็น 13 ฟองต่อวินาที และฟองไอยจะเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 6 เท่า เป็น 7 เท่า ดังรูป 4.13 ในส่วนควบแน่นฟองไอยาจะเคลื่อนที่จากปากทางเข้าส่วนควบแน่นด้วยความเร็วลดลงจาก 0.75 เป็น 0.5 m/s ในหนึ่งโคงค์จะมีจำนวนฟองไอยิ่งผ่านส่วนควบแน่นลดลงจาก 8 เป็น 6 ฟองต่อวินาที ความถี่ของการสั่นค่อนข้างคงที่ที่ 0.5 คาบต่อวินาที และช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจาก 1.5 เป็น 3°C ดังรูป 4.14 สาเหตุที่มูมเอียง 50 องศา มีความเร็วฟองไอยใน ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นสูงสุด มีจำนวนฟองในส่วนทำระเหยต่ำสุดและมีจำนวนฟองที่ส่วนควบแน่นสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่มูมเอียงนี้ ปริมาณของเหลวที่จะไหลกลับลงมายังส่วนทำระเหยมีปริมาณที่เหมาะสม ทำให้เกิดการเดือดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ความเร็วของฟองไอยเพิ่มขึ้น และใช้เวลาลดลง ความถี่ของการสั่นจึงมีค่าสูง และช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจึงมีค่าต่ำ

จากงานวิจัยของ Gi et al. (1999) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของมูมเอียงที่มีต่อการสั่นของสารทำงานภายในท่อในช่วง 30- 90 องศาจากแนวระดับ พบว่าที่มูมเอียงน้อยๆ การสั่นของสารทำงานจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงหรือมีความถี่สูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ที่การสั่นของอุณหภูมิของสารทำงานผ่านส่วนไม่มีการถ่ายเทความร้อนมีค่าความถี่สูงสุดที่มูมเอียง 50 องศา แสดงว่าผลของมูมเอียงที่มีต่อความถี่การสั่นของสารทำงานไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของ CEOHP เช่นเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น

สรุปมูมเอียงมีผลกระทบต่อปรากฏการณ์การไหลภายในท่อ โดยที่ความเร็วฟองไอยเฉลี่ยในส่วนทำระเหยค่าสูงสุด การขยายตัวของฟองไอยต่ำสุด ความถี่ของการสั่นสูงสุด ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุด จะเกิดที่มูมเอียง 50 องศา นั่นคือสำหรับที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.00074 และอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน 60°C CEOHP จะมีความเร็วฟองไอยเฉลี่ยในส่วนทำระเหยค่าสูงสุด 0.5 m/s การขยายตัวของฟองไอยต่ำสุดคือ 6 เท่า ความถี่ของการสั่นสูงสุดคือ 0.5 คาบต่อวินาที ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำสุดคือ 1.5°C



รูป 4.14 แสดงผลการสั่นของอุณหภูมิที่ส่วนไม่ถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลาของท่อความร้อน CEOHP เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของมุมเอียง (D_i 2 mm, L_c 50 mm, L_i 15 m, 28 โด๊งเกลียว)

จากผลทดลองจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเพิ่มขึ้น ทำให้ความถี่การสั่นของสารทำงานเพิ่มขึ้น ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ส่วนไม่มีการถ่ายเทความร้อนลดลง และค่าการส่งถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ยังไม่ทราบว่าคุณสมบัติแหล่งให้ความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเพิ่มขึ้นเท่าใด ถึงจะเกิดขีดจำกัดของ CEOHP ได้ เพราะว่าการทดลองนี้ได้ทดลองที่สภาวะปกติเท่านั้น

4.4 แผนภูมิรูปแบบการไหล (Flow pattern map)

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการไหลเพื่อที่จะนำไปสร้างแผนภูมิรูปแบบการไหลแล้วพบว่ารูปแบบการไหลเป็น Slug flow ทั้งหมด จึงไม่สามารถสร้างแผนภูมิรูปแบบการไหลได้ ดังนั้นจะทำการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติต่อรูปแบบการไหลเท่านั้น โดยทำการศึกษาจากตัวแปรไร้มิติอื่นๆ ทั้งหมด แล้วไม่มีความสัมพันธ์กัน นอกจากความสัมพันธ์ของ Ku^* และ Re_v ซึ่งนิยามว่า

$$Re_v = \frac{\rho_v v d}{\mu_v}$$

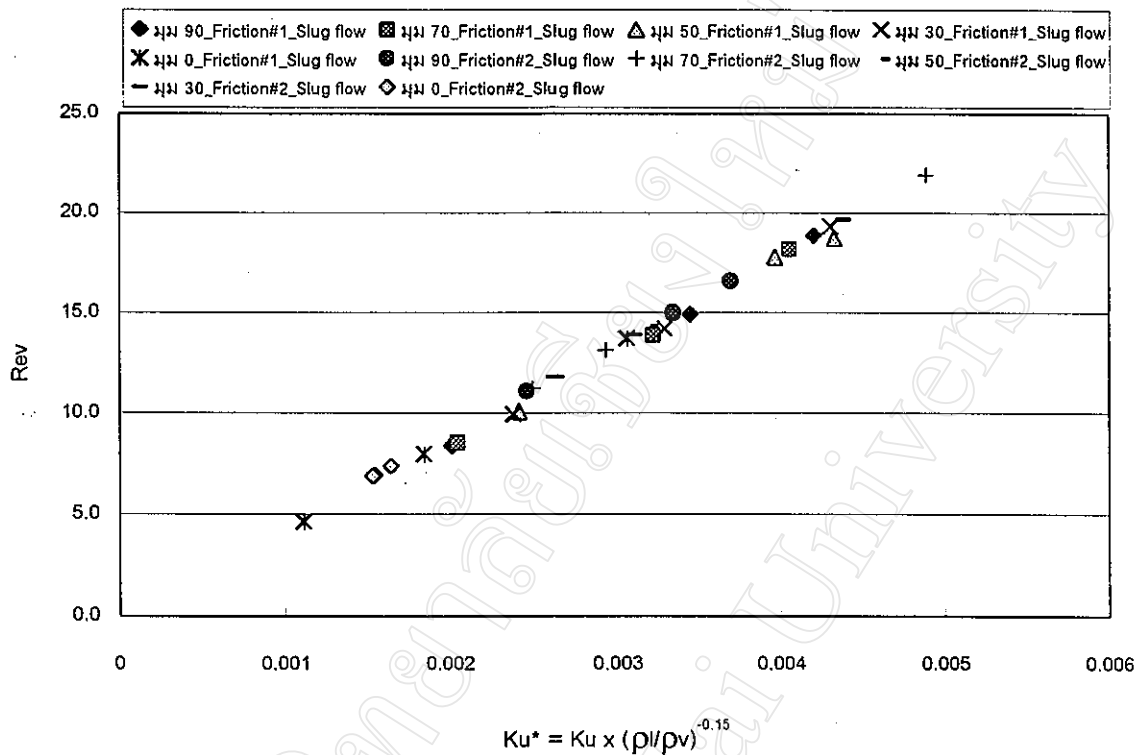
$$Ku^* = Ku \times \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{-0.15}$$

โดยที่

Ku คือตัวเลขของ Kutateladze ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถบอกถึงค่าการส่งถ่ายความร้อนต่อพื้นที่ของ CEOHP ที่สามารถถ่ายเทได้โดยคำนวณได้จาก

$$Ku = \frac{q}{h_{fc} \rho_v \left[\sigma_g \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v^2} \right) \right]^{0.25}}$$

$\frac{\rho_l}{\rho_v}$ คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของของเหลวต่อความหนาแน่นของไอ ซึ่ง $\frac{\rho_l}{\rho_v}$ เป็นตัวแปรที่กำจัดผลของอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกันของแต่ละสารทำงาน ดังนั้นจึงจะใช้แผนภูมิการไหลภายในแบบง่ายระหว่าง Ku^* และ Re_v แผนภูมิรูปแบบการไหลนี้ใช้ได้กับทุกสารทำงาน และทุกอุณหภูมิการทำงานรูป 4.15 แผนภูมิรูปแบบการไหล



รูป 4.15 แผนภูมิรูปแบบการไหล

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจะพบว่า ถ้ากำหนดรูปแบบการไหล และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายในท่อขึ้นมา จะทำให้ทราบถึงค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ ดังนั้นสะดวกในการออกแบบ ECOHP ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น วิธีการศึกษานี้จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สะดวกและง่ายในการออกแบบท่อ ECOHP