

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดเพื่อให้การวิจารณ์ผลของการทดลองนั้นเป็นไปอย่างถูกต้อง จะทำการพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้สมมุติฐานที่ได้ตั้งเอาไว้แล้วเป็นแนวทาง เพื่อให้ได้ทราบถึงรูปแบบการไหลภายใน สาเหตุของการเกิดสภาวะวิกฤต รวมทั้งตำแหน่งการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด

#### 4.1 ผลการทดลอง

นำผลที่ได้จากการทดลอง มาทำการวิเคราะห์การเกิดสภาวะวิกฤตโดยแบ่งออกเป็นสามช่วง ดังนี้ ช่วงก่อนเกิดสภาวะวิกฤต ช่วงเกิดสภาวะวิกฤต และสุดท้ายช่วงหลังจากที่เกิดสภาวะวิกฤต ในการวิเคราะห์แต่ละสภาวะนั้นได้นำภาพถ่ายจากการทดลองมาแสดงรูปแบบการไหลในแต่ละช่วง อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน และจะแสดงเฉพาะส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดเท่านั้น เนื่องจากปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นของสภาวะวิกฤตนั้นเริ่มเกิดขึ้นในส่วนทำระเหยนี้

4.1.1 ผลของอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่สภาวะวิกฤต

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดเนื่องจากมีผลต่อทุกสภาวะการทำงานของท่อความร้อน เพื่อที่จะทำการศึกษาดังขึ้นตอนการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลภายในเมื่ออุณหภูมิส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นและนำผลที่ได้มาเป็นแนวทางในการศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ต่อไป การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะนำข้อมูลของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร 5 โค้งเดี่ยว มุมการทำงาน 60 องศา และสารทำงานเป็น MP39 มาวิเคราะห์เนื่องจากที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและสารทำงานดังกล่าว สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นและทำการบันทึกภาพถ่ายได้ดีที่สุดอีกทั้งจากการทดลองเชิงปริมาณยังพบว่าที่มุม 60 องศา มีอัตราการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดจากการทดลองพบว่า ภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดนั้นจะมีการจัดเรียงตัวกันระหว่างแท่งของเหลวและฟองไอสลับกันไปตลอดทั้งท่อความร้อน โดยที่ในบางโค้งเดี่ยวบริเวณตรงโค้งเดี่ยวจะมีทั้งแท่งของเหลวและฟองไอถ้าในบริเวณโค้งเดี่ยวใดมีแท่งของเหลวอยู่ เมื่อเพิ่มความร้อนที่ส่วนทำระเหยจนแหล่งให้ความร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียสและอยู่ในสภาวะคงที่ จะมีการเดือดแบบฟองเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางด้านล่างของโค้งเดี่ยวนั้น โดยที่ฟองไอที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดเล็ก และฟองไอที่เกิดขึ้นนี้จะมีการเคลื่อนที่ไปรวมกับฟองไอขนาดใหญ่ที่อยู่ใกล้กันพร้อมๆ

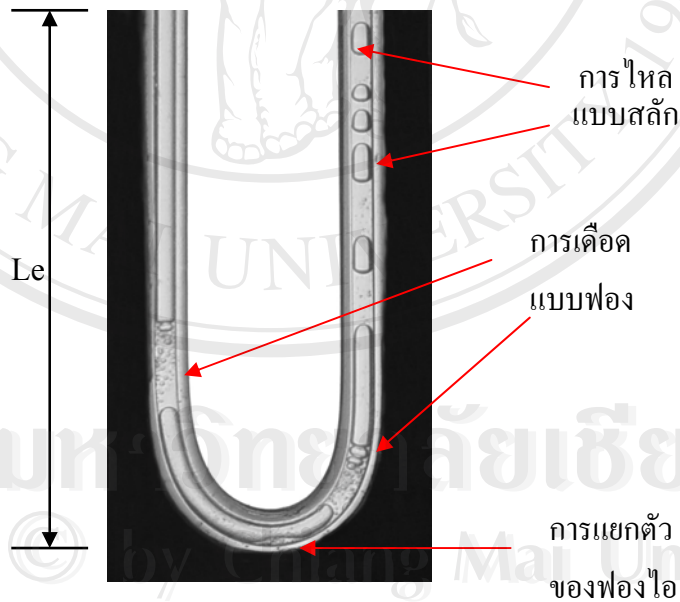
กับเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน โดยที่มีการเคลื่อนที่ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของโค้งเดี่ยว รูปแบบการไหลส่วนใหญ่เป็นแบบสลัก ในขณะที่เดียวกันถ้าบริเวณตรงกึ่งกลางของโค้งเดี่ยวเป็นตำแหน่งฟองไอเมื่อเพิ่มความร้อนที่ส่วนทำระเหยฟองไอจะแยกตัวออกจากกันซึ่งจะมีขนาดฟองไอที่โตกว่าฟองไอที่เกิดขึ้นจากแท่งของเหลว การแยกตัวดังกล่าวเกิดจากการสะสมของสารทำงานที่มากขึ้นในส่วนกึ่งกลางของโค้งเดี่ยวและเคลื่อนที่ขึ้นดันให้ฟองไอนขนาดใหญ่แยกตัวออกจากกัน ดังแสดงในรูป 4.1(ก) ถึงแม้ว่าการเกิดฟองไอจะเกิดในกรณีใดก็ตามในขณะที่ฟองไอเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนนั้นมีการเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็วต่ำขนาดของฟองไอจะมีขนาดยาวและโตขึ้นเนื่องจากได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นและมีการรวมตัวกันของฟองไอ โดยที่อุณหภูมิฟองไอจะมีความเร็วเฉลี่ย 0.25 เมตร/วินาที และความยาวเฉลี่ยของฟองไอมักจะเป็น 25 มิลลิเมตร

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับส่วนทำระเหยขึ้นไป พบว่ามีจำนวนฟองไอนขนาดเล็กที่เกิดจากการเดือดบริเวณด้านล่างของส่วนทำระเหยมากขึ้น และความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นของฟองไอมักจะเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะถ่ายเทความร้อนให้แก่ส่วนควบแน่นได้เร็วขึ้นการรวมตัวกันของฟองไอมักจะขึ้นการเคลื่อนที่ขึ้นของฟองไอมิทั้งด้านซ้ายและด้านขวาหรือด้านใดด้านหนึ่งในบางโค้งเดี่ยวในการเกิดฟองไอนั้นมีการเกิดทั้งที่ด้านล่างและด้านข้าง ความยาวเฉลี่ยของฟองไอลดลงเนื่องจากฟองไอมิระยะเวลาในการขยายตัวในส่วนทำระเหยลดลง และจำนวนฟองไอที่ได้รับความร้อนมีเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเร็วที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ฟองไอมิลักษณะบิดเบี้ยวรูปแบบการไหลจึงเป็นแบบสลัก กับแบบโพรงที่เกิดขึ้นร่วมกัน ดังแสดงในรูป 4.1(ข) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 70 องศาเซลเซียส โดยมีความเร็วเฉลี่ยของฟองไอเพิ่มขึ้นเป็น 0.3 เมตรต่อวินาที ความยาวเฉลี่ยของฟองไอลดลงเป็น 17 มิลลิเมตร

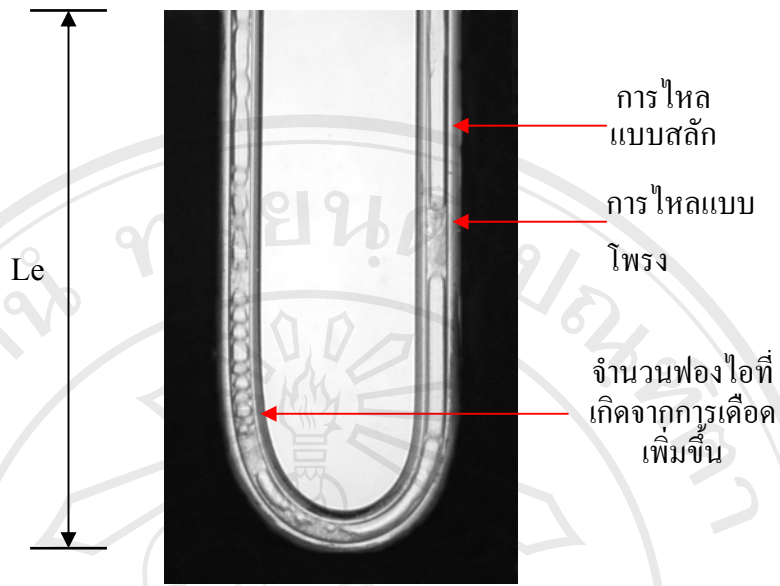
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับแหล่งให้ความร้อนต่อไปพบว่าจำนวนฟองไอนขนาดเล็กที่เกิดจากการเดือดบริเวณด้านล่างของส่วนทำระเหยจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ฟองไอที่เกิดขึ้นเหล่านี้ต่างก็เคลื่อนที่ขึ้นด้านบนจึงมีการชนกัน และรวมตัวกันของฟองไอมากขึ้นเป็นฟองไอที่ยาวขึ้นความเร็วของฟองไอยังคงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จึงมีฟอง ไอที่มีลักษณะบิดเบี้ยวเพิ่มขึ้นการเคลื่อนที่ขึ้นของฟองไอมิทั้งด้านซ้ายและด้านขวาแต่จะมีการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ไม่นานแล้วจะกลับมาเคลื่อนที่ไปเพียงด้านเดียวเพียงด้านใดด้านหนึ่งโดยจะสังเกตเห็นการท่วมในด้านที่ฟองไอเคลื่อนที่ขึ้นรูปแบบการไหลส่วนใหญ่จึงเป็นแบบโพรง สังเกตเห็นฟิล์มของเหลวที่ไหลลงมาตามผนังท่อในทุกโค้งเดี่ยวและเห็นฟิล์มของเหลวตกลงมาด้านล่างอย่างรวดเร็วสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากฟองไอที่เคลื่อนที่ขึ้นด้านบนด้านการเคลื่อนที่ลงของฟิล์มของเหลวจนกระทั่งของเหลวมีการรวมตัวกันมากขึ้นจนกระทั่งฟองไอไม่สามารถดันได้ของเหลวจึงตกลงอย่างรวดเร็ว การเคลื่อนลงของฟิล์มของเหลวจะเป็นการไหลสวนทางของฟองไอทำให้มีฟิวคชั่นเกิดขึ้นเนื่องจากความเร็วของฟองไอมิค่าสูง และ

บางครั้งเมื่อความเร็วไอมีค่าสูงพอ คลื่นของเหลวเหล่านี้จะถูกดันไว้ให้ท่วมอยู่ที่ภายในส่วนทำระเหย ทำให้เกิดการขาดช่วงของฟิล์มของเหลว และเกิดการแห้งแบบชั่วคราวขึ้นที่ด้านล่างของบริเวณที่เกิดการท่วมดังกล่าว ดังแสดงในรูป 4.1(ค) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 100 องศาเซลเซียส ในมุมเอียง 60 องศาความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตรจะสังเกตเห็นการท่วมในตำแหน่งต่ำกว่าปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมาประมาณ 27 มิลลิเมตรตำแหน่งการท่วมจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละโค้งเลี้ยวแต่อยู่ในระยะที่ใกล้เคียงกัน โดยจะมีระยะเวลาของการเกิดการแห้งนานประมาณ 0.15 - 0.5 วินาทีในแต่ละครั้ง และเกิดปรากฏการณ์การท่วมขึ้นด้วยความถี่ประมาณ 0.75-1.50 ครั้ง/วินาที

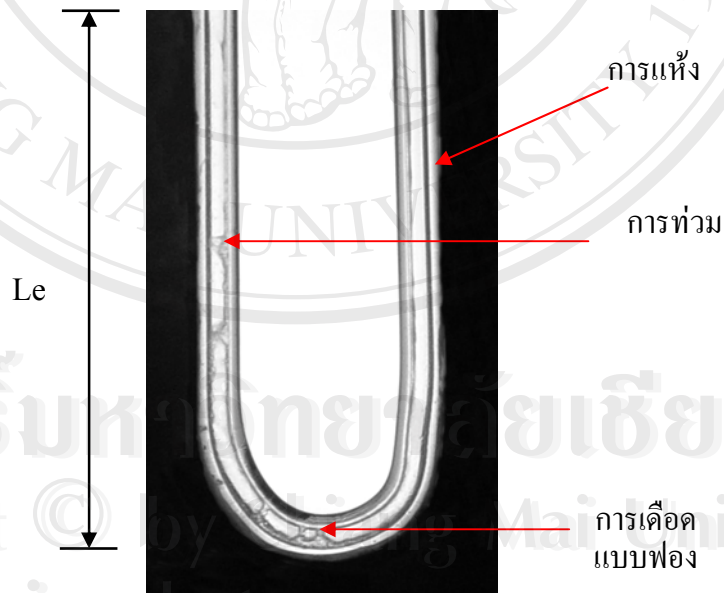
หลังจากเกิดสภาวะวิกฤตแล้วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนขึ้นไปอีก ปรากฏการณ์การท่วมจะเกิดขึ้น และการแห้งมีการขยายตัวลงสู่ด้านล่างของส่วนทำระเหย จนกระทั่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนขึ้นไปถึง 150 องศาเซลเซียส การแห้งจะเกิดขึ้นตลอดความยาวส่วนทำระเหยของท่อ และของเหลวจะถูกดันไว้ให้ท่วมอยู่ที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหย ดังแสดงในรูป 4.1(ง)



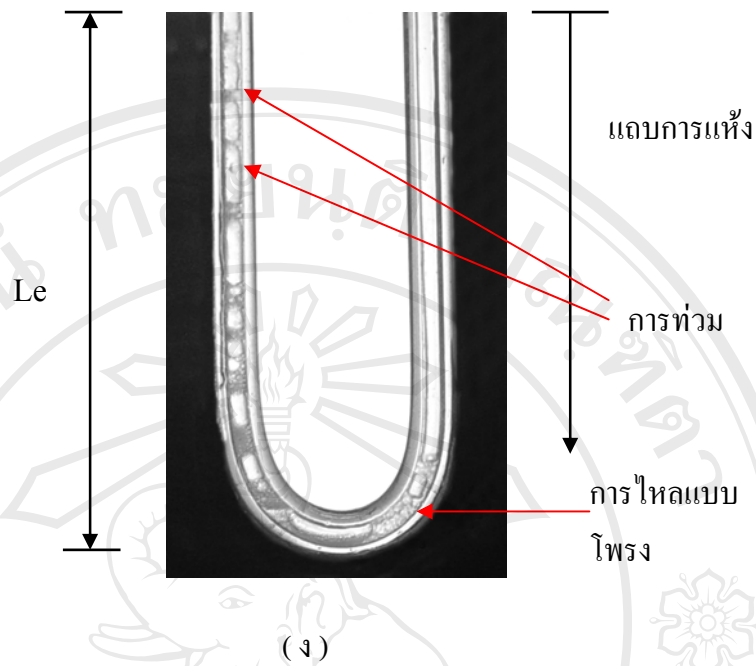
(ก)



(ข)



(ค)

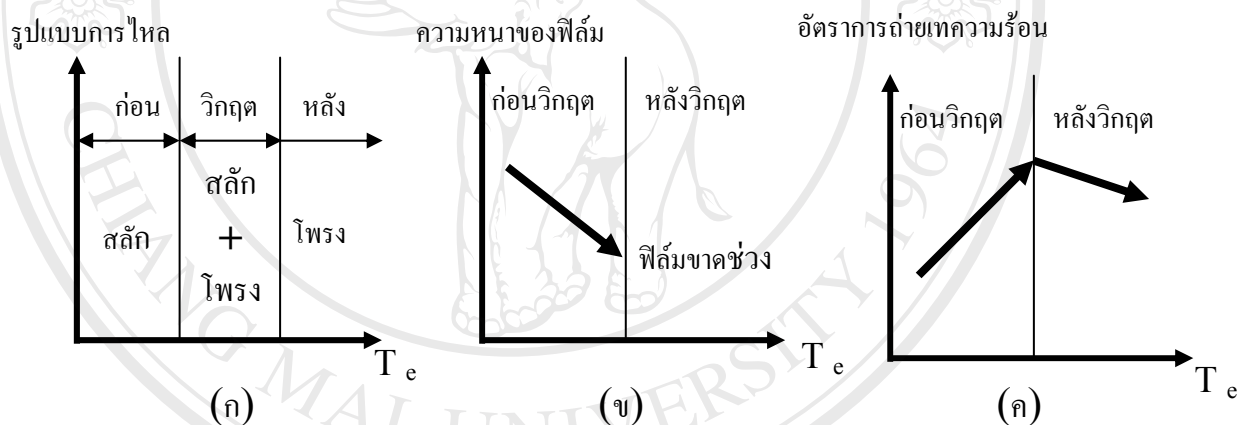


รูป	$T_h$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Flow pattern	$q$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
ก	50	Slug	15	0.25	25
ข	100	Slug+Churn	20	0.3	17
ค	130	Churn	18	-	-
ง	150	-	15	-	-

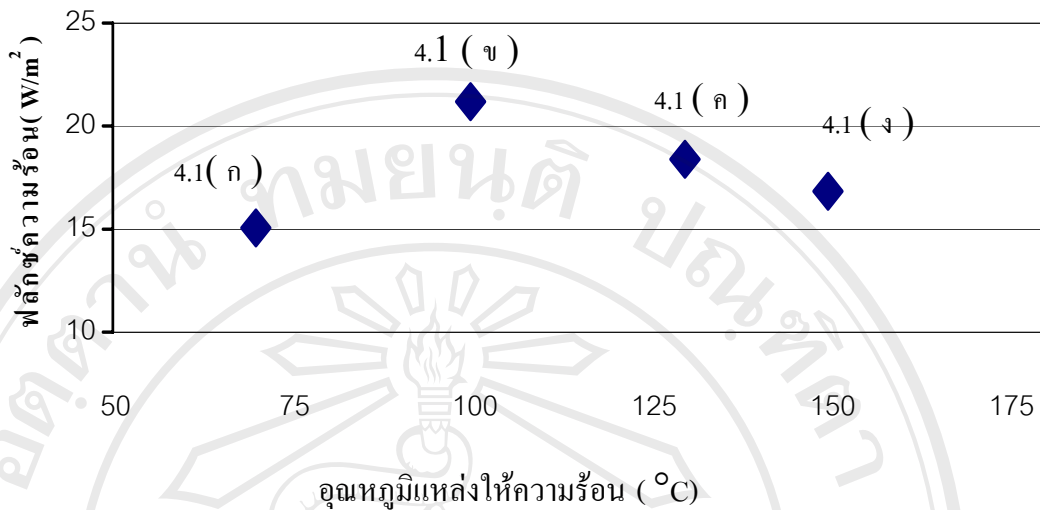
รูป 4.1 ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร สารทำงานเป็น MP39

รูป 4.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่เพิ่มขึ้นกับปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นของท่อความร้อนตามรูป 4.1 โดยที่รูปแบบการไหลก่อนสภาวะวิกฤตนั้นจะเป็นแบบสลัก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยขึ้นรูปแบบการไหลแบบโพรงจะเกิดขึ้นเนื่องจากฟองไอน้ำมีความเร็วสูงและบิดเบี้ยวไป ฟองไอน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการเดือดจำนวนมากบริเวณด้านล่างของ

ส่วนทำระเหยเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนเกิดการรวมตัวกัน และด้านการเคลื่อนที่กลับของของเหลว ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตขึ้นในท่อความร้อน หลังจากเกิดสภาวะวิกฤตแล้วเมื่อเพิ่มความร้อนขึ้นอีก รูปแบบการไหลเป็นแบบโพรงเพียงอย่างเดียว ดังรูป 4.2 (ก) ซึ่งรูปแบบการไหลนี้จะส่งผลต่อความหนาของฟิล์มของเหลวที่ผิวของท่อความร้อน โดยที่ความหนาของฟิล์มจะลดลงเมื่อรูปแบบการไหลเปลี่ยนจากสลักไปเป็นแบบโพรง เนื่องจากการบิดเบี้ยวของฟองไอทำให้เกิดการท่วมขึ้นและด้านการไหลกลับของฟิล์มของเหลว จึงทำให้ความหนาของฟิล์มลดลง และถ้ารูปแบบการไหลเป็นแบบโพรงเพิ่มขึ้นปริมาณการท่วมจะเกิดขึ้นมากตามทำให้ฟิล์มของเหลวขาดช่วงและเกิดการแห้งขึ้น ซึ่งเป็นสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด ดังรูป 4.2 (ข) ดังนั้นก่อนเกิดสภาวะวิกฤตอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิส่วนทำระเหย และหลังจากเกิดสภาวะวิกฤตไปแล้วค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง ดังรูป 4.2 (ค)



รูป 4.2 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น กับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด



รูป 4.3 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ที่เกิด กับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดซึ่งสัมพันธ์กับรูป 4.1

รูป 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร ใช้ MP 39 เป็นสารทำงาน ซึ่งอัตราความร้อนในแต่ละจุดสัมพันธ์กับรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดในรูป 4.1(ก), 4.1(ข), 4.1(ค) และ 4.1(ง) ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยขึ้น รูปแบบการไหลภายในเปลี่ยนจากแบบสลักเป็นแบบโพรง ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตได้ง่ายขึ้น และทำให้อัตราการส่งถ่ายความร้อนลดลง สาเหตุของการเกิดสภาวะวิกฤตเกิดจากปรากฏการณ์การท่วม เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองของ Katpradit et al.(submitted) ที่มุ่งการทำงานในแนวตั้ง พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยจากการสังเกตเห็นการเกิดปรากฏการณ์การท่วมที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหย และทำให้เกิดการแห้งตามมานั้นสอดคล้องกับสมมุติฐานการเกิดสภาวะวิกฤตของ Katpradit et al.(submitted)

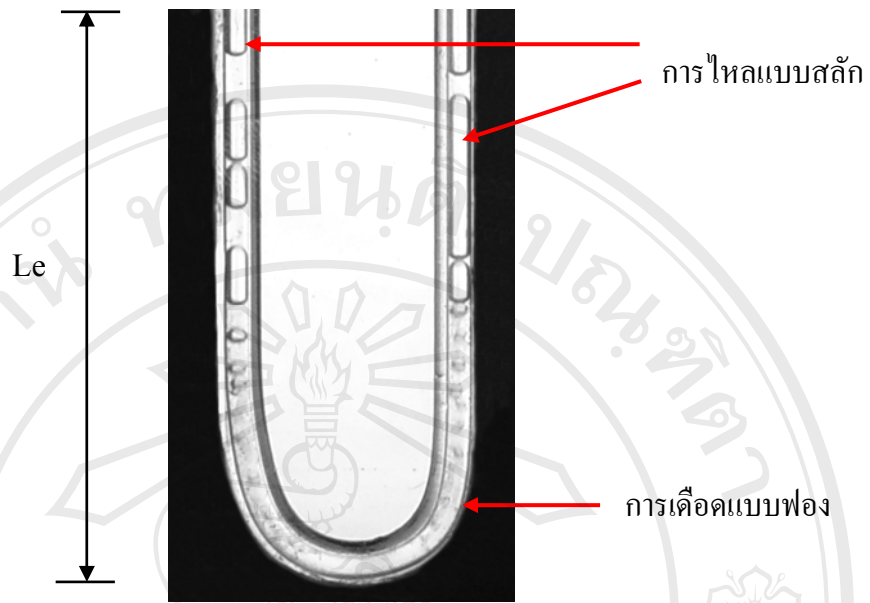
4.1.2 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่สภาวะวิกฤต

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันที่สภาวะวิกฤต โดยเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างท่อความร้อนแบบสันที่มีความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อนและส่วนควมแน่น 50 มิลลิเมตร ที่ 5 และ 10 โค้งเลี้ยว มุมการทำงาน 40 องศา และสารทำงานเป็น MP39

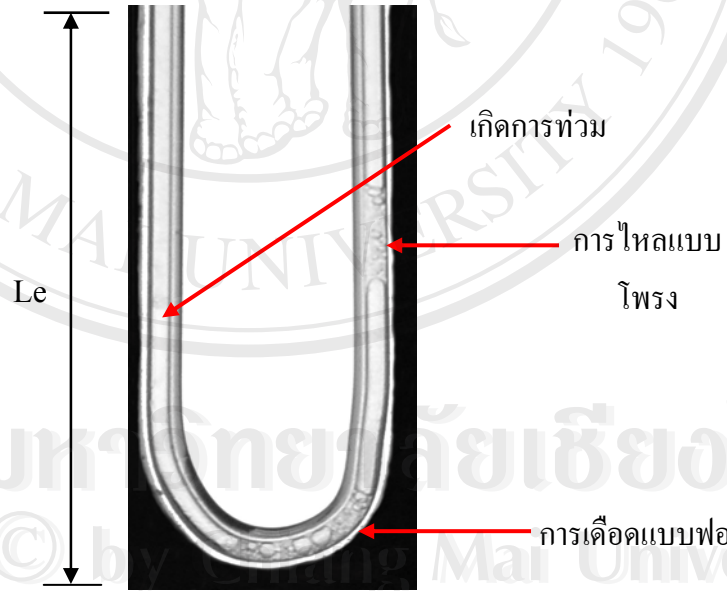
รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้น ที่มีจำนวน 5 โค้ง เลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับส่วนทำระเหยขึ้น การเดือดแบบฟองมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลส่วนทำระเหยเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบ สลักเป็นการไหลแบบสลักที่มีฟองไอสั้นลง เนื่องจากความเร็วไอมีค่าสูงขึ้นเป็น 0.22 เมตรต่อ วินาที เกิดการชนกันและทำให้ฟองไอยุบตัวทำให้มีความยาวลดลงจาก 25 มิลลิเมตร เป็น 22 มิลลิเมตร ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดสลับกันไประหว่างท่อในแต่ละโค้งเลี้ยว ดังแสดงใน รูปที่ 4.4 (ก) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 70 องศาเซลเซียส

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับส่วนทำระเหยขึ้น พบว่า การเดือดรุนแรงมากขึ้น ความเร็วไอมีค่า เพิ่มขึ้นวัดค่าได้ 0.35 เมตรต่อวินาที ทำให้เกิดการชนกันของฟองไอมากขึ้น และความยาวฟอง ไอลดลงเป็น 12 มิลลิเมตร บางจังหวะฟองไอรวมตัวกันและมีลักษณะที่บิดเบี้ยว รูปแบบการไหล เปลี่ยนจากการไหลแบบสลักไปเป็นการไหลแบบโพรง ปริมาณของเหลวในส่วนทำระเหยของท่อ ความร้อนแบบสั้นลดลง มีการระเหยตัวสูงขึ้น ความดันไอมีค่าสูงขึ้นจนสามารถดันการไหลลง ของฟิล์มของเหลว ทำให้เกิดการกองตัวของฟิล์มของเหลวที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหย เกิดเป็น ปรากฏการณ์การท่วมขึ้นที่บริเวณต่ำจากปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมาประมาณ 25 มิลลิเมตร มี ระยะเวลาการเกิดปรากฏการณ์การท่วมนานประมาณ 0.35 - 0.75 วินาทีต่อครั้ง ในขณะที่ยังเกิด การระเหยตัวของฟิล์มของเหลวที่บางอยู่ จึงทำให้เกิดการแห้งขึ้นที่ด้านล่างบริเวณที่เกิดการท่วม และขยายตัวลงด้านล่างของส่วนทำระเหย เป็นการเกิดการแห้งแบบไม่ถาวร ระยะเวลาการเกิด ประมาณ 0.3 - 0.6 วินาทีต่อครั้ง โดยการเกิดการแห้งนั้นจะเกิดขึ้นในท่อใดท่อหนึ่งแต่จะเกิดใน ตำแหน่งเดิมหรือใกล้เคียงตำแหน่งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความ ร้อนเป็น 100 องศาเซลเซียสและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยมากขึ้น ขนาดของฟองไอที่เกิดขึ้น มีรูปร่างที่บิดเบี้ยว ทำให้รูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงจากแบบสลักไปเป็นการไหลแบบโพรงได้ ง่าย เนื่องจากที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหยจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิสูง การเกิดสภาวะวิกฤต ของท่อความร้อนแบบสั้นจะขยายตัวตลอดส่วนทำระเหยของท่อความร้อน โดยเกิดปรากฏการณ์ การแห้งขึ้นจากท่อด้านนอกเข้ามาด้านใน เป็นการเกิดการแห้งแบบถาวร โดยบริเวณของการแห้ง นั้นจะเกิดขึ้นแล้วขยายตัวลงมาทางด้านล่างของส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั้น ดังแสดง ในรูปที่ 4.4 (ค) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 150 องศาเซลเซียส

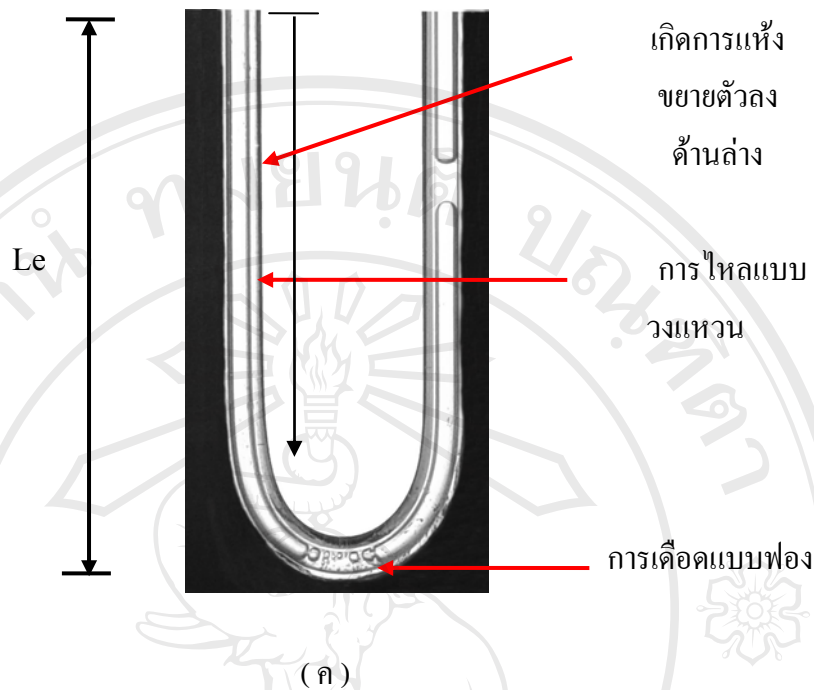




(ก)



(ข)



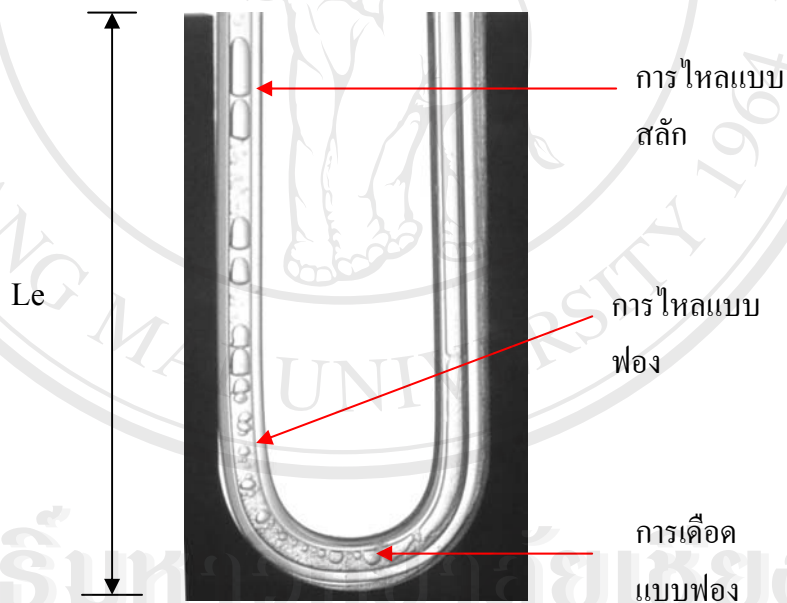
รูป	$T_v$ (°C)	Flow pattern	$q$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
ก	70	Slug	10	0.22	22
ข	100	Slug+Churn	18	0.35	12
ค	150	Annular	15	-	-

รูป 4.4 รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด จำนวน 5 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร มุมการทำงาน 40 องศา แสดงเฉพาะส่วนทำระเหยโค้งเลี้ยวที่ 1

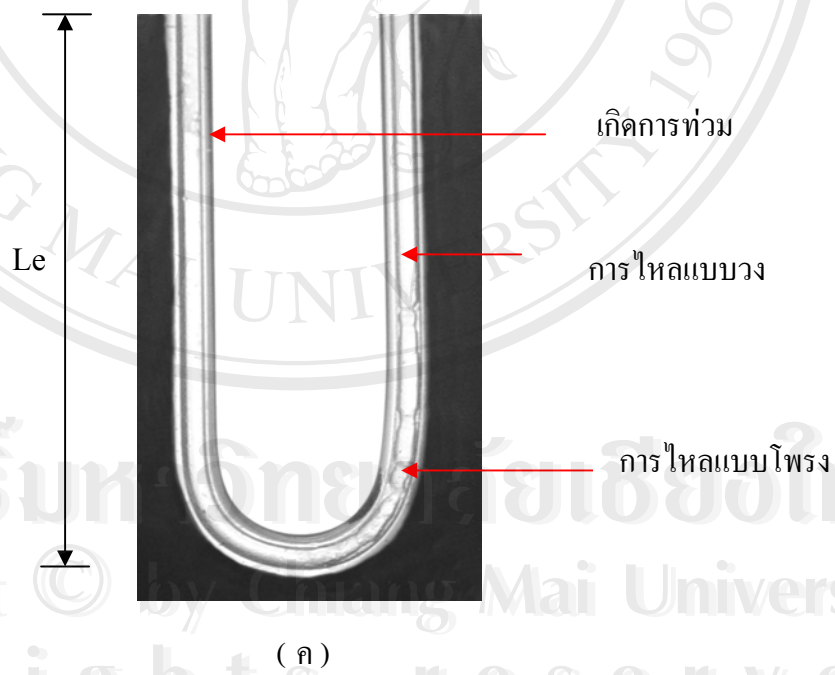
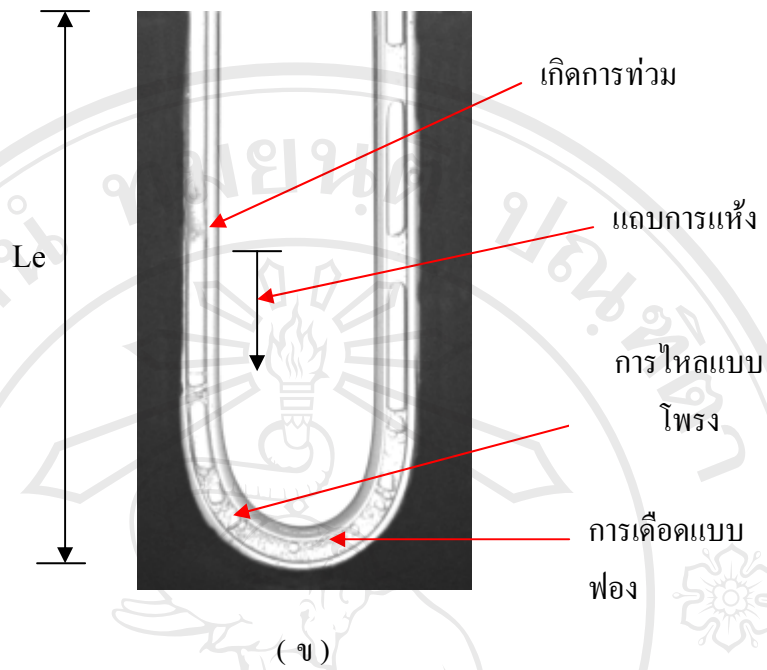
รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันที่มีจำนวน 10 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนขึ้น การเดือดแบบฟองที่เกิดขึ้นที่บริเวณโค้งเลี้ยวในส่วนทำระเหยมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลในส่วนทำระเหยเปลี่ยนแปลงจากแบบสลักเป็นแบบสลักที่มีฟองไอสั้นลง เนื่องจากความเร็วของฟองไอมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.25 เมตรต่อวินาที ทำให้เกิดการชนกันของฟองไอแล้วเกิดการยุบตัว ทำให้ความยาวฟองไอลดลงจาก 30 มิลลิเมตร เป็น 20 มิลลิเมตร โดยเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นสลับกันไปในแต่ละท่อในโค้งเลี้ยว ตามรูป 4.5(ก) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 70 องศาเซลเซียส

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยต่อไป รูปแบบการไหลเป็นแบบสลักที่มีฟองไอบิดเบี้ยว ปริมาณของเหลวในส่วนทำระเหยลดลง เนื่องจากความเร็วไอบีค่าสูงขึ้นจาก 0.25 เมตรต่อวินาที เป็น 0.32 เมตรต่อวินาที ความเร็วไอเพิ่มขึ้นด้านการไหลกลับของฟิล์มของเหลว ทำให้เกิดการท่วมที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมาประมาณ 25 มิลลิเมตร มีระยะเวลาการท่วมประมาณ 0.4 – 0.8 วินาทีต่อครั้ง ทำให้ฟิล์มของเหลวที่รับความร้อนระเหยตัวและเกิดการแห้งขึ้นและขยายตัวลงมาด้านล่างของส่วนทำระเหย เป็นการแห้งแบบไม่ถาวร เกิดขึ้นนานประมาณ 2.5 - 3.75 วินาทีต่อครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 100 องศาเซลเซียส

หลังจากนั้นให้อุณหภูมิกับส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นอีก บริเวณที่เกิดการแห้งจะเกิดขึ้นอย่างถาวร โดยรูปแบบการไหลจะเป็นแบบโพรง เกิดการแห้งจากท่อที่อยู่ริมสุดมาก่อน หลังจากนั้นจะเกิดขึ้นกับท่อที่อยู่ถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 150 องศาเซลเซียส



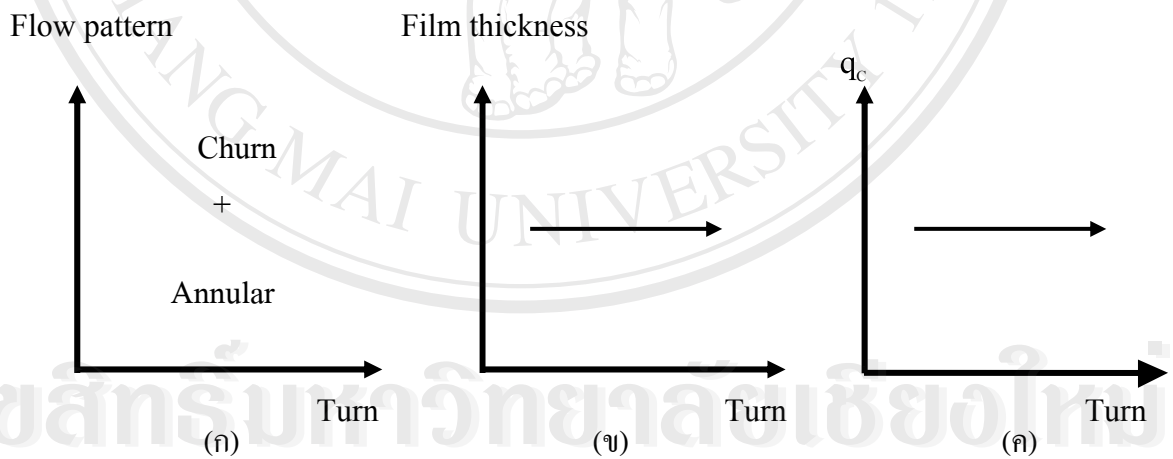
(ก)



รูป	$T_v$ (°C)	Flow pattern	$q$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
ก	70	Slug	17	0.25	20
ข	100	Slug+Churn	24	17	
ค	150	Annular	33	-	-

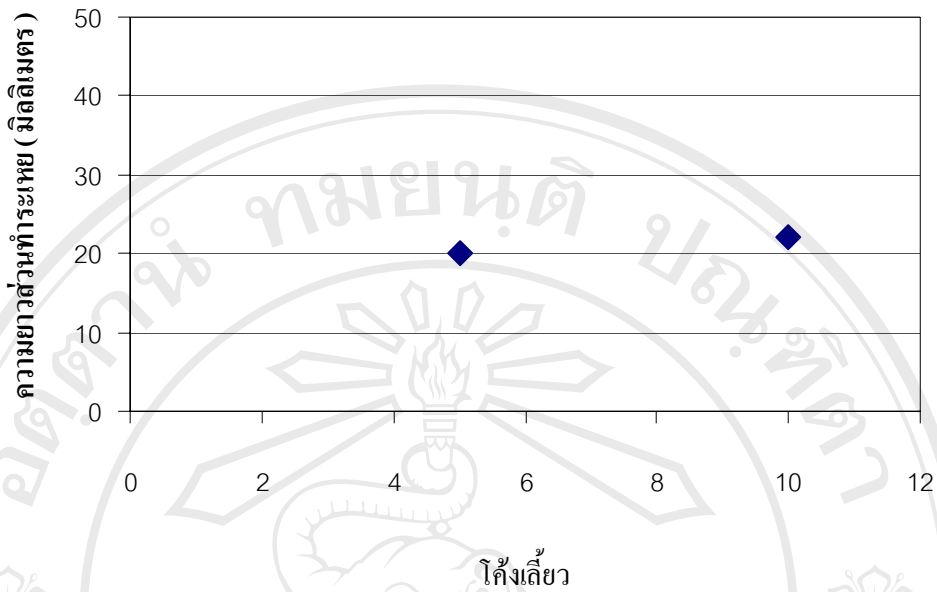
รูป 4.5 รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด จำนวน 10 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร มุมการทำงาน 40 องศา แสดงเฉพาะส่วนทำระเหยโค้งเลี้ยวที่ 1

รูปที่ 4.6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวที่เพิ่มขึ้นกับปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นของท่อความร้อนตามรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยที่รูปแบบการไหลที่สภาวะวิกฤตเมื่อจำนวนโค้งเลี้ยวเพิ่มขึ้นนั้นไม่เปลี่ยนแปลง โดยเป็นรูปแบบการไหลแบบโพรงและแบบวงแหวนทั้ง 5 โค้งเลี้ยวและ 10 โค้งเลี้ยว ซึ่งรูปแบบการไหลดังกล่าวจะส่งผลทำให้ความหนาของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นอัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตจึงไม่เปลี่ยนแปลงตามจำนวน โค้งเลี้ยวที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.5



รูป 4.6 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ที่เกิด กับจำนวนโค้งเลี้ยว

รูป 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเกิดการแห้งโดยวัดจากปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมาและจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด จากรูปแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการเกิดการแห้งนั้นไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนของโค้งเลี้ยวที่เพิ่มขึ้น



รูป 4.7 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งการแห้งและจำนวนโค้งเดี่ยวของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด

รูปที่ 4.8 แสดงข้อมูลจากการทดลองของ Katpradit et al. (submitted) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเดี่ยวและอัตราความร้อนวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นที่ทำมาจากท่อทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 มิลลิเมตร และใช้ R123 เป็นสารทำงาน พบว่าเมื่อจำนวนโค้งเดี่ยวของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่ออัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูป 4.8 ความสัมพันธ์ของจำนวนโค้งเดี่ยวและอัตราความร้อนวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด

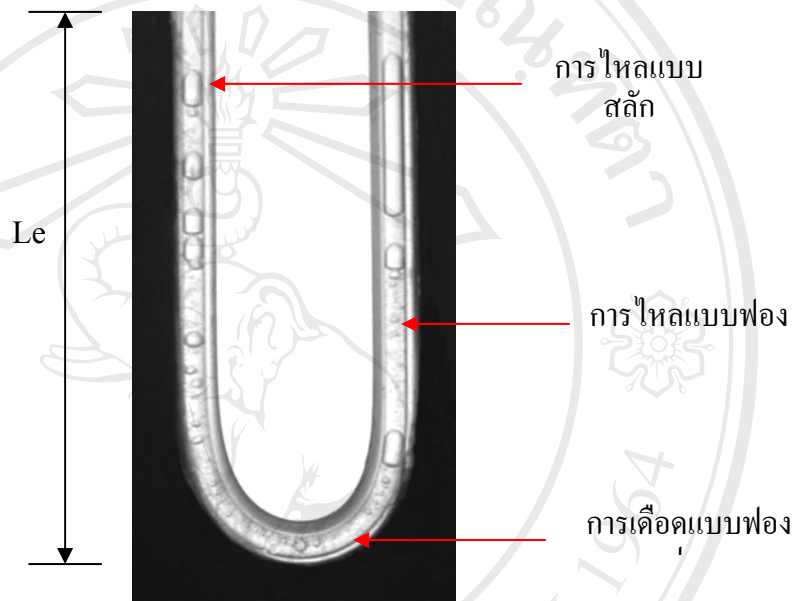
จากการทดลองพบว่า สาเหตุของการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่จำนวนโค้งเลี้ยวเพิ่มขึ้น เกิดจากการท่วมเนื่องจากการไหลสวนทางกันของไอที่ระเหยตัวและด้านการไหลลงของฟิล์มของเหลว โดยการท่วมนั้นจะเริ่มเกิดขึ้นที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหย และการแห้งนั้นจะเกิดขึ้นในท่อที่อยู่ด้านริมสุด แล้วขยายเข้ามายังท่อที่อยู่ตรงกลาง เนื่องจากท่อที่อยู่ด้านริมสุดนั้นจะเกิดการต้านการเคลื่อนที่กลับไปมาของสารทำงาน เนื่องจากเป็นท่อที่ถูกปิดปลายเอาไว้ รูปแบบการไหลที่สภาวะวิกฤตจะมีรูปแบบการไหลแบบสลักและแบบโพรงทั้ง 5 โค้งเลี้ยว และ 10 โค้งเลี้ยว โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล ส่งผลให้ความหนาของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลงทำให้อัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองของ Katpradit et al. (submitted) แล้วพบว่ามีความโน้มไปในทิศทางเดียวกันจำนวนโค้งเลี้ยวไม่มีผลต่อตำแหน่งของการเกิดการแห้ง รูปแบบการไหลภายในและอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด

#### 4.1.3 ผลของสารทำงาน ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่สภาวะวิกฤต

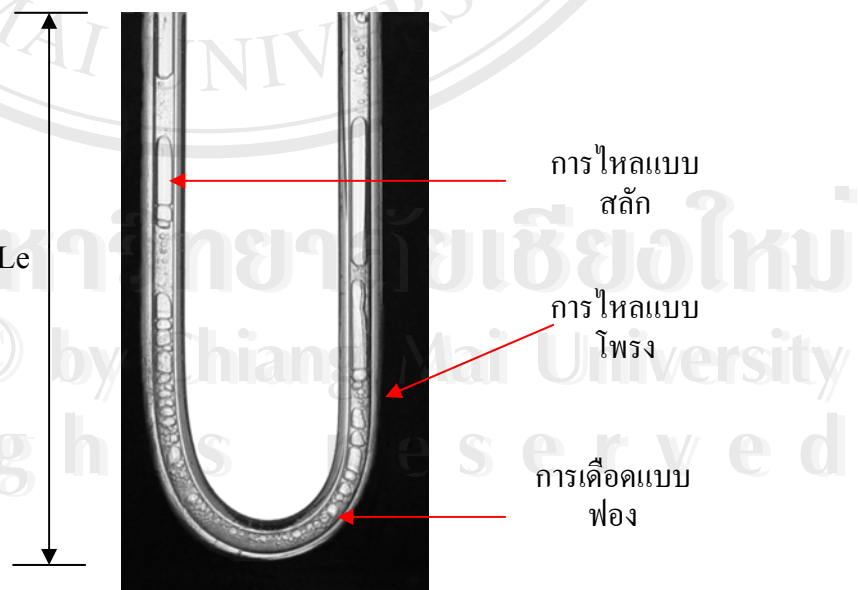
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของสารทำงาน ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่สภาวะวิกฤต โดยจะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองเชิงทัศนระหว่างท่อความร้อนแบบสั้นที่ใช้ MP 39 และ HP 62 เป็นสารทำงานในหัวข้อนี้ใช้ข้อมูลของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่ใช้สารทำงานเป็น HP 62 ที่มีความยาวส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อนและส่วนควบแน่น 50 มิลลิเมตร 5 โค้งเลี้ยวและมุมเอียง 60 องศาวิเคราะห์เนื่องจากสามารถเห็นปรากฏการณ์การไหลภายในท่อความร้อนแบบสั้นที่สภาวะวิกฤตได้อย่างชัดเจนสำหรับข้อมูลของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่มีส่วนกันความร้อนและส่วนควบแน่น 50 มิลลิเมตร 5 โค้งเลี้ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และสารทำงานเป็น MP 39 นั้นได้ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.1.1 แล้ว ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อมูลของท่อความร้อนแบบสั้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร และใช้สารทำงานเป็น HP 62 เป็นสารทำงาน หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ถึงผลของสารทำงาน ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสั้นที่สภาวะวิกฤต โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลในหัวข้อ 4.1.1

รูป 4.9 แสดงขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 1.5 มิลลิเมตร ใช้ HP 62 เป็นสารทำงานจากการทดลองพบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 50 องศาเซลเซียส ไม่พบว่ามีเกิดการเดือดแบบฟองเกิดขึ้นที่ด้านล่างของส่วนทำระเหยเหมือนกับกรณีอื่นๆ แต่จะมีการ

แยกตัวของฟองไอที่บริเวณดังกล่าวเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ และฟองไอที่แยกตัวจะเคลื่อนที่ขึ้นพร้อมทั้งขยายตัวในส่วนทำระเหย แต่การขยายตัวนี้เป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้รูปแบบการไหลเป็นแบบสลัก มีการเคลื่อนที่ขึ้นด้วยความเร็วต่ำ ดังแสดงในรูป 4.9 (ก) โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสนี้ ฟองไอมีความเร็วเฉลี่ย 0.28 เมตร/วินาที และความยาวเฉลี่ยของฟองไอมีค่าเป็น 25 มิลลิเมตร

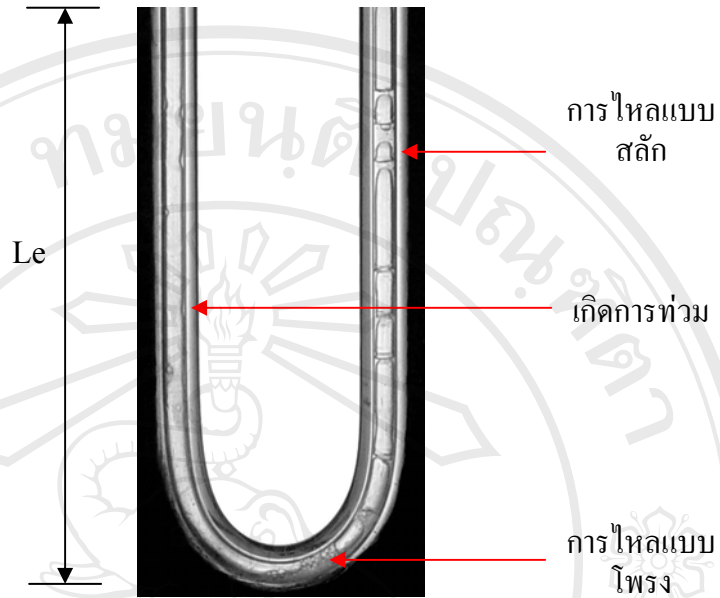


( ก )

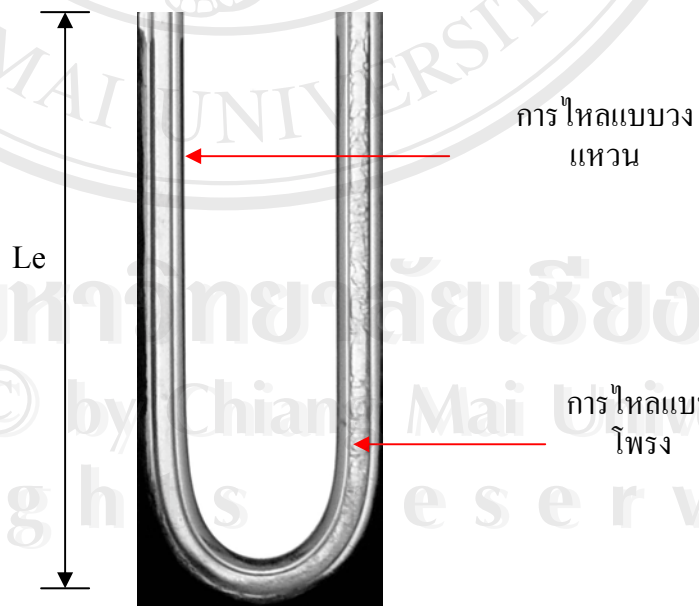


( ข )





(ค)



(ง)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved

รูป	$T_v$ (°C)	Flow pattern	$q$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_{bubble}$ (m/s)	$L_{bubble}$ (mm)
ก	50	Slug	10.03	0.28	25
ข	70	Slug+Churn	12.54	0.35	22
ค	100	Churn	15.88	-	-
ง	130	-	17.55	-	-

รูป 4.9 รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร ใช้ HP 62 เป็นสารทำงาน

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนขึ้น จะทำให้เกิดการแยกตัวของฟองไอน้ำขึ้น เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของฟองไอของ MP39 และ HP62 แล้วจะเห็นว่าฟองไอของ HP62 จะมีขนาดเล็กกว่ามากและเกิดจากการเดือด ส่วนฟองไอของ MP39 จะมีขนาดใหญ่ และเกิดจากการขยายและแยกตัวของฟองไอยาว ๆ การเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของฟองไอน้ำมีความเร็วเพิ่มขึ้น และความยาวเฉลี่ยลดลง รูปแบบการไหลยังคงเป็นแบบสลัก ดังแสดงในรูป 4.9 (ข) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 70 องศาเซลเซียส โดยจะมีความเร็วเฉลี่ยของฟองไอเพิ่มขึ้นเป็น 0.35 เมตร/วินาที และความยาวเฉลี่ยของฟองไอลดลงเป็น 22 มิลลิเมตร

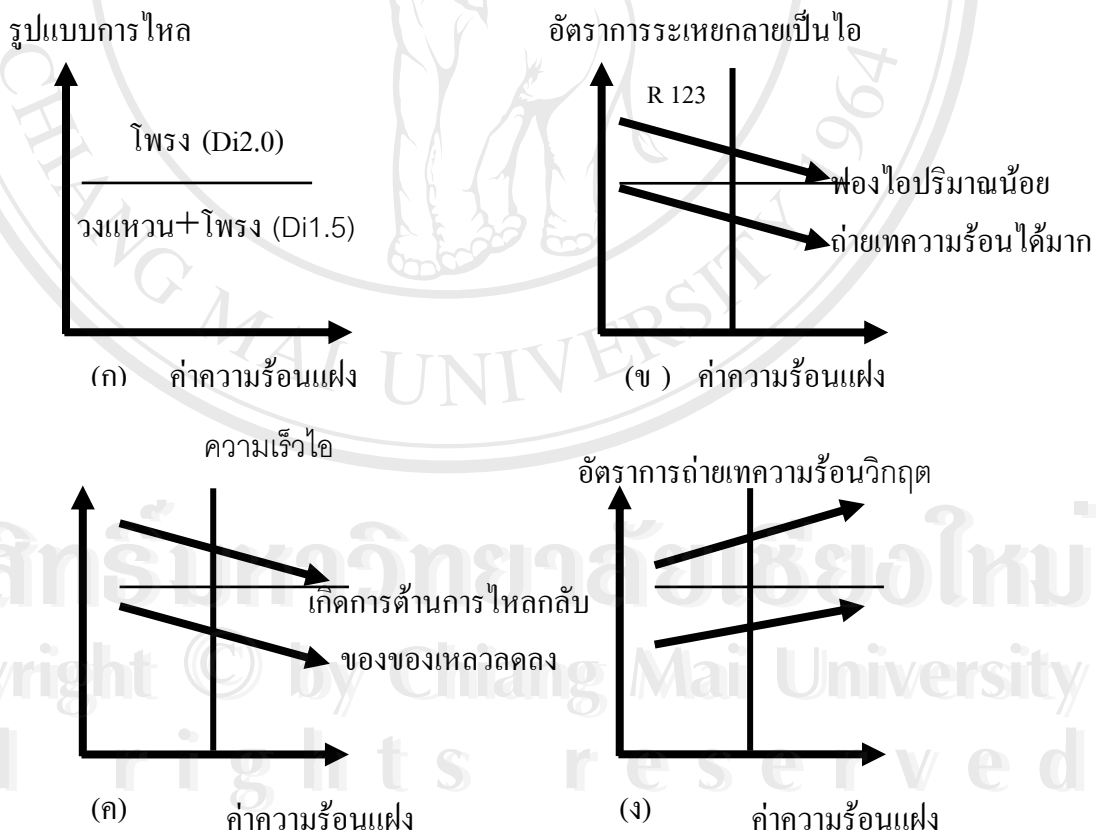
เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนขึ้นไปอีก จะเริ่มมีจำนวนของฟองไอน้ำขนาดเล็กที่เกิดจากการเดือดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ความเร็วของฟองไอน้ำเพิ่มขึ้น และมีการรวมตัวของฟองไอเกิดขึ้นบ้างในบางครั้ง ความเร็วที่เพิ่มขึ้น และการรวมตัวของฟองไอส่งผลทำให้เริ่มมีการบิดเบี้ยวของฟองไอเกิดขึ้น รูปแบบการไหลส่วนใหญ่จึงเป็นแบบสลัก และแบบโพรงเกิดขึ้นร่วมกัน จนกระทั่งที่อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนเป็น 100 องศาเซลเซียสจึงเริ่มเกิดการท่วมแบบชั่วคราวขึ้นโดยการรวมตัวของฟองไอ และการดันคลื่นของเหลวของไอ ทำให้อ่างเหลวมีการท่วมอยู่ที่บริเวณด้านบนของส่วนทำระเหยโดยต่ำกว่าปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมา 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 4.9(ค) โดยมีระยะเวลาการเกิดปรากฏการณ์การท่วมนานประมาณ 0.15-0.60 วินาทีต่อครั้ง และเกิดขึ้นด้วยความถี่ประมาณ 0.75-1.50 ครั้งต่อวินาที

หลังจากเกิดสภาวะวิกฤตแล้ว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนขึ้นไปอีกจนถึง 130 องศาเซลเซียส การแห้งจะขยายตัวลงสู่ด้านล่างเป็นช่วงยาวขึ้น และมีระยะเวลาการเกิดปรากฏการณ์การท่วมนานขึ้น ดังแสดงในรูป 4.9 (ง)

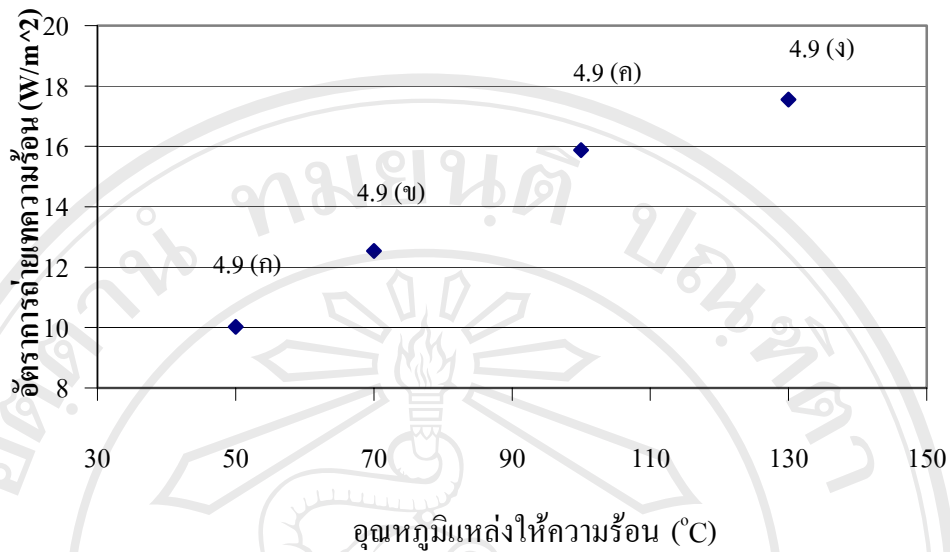
รูป 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่สภาวะวิกฤต เมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดเพิ่มขึ้น รูปแบบการ

ไหลภายในที่สภาวะวิกฤตไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะใช้ MP 39 หรือ HP 62 เป็นสารทำงาน รูปแบบการไหลที่สภาวะวิกฤตยังคงเป็น แบบสลัก และแบบโพรงร่วมกัน แต่เนื่องจากเมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการระเหยกลายเป็นไอของของเหลวลดลง เนื่องจากฟองไอลปริมาณน้อยสามารถถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า จึงทำให้ความเร็วของไอมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นจึงทำให้การต้านทานการไหลกลับของของเหลวลดลง และเกิดการท่วมได้ยาก ส่งผลให้มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตที่สูงขึ้น

รูป 4.10 แสดงข้อมูลจากการทดลองของ Katpradit et al. ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และอัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤต ของท่อความร้อนแบบสันที่ทำมาจากท่อทองแดง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.03 มิลลิเมตร จำนวนโค้งเลี้ยว 5 โค้งเลี้ยว ใช้ R123 เอทานอล และ น้ำ เป็นสารทำงาน พบว่าเมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.10

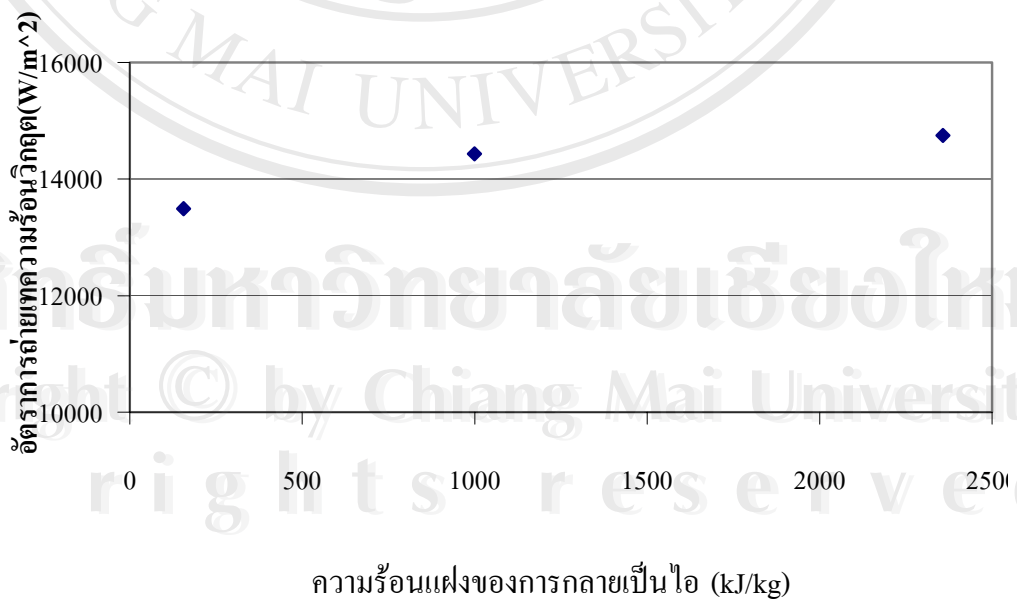


รูป 4.10 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น กับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่สภาวะวิกฤต



รูป 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่ใช้ทดสอบ ซึ่งสัมพันธ์กับรูปแบบการไหลในรูป 4.9

รูป 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร ใช้ HP 62 เป็นสารทำงาน ซึ่งอัตราความร้อนในแต่ละจุดสัมพันธ์กับรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันปลายปิดในรูป 4.9(ก), 4.9(ข), 4.9(ค) และ 4.9(ง) ตามลำดับ



รูป 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงาน และอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิดจากการทดลองของ Katpradit et al.

จากการทดลองพบว่าสาเหตุของการเกิดการแห้งของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่ใช้สาร MP39 และ HP62 เป็นสารทำงานที่มุม 60 องศาเกิดจากปรากฏการณ์การท่วมโดยสาร MP39 จะเกิดการท่วมต่ำกว่าปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมา 27 มิลลิเมตร ส่วนสาร HP62 จะเกิดการท่วมต่ำกว่าปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมา 25 มิลลิเมตร แสดงว่าสารทำงานไม่มีผลต่อตำแหน่งการท่วมเมื่อค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำเพิ่มขึ้น รูปแบบการไหลที่สภาวะวิกฤตไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะมีอัตราการระเหยกลายเป็นไอของฟิล์มของเหลวลดลงที่อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากัน จึงทำให้เกิดสภาวะวิกฤตได้ยากกว่าทำให้อัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองของ Katpradit et al. พบว่าผลการทดลองทั้งสองมีความสอดคล้องกัน

#### 4.1.4 ผลของมุมเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่สภาวะวิกฤต

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของมุมเอียง ที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่สภาวะวิกฤต โดยใช้ข้อมูลการทดลองของท่อความร้อนแบบสั้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตรและ 10 โค้งเลี้ยวโดยใช้สารทำงานเป็น HP62 เนื่องจากสามารถเห็นปรากฏการณ์การไหลภายในท่อความร้อนแบบสั้นที่สภาวะวิกฤตได้อย่างชัดเจนทำการเปรียบเทียบมุมเอียงออกเป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 มุมเอียงระหว่าง 0 องศา ช่วงที่ 2 มุมเอียงระหว่าง 60 องศา ช่วงที่ 3 มุมเอียงระหว่าง 90 องศา วัดจากแนวระดับ โดยแสดงผลเป็นก่อนสภาวะวิกฤต สภาวะวิกฤตและหลังสภาวะวิกฤต จากผลการทดลองแสดงด้วยรูป 4.13 – รูป 4.15 แสดงขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด

ที่มุมเอียง 0 องศาเมื่อให้ความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนเป็น 50 องศาเซลเซียส ภายในส่วนทำระเหยจะมีเฉพาะฟองไออยู่จะไม่มีแท่งของเหลวบรรจุอยู่เนื่องจากส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นอยู่ในระดับเดียวกันทำให้ตัดผลของแรงโน้มถ่วงของโลกออกไป แท่งของเหลวจะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ส่วนควบแน่นเนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำกว่าส่วนทำระเหย ฟองไอที่อยู่ในส่วนทำระเหยจะดันการเคลื่อนที่ของแท่งของเหลวที่จะมาที่ส่วนทำระเหยจะมีลักษณะเช่นนี้ในทุกโค้งเลี้ยวดังแสดงในรูป 4.13(ก)

ที่มุมเอียง 10 องศา สังเกตเห็นการเดือดแบบฟองเกิดขึ้นที่บริเวณโค้งเลี้ยวในส่วนทำระเหยเป็นฟองไอที่มีขนาดเล็กโดยมีจุดกำเนิดฟองบริเวณกึ่งกลางโค้งเลี้ยว ฟองไอจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนควบแน่นในขณะที่เคลื่อนที่นั้นจะมีการรวมตัวกันเป็นฟองไอที่ยาวขึ้นและในขณะที่เดียวกันฟองไอที่มีขนาดเล็กนั้นจะเกิดการขยายตัวทำให้มีขนาดฟองที่ยาวขึ้นเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของท่อที่มีขนาดเล็กจึงทำให้ฟองไอที่เกิดขึ้นมีการขยายตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดอย่างรวดเร็ว รูปแบบการไหลใน

ส่วนทำระเหยส่วนใหญ่เป็นแบบฟองไอ และแบบสลักที่เกิดขึ้นร่วมกัน ฟองไอจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนควบแน่นทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของโค้งเดี่ยวเนื่องจากปริมาณความร้อนที่ให้กับส่วนทำระเหยยังไม่มาก ดังนั้นความเร็วของฟองไอยังไม่สูงมากทำให้การเคลื่อนที่ของฟองไอเป็นการเคลื่อนที่แบบตามกันดังแสดงในรูป 4.13(ข) โดยที่อุณหภูมินี้ฟองไอจะมีความเร็วเฉลี่ย 0.25 เมตร/วินาที และความยาวเฉลี่ยของฟองไอเป็น 28 มิลลิเมตร

ที่มุมเอียง 60 องศา การเดือดแบบฟองที่เกิดขึ้นที่บริเวณโค้งเดี่ยวในส่วนทำระเหย เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของท่อที่มีขนาดเล็กจึงทำให้ฟองไอที่เกิดขึ้นมีการขยายตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงเคลื่อนที่ขึ้นพร้อมทั้งมีการขยายตัวทำให้ความยาวของฟองไอเพิ่มขึ้นในบริเวณส่วนทำระเหย รูปแบบการไหลในส่วนทำระเหยส่วนใหญ่เป็นแบบฟองไอ และแบบสลักที่เกิดขึ้นร่วมกัน ฟองไอจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนควบแน่นทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของโค้งเดี่ยวเนื่องจากปริมาณความร้อนที่ให้กับส่วนทำระเหยยังไม่มาก ดังนั้นความเร็วของฟองไอยังไม่สูงมากทำให้การเคลื่อนที่ของฟองไอเป็นการเคลื่อนที่แบบตามกันดังแสดงในรูป 4.13(ค) โดยที่อุณหภูมินี้ฟองไอจะมีความเร็วเฉลี่ย 0.28 เมตร/วินาที และความยาวเฉลี่ยของฟองไอเป็น 30 มิลลิเมตร

ในช่วงมุมเอียงอยู่ที่ 90 องศาจะเกิดการเดือดแบบฟองขึ้นที่บริเวณโค้งเดี่ยวโดยฟองไอที่เกิดขึ้นจะเกิดการขยายตัวและรวมตัวกับฟองอื่นและเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนควบแน่นแต่เป็นไปในลักษณะที่ช้า รูปแบบการไหลในส่วนทำระเหยส่วนใหญ่เป็นแบบฟองไอ และแบบสลักดังแสดงในรูป 4.13(ง) จะมีความเร็วเฉลี่ย 0.25 เมตร/วินาที และความยาวเฉลี่ยของฟองไอเป็น 30 มิลลิเมตร

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนขึ้นเป็น 70 องศาเซลเซียสจนถึงสถานะคงที่ ผลของมุมเอียง 0 องศา แท่งของเหลวจะอยู่ที่ส่วนควบแน่นและฟองไอจะอยู่ที่ส่วนทำระเหยตลอดทุกโค้งเดี่ยวแต่ขนาดความยาวของฟองจะมีขนาดยาวกว่าที่อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนเป็น 50 องศาเซลเซียสที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากฟองไอได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการขยายตัวแต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นอยู่ในระดับเดียวกันฟองไอที่ได้รับความร้อนที่ส่วนทำระเหยจะดันการเคลื่อนที่ของแท่งของเหลวที่จะมาที่ส่วนทำระเหย ทำให้แท่งของเหลวไม่สามารถเคลื่อนที่มาที่ส่วนทำระเหยได้ดังแสดงในรูป 4.14(ก)

ที่มุมเอียง 10 องศาจำนวนของฟองไอที่เกิดจากการเดือดบริเวณโค้งเดี่ยวจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ความเร็วของฟองไอจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องถ่ายเทความร้อนด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้น ทำให้ฟองไอจะเกิดการรวมตัวกันและมีการแยกออกจากกัน รูปแบบการไหลส่วนใหญ่จึงยังคงเป็นแบบโพรง และแบบสลักโดยมีการไหลแบบวงแหวนเกิดขึ้นบ้างเป็นบางครั้งดังแสดงในรูป 4.14(ข) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 70 องศาเซลเซียส และมีความยาวเฉลี่ยที่ลดลงเนื่องจากระยะเวลาในการขยายตัวที่ส่วนทำระเหยลดลงและจำนวนฟองไอที่รับ

ความร้อนมีเพิ่มขึ้นในบางครั้งที่ฟองไอมีการแยกออกจากกันจะกลายเป็นลักษณะของคลื่นของเหลวที่ปลายคลื่นและอยู่บริเวณผนังท่อซึ่งเป็นสาเหตุให้ฟิล์มของเหลวที่เคลื่อนที่จากส่วนควมแน่นมาที่ส่วนทำระเหยเกิดการไหลสวนทางกับฟองไอที่เคลื่อนที่ไปที่ส่วนควมแน่นทำให้เกิดการท่วมขึ้นฟิล์มของเหลวที่อยู่ด้านล่างจุดที่เกิดจากการท่วมจะบางลงทำให้บริเวณส่วนทำระเหยมีของเหลวลดลงเป็นสาเหตุให้ไม่เพียงพอต่อการส่งถ่ายความร้อนจากอัตราความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดสภาวะวิกฤตขึ้นทำให้ของเหลวมีการท่วมอยู่ที่บริเวณต่ำกว่าปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมา 25 มิลลิเมตร โดยมีความเร็วเฉลี่ยของฟองไอเพิ่มขึ้นเป็น 0.28 เมตร/วินาที และความยาวเฉลี่ยของฟองไอลดลงเป็น 24 มิลลิเมตร

ที่มุมเอียง 60 องศาจำนวนของฟองไอที่เกิดจากการเดือดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ความเร็วของฟองไอจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องถ่ายเทความร้อนด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้น และมีความยาวเฉลี่ยที่ลดลงเนื่องจากระยะเวลาในการขยายตัวที่ส่วนทำระเหยลดลงและจำนวนฟองไอที่รับความร้อนมีเพิ่มขึ้น ขนาดของสะพานของเหลวที่กั้นระหว่างฟองไอเริ่มบางลง และในบางครั้งมีการขาดออกจากกันจนกลายเป็นลักษณะของคลื่นของเหลวที่ปลายคลื่นและอยู่บริเวณผนังท่อด้านที่ให้ความร้อน รูปแบบการไหลส่วนใหญ่จึงยังคงเป็นแบบโพรง และแบบสลักโดยมีการไหลแบบวงแหวนเกิดขึ้นบ้างเป็นบางครั้ง ดังแสดงในรูป 4.14(ค) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 70 องศาเซลเซียส โดยมีความเร็วเฉลี่ยของฟองไอเพิ่มขึ้นเป็น 0.38 เมตร/วินาที และความยาวเฉลี่ยของฟองไอลดลงเป็น 20 มิลลิเมตร

ที่มุมเอียง 90 องศาอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 70 องศาเซลเซียส จะเกิดการเดือดแบบฟองขึ้นที่ส่วนของโค้งเล็กน้อยจำนวนของฟองไอขนาดเล็กที่เกิดจากการเดือดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ความเร็วของฟองไอมีค่าเพิ่มขึ้น และมีการรวมตัวกันของฟองไอเกิดขึ้นบ้างในบางครั้ง ความเร็วที่เพิ่มขึ้นและการรวมตัวของฟองไอส่งผลทำให้เริ่มมีการบิดเบี้ยวของฟองไอเกิดขึ้น รูปแบบการไหลส่วนใหญ่จึงเป็นแบบสลักและแบบโพรงเกิดขึ้นร่วมกัน เริ่มเกิดการท่วมแบบชั่วคราวขึ้นโดยการรวมตัวของฟองไอ และการดันคลื่นของเหลวของไอ ทำให้ของเหลวมีการท่วมอยู่ที่บริเวณด้านบนของส่วนทำระเหย ดังแสดงในรูป 4.14(ง) โดยมีระยะเวลาการเกิดปรากฏการณ์การท่วมนานประมาณ 0.10-0.65 วินาที/ครั้ง และเกิดขึ้นด้วยความถี่ประมาณ 0.5-1.20 ครั้ง/วินาที

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนขึ้นไปอีกเป็น 100 องศาเซลเซียส ผลของมุมเอียง ที่ 0 องศา ฟองไอจะถ่ายเทความร้อนให้กับแท่งของเหลวทำให้อุณหภูมิของฟองไอลดลงทำให้แรงดันการเคลื่อนที่ของแท่งของเหลวลดลงทำให้ แท่งของเหลวที่อยู่ที่ส่วนควมแน่นจะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาที่ส่วนทำระเหยได้เป็นบางครั้งและเกิดการเดือดที่รุนแรงฟองไอสามารถเคลื่อนที่ข้ามโค้งแล้วไปด้านใดด้านหนึ่งแต่จะเกิดเพียงในระยะเวลาที่สั้น ๆ เท่านั้น หลังจากนั้นที่ส่วนทำระเหยก็

เป็นฟองไอส่วนควบแน่นก็จะเป็นแท่งของเหลวเหมือนเดิมโดยเป็นเช่นนี้ทุกโค้งเลี้ยวดังแสดงในรูป 4.15 (ก)

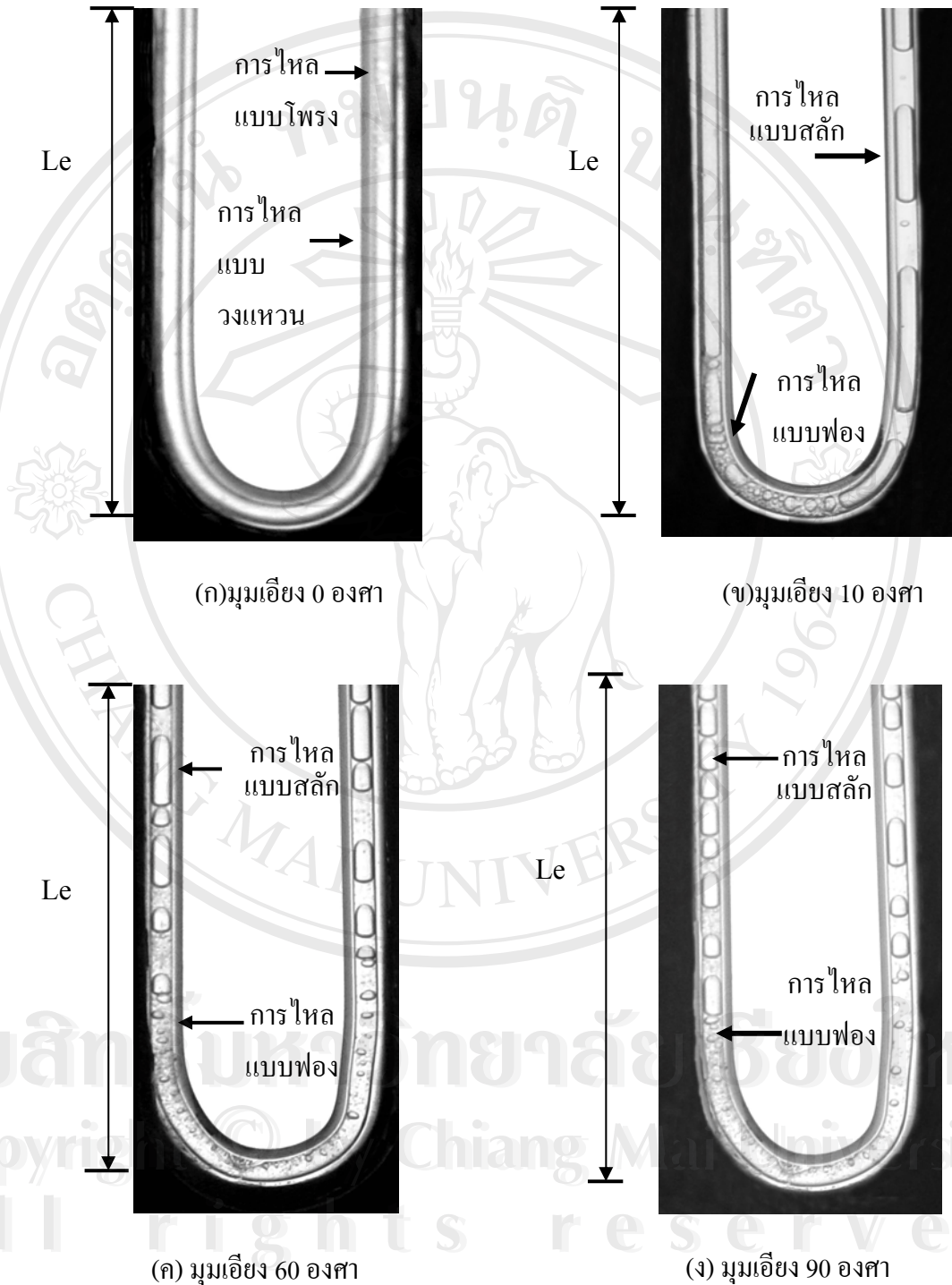
ที่มุมเอียง 10 องศา เมื่ออุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอีก รูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงไปดังนี้ การเดือดแบบฟองเกิดขึ้นที่ส่วนด้านล่างของส่วนทำระเหยการเดือดจะมีความรุนแรงมากขึ้นฟองไอจะมีการรวมตัวกันและฟองไอที่มีอยู่เดิมแล้วจะเกิดการขยายตัวเป็นฟองไอที่ใหญ่และยาวขึ้น และเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนควบแน่นซึ่งจะเกิดการไหลสวนทางกับฟิล์มของเหลวที่เคลื่อนที่จากส่วนควบแน่นลงมาที่ส่วนทำระเหยทำให้เกิดคลื่นที่ผิวหน้าของฟิล์มของเหลวด้านการเคลื่อนที่ลงของฟิล์มทำให้เกิดปรากฏการณ์ท่วมขึ้นทำให้ ของเหลวส่วนใหญ่จะถูกดันไว้ให้ท่วมอยู่ที่ประมาณกึ่งกลางและต่ำลงมาด้านล่างของส่วนทำระเหย ดังแสดงในรูป 4.15(ข) รูปแบบการไหลส่วนใหญ่เป็นแบบวงแหวน

ที่มุมเอียง 60 องศา อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส ฟองไอที่เกิดขึ้นที่ส่วนทำระเหยจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็วทำให้สะพานของเหลวที่กั้นระหว่างฟองไอขาดจากกัน และเกิดคลื่นขึ้นที่ผิวของเหลว เมื่อความเร็วไอในฟองไอมีค่าสูงพอจะทำให้คลื่นของเหลวถูกดันไว้ที่ด้านบนจนเกิดการขาดช่วงของฟิล์มของเหลว และเกิดการแห้งแบบชั่วคราวขึ้น รวมทั้งมีของเหลวจำนวนหนึ่งท่วมอยู่เหนือบริเวณที่เกิดการแห้งนั้นโดยต่ำกว่าปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมา 15 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป 4.15(ค) ซึ่งเป็นรูปที่อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนเป็น 100 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมินี้การแห้งจะเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาประมาณ 0.15-0.75 วินาที/ครั้ง และมีความถี่ของการเกิดปรากฏการณ์การท่วมประมาณ 0.65-1.50 ครั้ง/วินาที

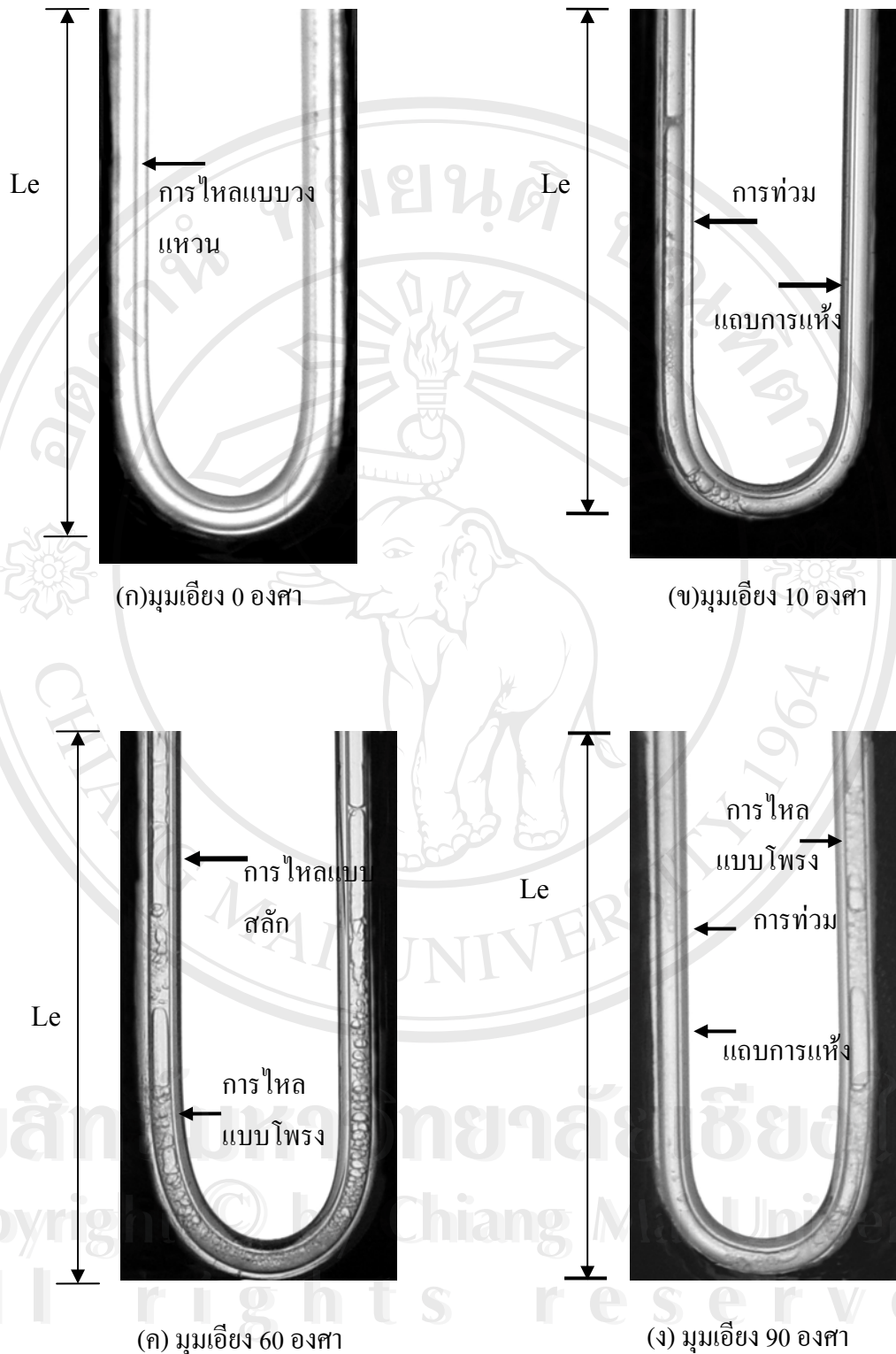
ที่มุมเอียง 90 องศา อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียสเมื่ออัตราความร้อนเพิ่มขึ้นรูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงไปดังนี้ การเดือดแบบฟองเกิดขึ้นที่ส่วนด้านล่างของส่วนทำระเหยการเดือดจะมีความรุนแรงมากขึ้นฟองไอจะมีการรวมตัวกันเป็นฟองไอที่ใหญ่ขึ้น และเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนควบแน่นซึ่งจะเกิดการไหลสวนทางกับฟิล์มของเหลวที่เคลื่อนที่จากส่วนควบแน่นลงมาที่ส่วนทำระเหยทำให้เกิดคลื่นที่ผิวหน้าของฟิล์มของเหลวด้านการเคลื่อนที่ลงของฟิล์มปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นชั่วคราวเท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราความร้อนมากขึ้นการท่วมจะเกิดขึ้น และการแห้งมีการขยายตัวลงสู่ด้านล่างเกือบตลอดความยาวส่วนทำระเหยของท่อโดยจะมีของเหลวบางส่วนค้างอยู่ที่โค้งเลี้ยวด้านล่างของส่วนทำระเหย และมีคลื่นของเหลวเกิดขึ้นที่ฟิล์มของเหลวซึ่งไหลลงมาตามผนังท่อด้านที่ไม่ได้รับความร้อน ในบางครั้งฟิล์มของเหลวนี้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนหัวคลื่นมาแตะผนังท่อส่วนที่เกิดการแห้ง แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นเป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆเท่านั้น ของเหลวส่วนใหญ่จะถูกดันไว้ให้ท่วมอยู่ที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหย ดัง



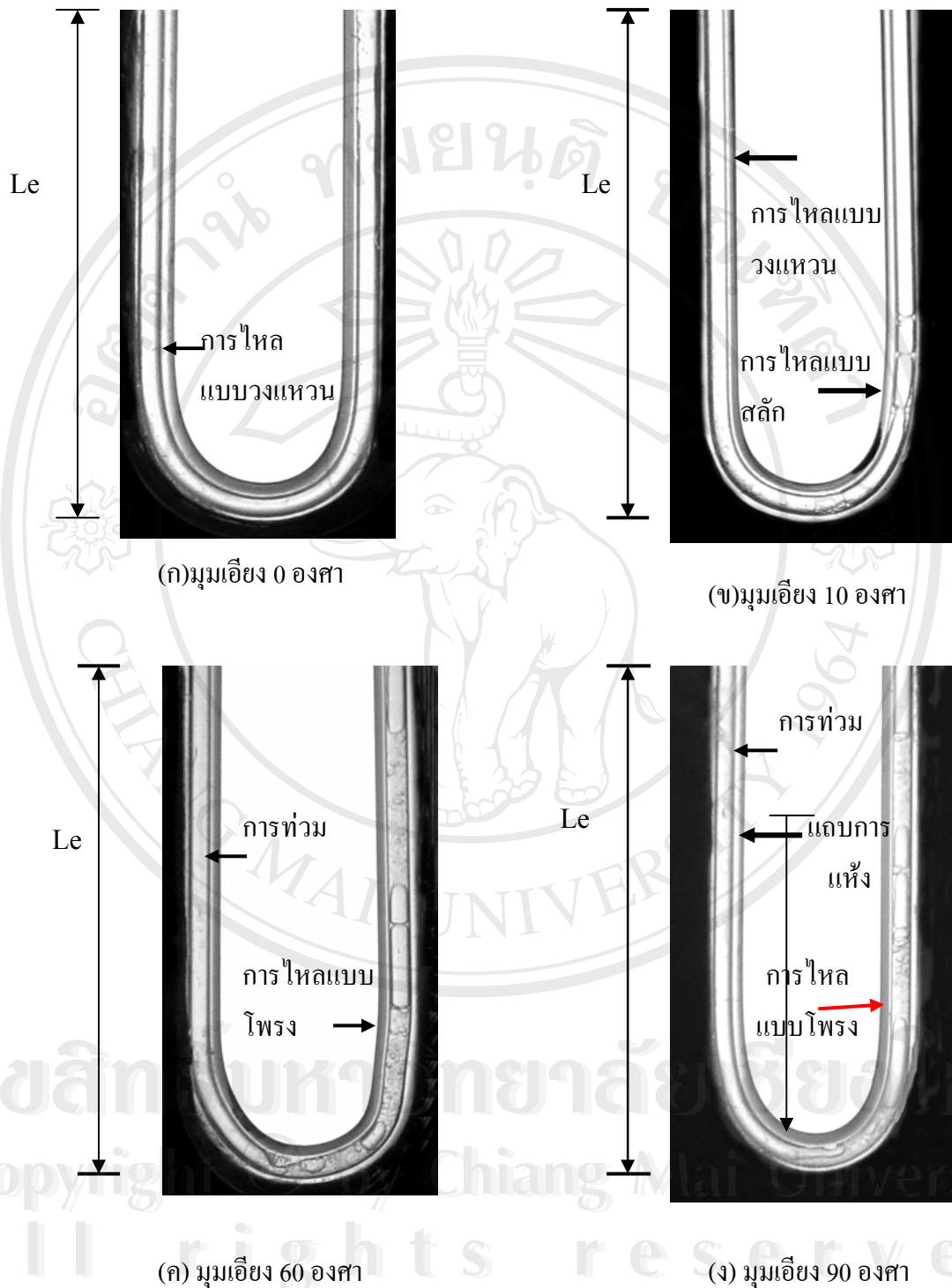
แสดงในรูป 4.15(ง) ทำให้ของเหลวมีการท่วมอยู่ที่บริเวณด้านบนของส่วนทำระเหยโดยต่ำกว่าปากทางเข้าส่วนทำระเหยลงมา 15 มิลลิเมตร



รูป 4.13 ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร ก่อนสภาวะวิกฤติ สารทำงานเป็น HP62



รูป 4.14 ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตรที่สภาวะวิกฤต สารทำงานเป็น HP62

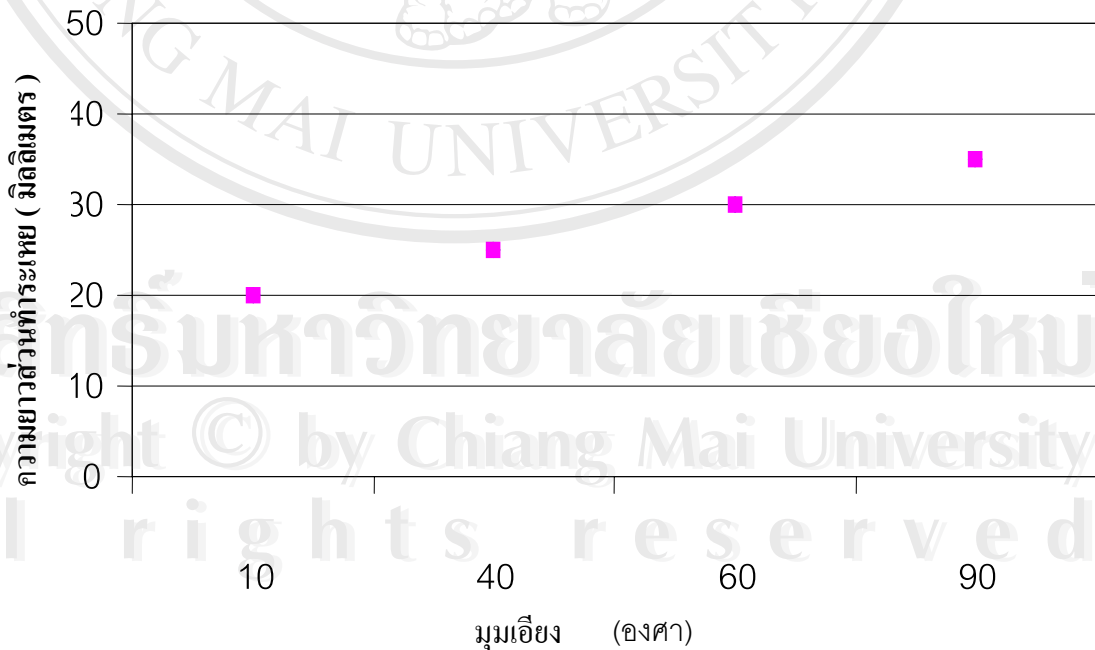


รูป 4.15 ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร หลังสภาวะวิกฤติ สารทำงานเป็น HP62

ตาราง 4.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงที่เปลี่ยนไป กับปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นของท่อความร้อนตามรูป 4.13 (ค)– รูป 4.14 (ค) โดยที่รูปแบบการไหลที่สภาวะวิกฤตเมื่อขนาดมุมเอียงที่เปลี่ยนไปนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบวงแหวน และแบบ โพรง ไปเป็นการไหลแบบโพรงเพียงอย่างเดียว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลดังกล่าวจะส่งผลทำให้ความเร็วของไอน้ำค่าลดลง เมื่อความเร็วไหลลดลงจะส่งผลให้ความถี่ในการรวมตัวของฟองไอน้ำค่าลดลงด้วย ซึ่งจะทำให้โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์การท่วมได้ยากขึ้น ดังนั้นอัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตจึงมีค่าเพิ่มเมื่อมุมเอียงอยู่ระหว่าง 60 องศา ดังรูป 4.16

รูป	$T_v$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Flow pattern	$q$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$V_{\text{bubble}}$ (m/s)	$L_{\text{bubble}}$ (mm)
4.13 (ค)	50	Annular+Slug	11.74	0.28	30
14.14 (ค)	70	Annular+Slug/Churn	18.94	0.38	20
14.15 (ค)	100	Annular+Churn	27.30	-	-

ตาราง 4.1 ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร มุม 60 องศา สารทำงานเป็น HP62



รูป 4.16 ขั้นตอนการเกิดการท่วมของท่อความร้อนแบบสันปลายปิด ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 มิลลิเมตร มุม 10 - 90 องศา สารทำงานเป็น HP62

จากการทดลองพบว่า สาเหตุของการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดที่มุมเอียงเปลี่ยนไป เกิดจากการท่วมเนื่องจากการไหลสวนทางกันของไอที่ระเหยตัวจากส่วนทำระเหยที่เคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนควบแน่นและการไหลลงของฟิล์มของเหลวจากส่วนควบแน่นมาสู่ส่วนทำระเหย โดยการท่วมนั้นจะเริ่มเกิดขึ้นที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหย ที่มุมเอียง 90 องศาจะเกิดการท่วมที่ตำแหน่งต่ำกว่าปากทางเข้าของส่วนทำระเหยลงมา 15 มิลลิเมตรและที่มุมเอียง 60 องศาตำแหน่งที่เกิดการท่วมอยู่ต่ำกว่าปากทางเข้าของส่วนทำระเหยลงมา 20 มิลลิเมตร มุมเอียง 40 องศาตำแหน่งที่เกิดการท่วมอยู่ต่ำกว่าปากทางเข้าของส่วนทำระเหยลงมา 25 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าเมื่อมุมเอียงลดลงจาก 90 องศาเป็น 40 องศาระยะเวลาเกิดการท่วมจะลดลงจาก 15 มิลลิเมตรเป็น 25 มิลลิเมตรเนื่องจากฟิล์มของเหลวจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้น และการแห้งนั้นจะเกิดขึ้นด้านล่างของบริเวณที่เกิดการท่วมนั้น โดยที่มุมเอียง 60 องศา รูปแบบการไหลจะเป็นแบบวงแหวน และแบบโพรง ซึ่งจะส่งผลให้ความหนาของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการส่งถ่ายความร้อนวิกฤตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับมุมเอียง 90 องศา ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมุมเอียงเปลี่ยนไปความหนาของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราการถ่ายเท ความร้อนวิกฤตมีค่าสูงขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved