

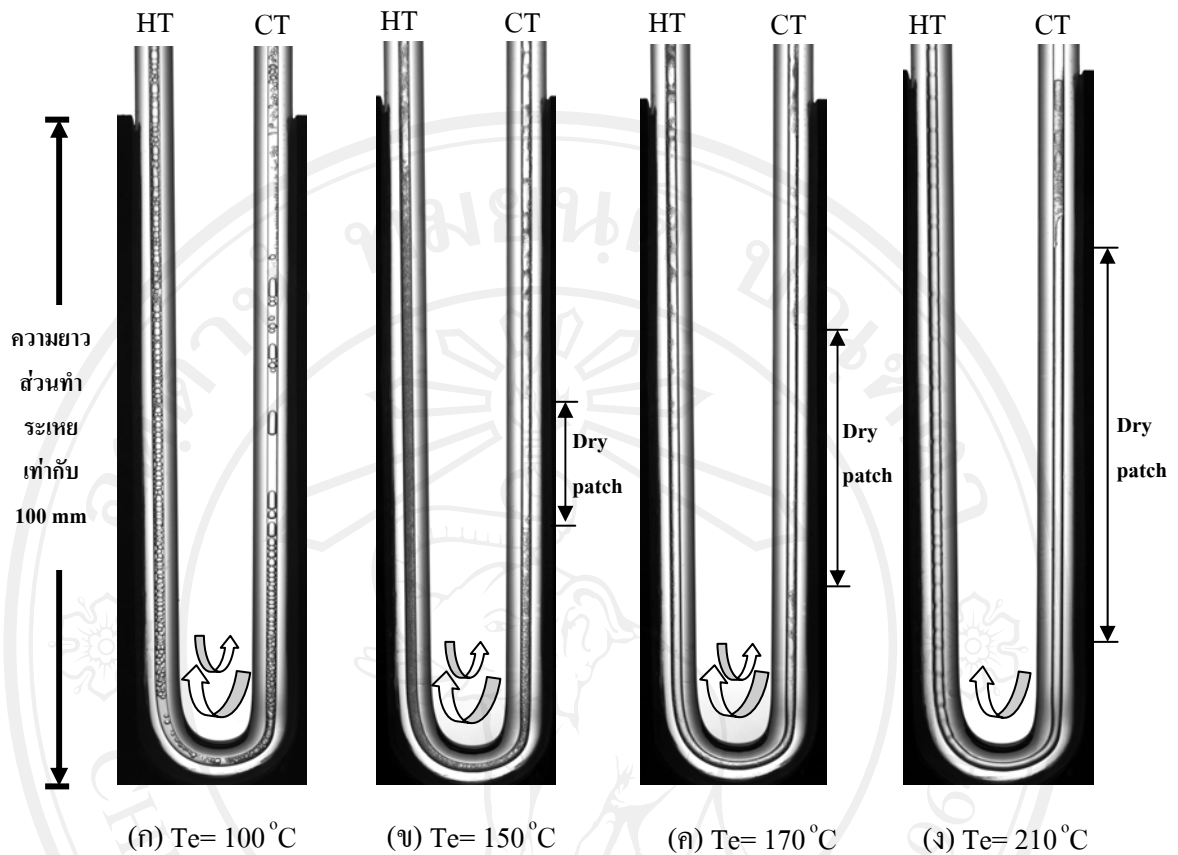
บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการไหลภายในที่เกิดขึ้นภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ โดยเริ่มจากสถานะที่ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเริ่มทำงานจนกระทั่งถึงสถานะหลังการส่งถ่ายความร้อนสูงสุด ได้ทำการทดลองโดยใช้ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.2 mm ความยาวส่วนทำระเหย 100 mm และที่มุมเอียงการทำงาน 90° โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลองแต่ละสถานะนั้นได้นำรูปที่บันทึกจากกล้องถ่ายภาพนิ่งแบบดิจิทัลมาแสดงรูปแบบการไหลในแต่ละสถานะการทำงาน ซึ่งจะแสดงเฉพาะส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเท่านั้น เนื่องจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่นำไปสู่การเกิดขึ้นของสถานะวิกฤตนั้นเกิดขึ้นที่ส่วนทำระเหย

4.1 ลำดับการเกิดสถานะวิกฤตของ CLOHP ที่ใช้สารทำงาน MP39

จากการศึกษาท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงาน MP39 พบว่าท่อความร้อนที่มีจำนวนโค้งเลี้ยวเท่ากับ 2 และ 5 โค้งเลี้ยว มีรูปแบบการไหลภายในตั้งแต่สถานะการทำงานปกติจนกระทั่งถึงสถานะหลังการส่งถ่ายความร้อนสูงสุดคล้ายกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลของสารทำงานผสมจำนวน 2 โค้งเลี้ยว เนื่องจากปรากฏการณ์ภายในของจำนวนโค้งเลี้ยวดังกล่าวสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลภายในตั้งแต่สถานะการทำงานปกติจนกระทั่งถึงสถานะหลังการส่งถ่ายความร้อนสูงสุดได้อย่างชัดเจน โดยภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่สถานะปกติ สามารถสังเกตเห็นสารทำงานผสมจัดเรียงตัวกันเป็นแบบแท่งของเหลวสลับกับฟองไอน์ตลอดความยาวท่อ เมื่อเริ่มให้ความร้อนก็จะเกิดการเคลื่อนที่พยายามไหลเวียนเป็นวงรอบ หากพิจารณาการเคลื่อนที่ ณ โค้งเลี้ยวใดโค้งเลี้ยวหนึ่ง (ประกอบด้วยท่อ 2 ท่อ) พบว่ามีท่อหนึ่งเป็นท่อที่ของเหลวเคลื่อนตัวจากส่วนควบแน่นกลับมายังส่วนทำระเหยและสารทำงานสถานะไอเคลื่อนที่ไปส่วนควบแน่นในอีกท่อหนึ่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ส่วนกันความร้อนของทั้ง 2 ท่อ พบว่าอุณหภูมิส่วนกันความร้อนแตกต่างกันเล็กน้อยคือ 42°C และ 45°C ตามลำดับ โดยในโค้งเลี้ยวเดียวกันนั้นจะเรียกท่อที่มีอุณหภูมิส่วนกันความร้อนต่ำกว่า ท่อเย็น (Cold tube ; CT) และท่อที่มีอุณหภูมิการทำงานสูงจะเรียกว่า ท่อร้อน (Hot tube ; HT) โดยจะเริ่มทำการวิเคราะห์ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงาน MP39 ที่จำนวน 2 โค้งเลี้ยว แสดงในรูปแบบที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 และ 4.2



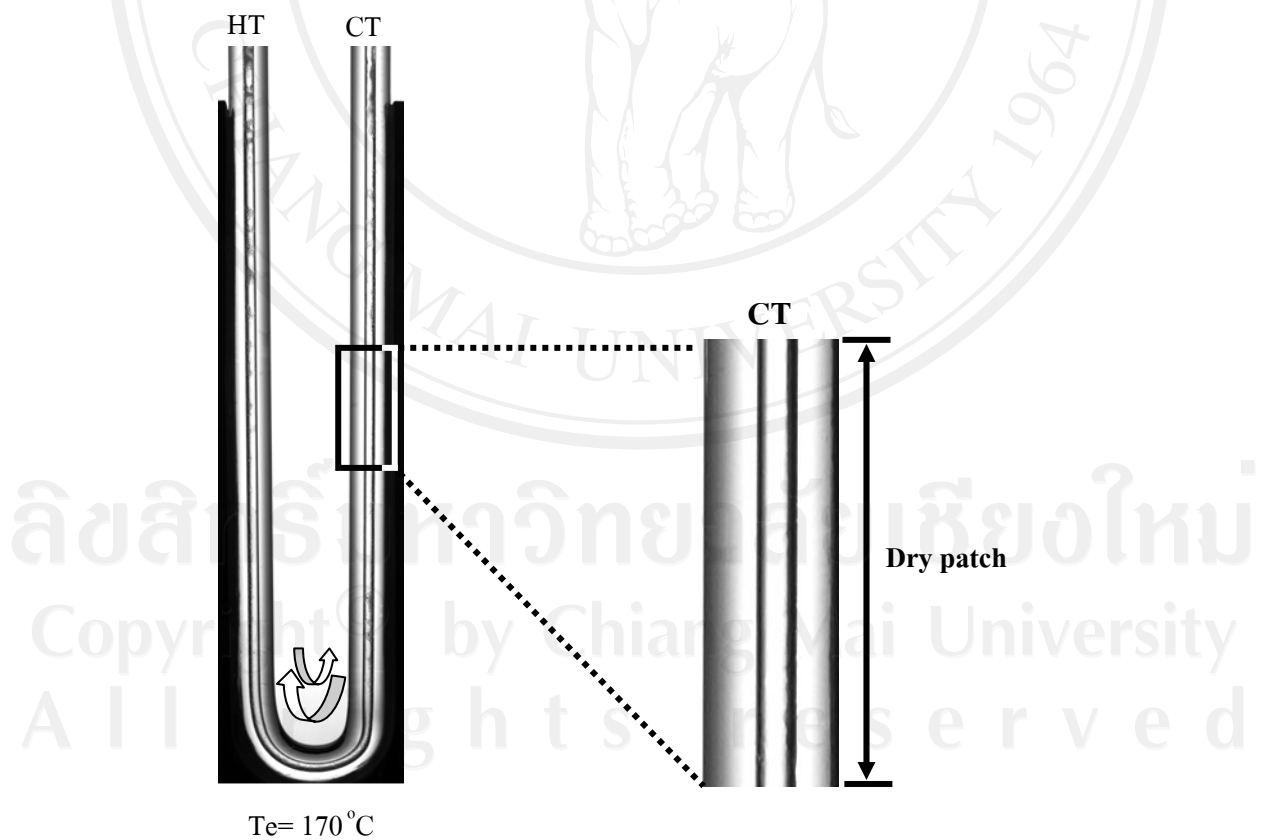
รูปที่ 4.1 ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเดี่ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน

ตารางที่ 4.1 รูปแบบการไหลภายในแต่ละสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเดี่ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน (ขนาดของลูกศรแสดงความถี่ในการไหล)

สภาวะการทำงาน	รูปย่อ	อุณหภูมิ ส่วนทำระเหย ($^{\circ}\text{C}$)	% ของรูปแบบการไหลภายในที่ปรากฏ		
			แบบฟอง	แบบก้อน	แบบวงแหวน
ปกติ	ก	100	55.90	29.02	15.08
เริ่มวิกฤต	ข	150	53.20	2.36	44.44
วิกฤต	ค	170	45.88	1.64	52.48
หลังวิกฤต	ง	210	10.36	1.20	88.44

ตารางที่ 4.2 ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบจำนวน 2 โค้งเดี่ยว
เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน

สภาวะการทำงาน	รูปย่อย	อุณหภูมิส่วนทำระเหย (°C)	รูปแบบการไหลภายใน	คาบตามเข็มนาฬิกา (s)	คาบทวนเข็มนาฬิกา (s)	ความยาวแถบการแห้ง (cm)	ความถี่แถบการแห้ง (Hz)	q (W/m ²)
ปกติ	ก	100	ฟอง+ก้อน	0.96	0.65	-	-	1,009
เริ่มวิกฤต	ข	150	ฟอง+วงแหวน	0.97	0.52	3.2	0.39	2,717
วิกฤต	ค	170	วงแหวน+ฟอง	0.66	0.42	4.4	0.86	2,687
หลังวิกฤต	ง	210	วงแหวน+ฟอง	ตลอดเวลา	-	5.6	3.05	2,641



รูปที่ 4.2 การเกิดแถบการแห้งที่สภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบจำนวน 2 โค้งเดี่ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน

จากรูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงาน MP39 จำนวน 2 โคน์งเดี่ยว ในแต่ละสภาวะการทำงานตั้งแต่สภาวะปกติจนกระทั่งถึงสภาวะหลังวิกฤต โดยถูกสรในรูปแสดงถึงทิศทางและความถี่ในการไหลของสารทำงาน ซึ่งในที่นี้ถูกสรใหญ่แสดงถึงทิศทางหลักของการเคลื่อนที่ และมีความถี่ในการเคลื่อนที่มากกว่า ส่วนถูกสรเล็กแสดงถึงทิศทางการไหลย้อนกลับของการเคลื่อนที่ จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิส่วนทำระเหยเท่ากับ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ รูปแบบการไหลภายในที่ส่วนทำระเหยส่วนใหญ่เป็นแบบฟอง (Bubble flow) สลับกับแบบก้อน (Slug flow) โดยหาค่าเฉลี่ยของรูปแบบการไหลภายในประมาณ 55.90 % และ 29.02 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 สารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเมื่อได้รับความร้อนก็เริ่มมีการไหลเวียนเปลี่ยนทิศทางไปมาตลอดเวลา โดยมีทิศทางเคลื่อนที่หลักในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.96 s และการเคลื่อนที่ย้อนกลับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.65 s ดังแสดงทิศทางเคลื่อนที่ในรูป 4.1(ก) และคาบการเคลื่อนที่จากตารางที่ 4.2 ซึ่งท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบสามารถส่งถ่ายความร้อนได้เท่ากับ $1,009\text{ W/m}^2$ และที่อุณหภูมิส่วนทำระเหยนี้ไม่พบแถบการแห้งจึงนิยามสภาวะการทำงานนี้ว่า สภาวะการทำงานปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก)

จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยจนถึง $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่ารูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบส่วนใหญ่เป็นแบบฟองและมีรูปแบบการไหลแบบวงแหวน (Annular flow) เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าเฉลี่ยของรูปแบบการไหลภายในประมาณ 53.20 % และ 44.44 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยเริ่มมีแนวโน้มการเคลื่อนที่ไปทิศทางเดียว แต่อย่างไรก็ตามยังสามารถสังเกตพบการไหลย้อนกลับในบางครั้ง กล่าวคือ มีทิศทางเคลื่อนที่หลักในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.97 s แต่ในบางครั้งก็พบการเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.52 s นอกจากนี้ยังเริ่มพบแถบการแห้งในบางครั้งของการเคลื่อนที่บริเวณกึ่งกลางท่อเย็นที่ส่วนทำระเหย ด้วยความถี่ของการเกิดแถบการแห้งเฉลี่ยประมาณ 0.39 Hz โดยที่สภาวะการทำงานนี้พบแถบการแห้งเป็นครั้งแรก และเกิดขึ้นเป็นครั้งแรก จึงเรียกว่าการแห้งแบบชั่วคราว ที่มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3.2 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่สภาวะการทำงานนี้ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบสามารถส่งถ่ายความร้อนได้สูงสุดประมาณ $2,717\text{ W/m}^2$ เนื่องจากสภาวะการทำงานนี้เป็นครั้งแรกที่เริ่มสังเกตเห็นแถบการแห้งเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข) โดยพบว่า % ของรูปแบบการไหลแบบวงแหวนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่ารูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวนเป็นรูปแบบการไหลภายในที่สารทำงานสถานะของเหลวมีลักษณะเป็นฟิล์มบางล้อมรอบลำไอที่เคลื่อนที่อยู่บริเวณกลางท่อ จึงส่งผลทำให้เมื่อรูปแบบการไหลแบบวงแหวนได้รับความร้อนอีกเพียงเล็กน้อยฟิล์มบางดังกล่าว จะเกิดระเหย

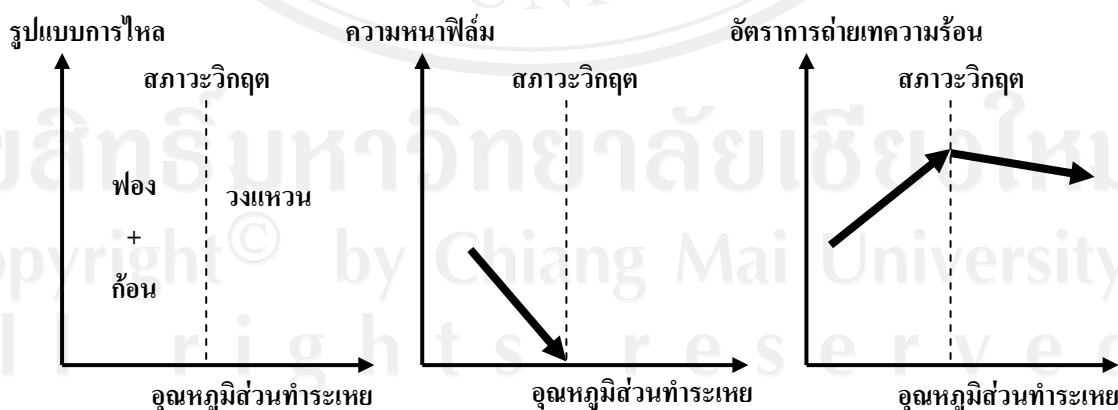
กลายเป็นไอ ซึ่งปรากฏการณ์นี้นำไปสู่การเกิดแถบการแห้ง ดังนั้นที่ สภาวะการทำงานนี้จึงนิยามว่า สภาวะเริ่มวิกฤต ซึ่งมีสาเหตุการเกิดสภาวะวิกฤตจากปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์ม (Film drying)

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยจนถึง 170°C พบว่ารูปแบบการไหลภายในส่วนใหญ่ของ ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบยังคงเป็นแบบวงแหวนและแบบฟอง โดยมีค่าเฉลี่ยของรูปแบบ การไหลภายในประมาณ 52.48 % และ 45.88% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยภาพรวม แล้วพบว่ารูปแบบการไหลแบบวงแหวนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการไหลเวียนของสารทำงานมี แนวโน้มเคลื่อนที่ทางเดียวกัน ซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่หลักทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยคาบการ เคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.66 s แต่ในบางครั้งสามารถสังเกตพบการเคลื่อนที่ในทิศวนเข็มนาฬิกา ด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.42 s และที่สภาวะการทำงานนี้ยังคงสามารถพบแถบการ แห้งที่บริเวณกึ่งกลางของท่อเย็นในส่วนทำระเหย ด้วยความถี่ในการเกิดแถบการแห้งเฉลี่ย ประมาณ 0.86 Hz ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยแถบการแห้งที่สังเกตพบนั้นเป็นแบบชั่วคราวที่มีค่า ความยาวเฉลี่ยประมาณ 4.4 cm ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบสามารถส่งถ่ายความร้อน ประมาณ $2,687 \text{ W/m}^2$ โดยในภาพรวมพบว่าแนวโน้มของการเกิดรูปแบบการไหลแบบวงแหวน เพิ่มขึ้น และรูปแบบการไหลภายในดังกล่าวสามารถนำไปสู่การเกิดแถบการแห้งของท่อความร้อน แบบสันชนิดวงรอบ และเนื่องจากสภาวะการทำงานนี้สามารถสังเกตเห็นแถบการแห้งของท่อความร้อน แบบสันชนิดวงรอบด้วยความถี่ในการเกิดแถบการแห้งมากขึ้นจากสภาวะวิกฤตประมาณ 2.2 เท่า และมีแนวโน้มของความยาวในการเกิดแถบการแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การส่งถ่ายความร้อนมี แนวโน้มลดลง เนื่องจากท่อความร้อนเมื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤตความสามารถในการส่งถ่ายความร้อน จะลดลง จึงนิยามสภาวะการทำงานนี้ว่า สภาวะวิกฤต เนื่องจากที่สภาวะการทำงานนี้มีความถี่ของ การเกิดแถบการแห้งที่กึ่งกลางท่อเย็นของส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ค)

และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยจนกระทั่งถึง 210°C พบว่ารูปแบบการไหลภายในส่วนใหญ่ของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเป็นแบบวงแหวนในท่อร้อนที่ส่วนทำระเหยและสำหรับ ท่อเย็นพบรูปแบบการไหลแบบวงแหวนสลับกับแบบฟอง ซึ่งโดยภาพรวมนั้นพบว่ามีค่าเฉลี่ยของ รูปแบบการไหลภายในประมาณ 88.44 % และ 10.36 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของสารทำงานมีแนวโน้มเคลื่อนที่ทิศทางเดียวอย่างสมบูรณ์ในทิศทางตาม เข็มนาฬิกา นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นแถบการแห้งแบบชั่วคราวเกิดขึ้นเป็นครั้งคราวที่ บริเวณส่วนกลางของท่อเย็นที่ส่วนทำระเหย ด้วยความถี่ในการเกิดแถบการแห้งที่เพิ่มขึ้นเป็นครั้ง คราวด้วยความถี่ในการเกิดแถบการแห้งเฉลี่ยประมาณ 3.05 Hz และความยาวของการเกิดแถบการ แห้งเฉลี่ยประมาณ 5.6 cm ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบมีแนวโน้มของค่าการส่งถ่ายความร้อนลดลงมีค่าเฉลี่ยประมาณ $2,641 \text{ W/m}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ง) และตารางที่ 4.2 ซึ่งสภาวะการ

ทำงานนี้มีแนวโน้มของการเกิดรูปแบบการไหลแบบวงแหวนเพิ่มขึ้น และรูปแบบการไหลภายในดังกล่าวเป็นรูปแบบการไหลภายในที่นำไปสู่การเกิดแถบการแห้งของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ และเนื่องจากสภาวะการทำงานนี้สามารถสังเกตเห็นแถบการแห้งของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบด้วยความถี่ในการเกิดแถบการแห้งมากขึ้นจากสภาวะวิกฤต และความยาวในการเกิดแถบการแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนการส่งถ่ายความร้อนมีแนวโน้มลดลง จึงนิยามสภาวะการทำงานนี้ว่า สภาวะหลังวิกฤต

จากลำดับของการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงาน MP39 ที่จำนวน 2 โค้งเลี้ยว พบว่ารูปแบบการไหลภายในส่วนใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบการไหลแบบฟองไอและแบบก้อนเป็นรูปแบบการไหลแบบวงแหวนมากขึ้นและในบางจังหวะสามารถสังเกตเห็นรูปแบบการไหลแบบฟองร่วมด้วยเล็กน้อยในส่วนของท่อเย็นที่ส่วนทำระเหย พบว่าการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเป็นการเกิดการแห้งแบบชั่วคราวซึ่งมีสาเหตุจากการแห้งของฟิล์มของเหลว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการไหลภายในที่เปลี่ยนไปเป็นแบบวงแหวนมากขึ้น โดยรูปแบบการไหลแบบวงแหวนนั้นเป็นรูปแบบการไหลที่มีลักษณะของไอที่มีความเร็วสูงเคลื่อนที่บริเวณกลางท่อขณะเดียวกันก็จะมีฟิล์มของเหลวบาง ๆ เคลือบอยู่รอบผนังท่อความร้อน หากมีการเพิ่มความร้อนขึ้นจนถึงค่าหนึ่งก็จะส่งผลทำให้ฟิล์มของเหลวบางที่เคลือบอยู่ที่ผิวท่อความร้อนเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วจนกระทั่งความหนาของฟิล์มของเหลวลดลง จนไม่มีฟิล์มของเหลวเคลือบที่ผิวผนังท่อความร้อน ซึ่งพฤติกรรมนี้นำไปสู่การเกิดแถบการแห้ง



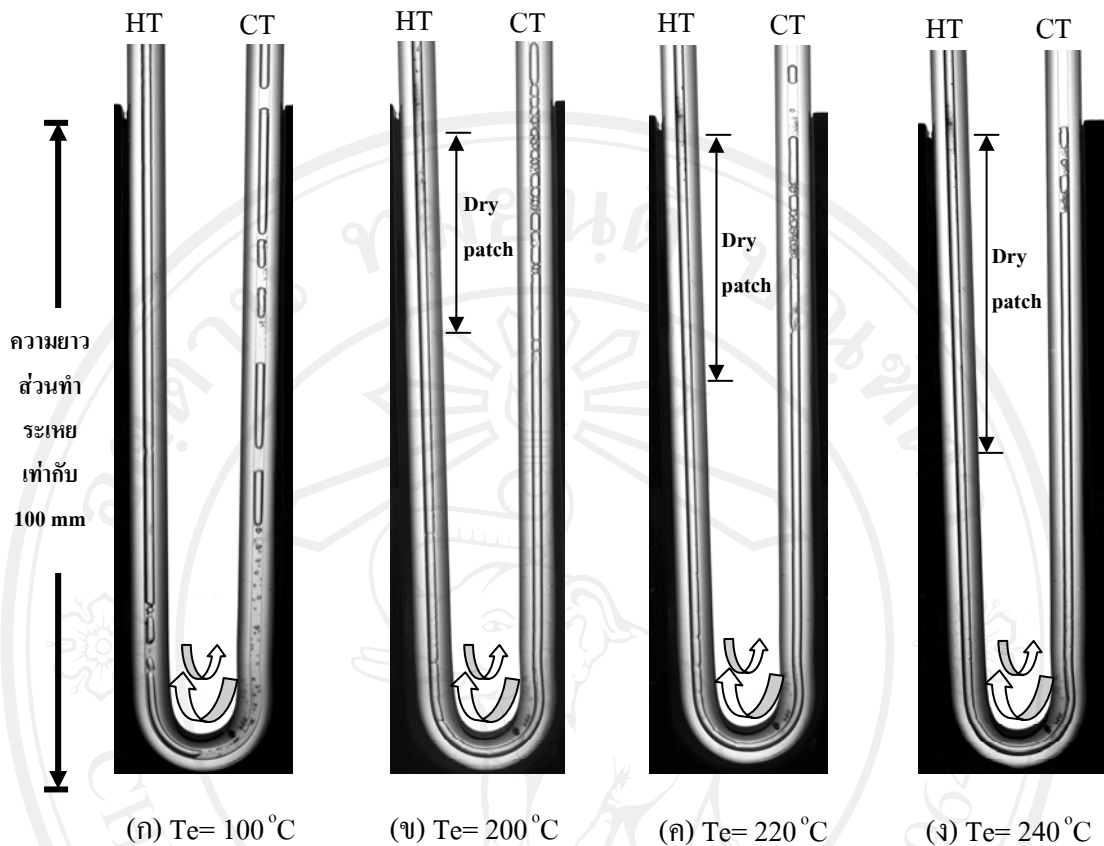
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

รูปที่ 4.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบกับอุณหภูมิส่วนทำระเหย ที่ใช้สารทำงานชนิด MP39 โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหย ส่งผลทำให้รูปแบบการไหลภายในเปลี่ยนจากรูปแบบการไหลแบบพองและแบบก้อนเป็นแบบวงแหวน ซึ่งเมื่อรูปแบบการไหลแบบพองและแบบก้อนได้รับความร้อนมากขึ้นจะทำให้พองไอมีความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการชนและรวมตัวกันของพองไอจนทำให้มีขนาดที่มากขึ้น ทำให้รูปแบบการไหลภายในเปลี่ยนเป็นแบบวงแหวน ซึ่งเป็นลักษณะของรูปแบบการไหลที่มีความหนาของฟิล์มของเหลวบางเคลือบที่บริเวณผิวท่อ โดยมีการเคลื่อนที่ของไออยู่แกนกลางท่อ หากมีการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยอย่างต่อเนื่องฟิล์มของเหลวจะระเหยและบางลง จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่ความหนาของฟิล์มเริ่มขาดช่วง (เกิดแถบการแห้ง) ทำให้การส่งถ่ายความร้อนลดลง โดยเรียกสภาวะการทำงานนี้ว่า สภาวะวิกฤต ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยขึ้นการส่งถ่ายความร้อนก็จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้เกิดการสมดุลในระบบ และหากให้ความร้อนจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งที่ท่อความร้อนสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ที่สภาวะนั้นเรียกว่าสภาวะวิกฤต แต่หากยังเพิ่มความร้อนให้แก่ท่อความร้อนอย่างต่อเนื่อง จะพบว่าความสามารถในการส่งถ่ายความร้อนจะมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากสารทำงานที่ไปรับความร้อนมาระบายในส่วนควบแน่นไม่เพียงพอ จึงทำให้สมรรถนะในการส่งถ่ายความร้อนลดลง

ดังนั้นจากการทดลองนี้พบว่ารูปแบบการไหลภายในที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤต คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวน และสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเกิดจากปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์ม

4.2 ผลของสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ (กรณีเปรียบเทียบระหว่างสารทำงาน MP39 และสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b)

สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษาท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ซึ่งจากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนผสมโดยปริมาตรของสารทำงานที่สัดส่วนเท่ากับ 1:1, 1:3 และ 3:1 พบว่ามีรูปแบบการไหลภายในค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเลือกทำการวิเคราะห์สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนโดยปริมาตร 1:1 เนื่องจากสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนแปลงภายในได้ชัดเจน และเลือกทำการวิเคราะห์ที่จำนวน 2 โคน์งเดี่ยว เนื่องจากสามารถนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลภายในที่หัวข้อการทดลองที่ 4.1 ได้



รูปที่ 4.4 ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเดี่ยว เมื่อใช้สารผสมระหว่าง R123 และ R141b สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:1 เป็นสารทำงาน

ตารางที่ 4.3 รูปแบบการไหลภายในแต่ละสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเดี่ยว เมื่อใช้สารผสมระหว่าง R123 และ R141b สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:1 (ขนาดของลูกศรแสดงความถี่ในการไหล)

สภาวะการทำงาน	รูปย่อ	อุณหภูมิ ส่วนทำระเหย ($^\circ\text{C}$)	%รูปแบบการไหลภายในที่ปรากฏในส่วนทำระเหย		
			แบบฟอง	แบบก้อน	แบบวงแหวน
ปกติ	ก	100	7.08	40.88	52.04
ก่อนวิกฤต	ข	200	7.40	12.92	79.68
วิกฤต	ค	220	6.20	12.45	81.35
หลังวิกฤต	ง	240	6.04	10.20	83.76

ตารางที่ 4.4 ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเดี่ยว เมื่อใช้สารผสมระหว่าง R123 และ R141b สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:1 เป็นสารทำงาน

สภาวะการทำงาน	รูปย่อย	อุณหภูมิส่วนทำระเหย (°C)	รูปแบบการไหลภายใน	คาบความเข้มข้นนาฬิกา (s)	คาบทวนเข้มข้นนาฬิกา (s)	ความยาวแถบการแห้ง (cm)	ความถี่แถบการแห้ง (Hz)	q (W/m ²)
ปกติ	ก	100	วงแหวน+ก้อน	0.42	0.31	-	-	1,553
เริ่มวิกฤต	ข	200	วงแหวน+ก้อน	0.23	0.22	3.4	0.67	2,977
วิกฤต	ค	220	วงแหวน+ก้อน	0.20	0.12	4.6 (ถาวร 3 cm)	0.94	2,889
หลังวิกฤต	ง	240	วงแหวน+ก้อน	0.15	0.10	5.8 (ถาวร 5.2 cm)	1.67	2,700

จากรูปที่ 4.4 แสดงลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141 ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 จำนวน 2 โค้งเดี่ยว โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแก่ส่วนทำระเหยจนไปจนถึง 100 °C พบว่ารูปแบบการไหลภายในส่วนใหญ่ของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเป็นแบบวงแหวนสลับกับแบบก้อน โดยภาพรวมนั้นพบว่ามีค่าเฉลี่ยของรูปแบบการไหลภายในประมาณ 52.04 % และ 40.88 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 สารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเมื่อได้รับความร้อนก็เริ่มมีการไหลเวียนเปลี่ยนทิศทางไปมาตลอดเวลา โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่หลักในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.42 s ซึ่งแสดงดังลูกศรขนาดใหญ่ที่หมายถึงทิศหลักของการเคลื่อนที่ แต่บางครั้งจะสามารถสังเกตเห็นการเคลื่อนที่ย้อนกลับในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.31 s โดยท่อความร้อนสามารถส่งถ่ายความร้อนได้เท่ากับ 1,553 W/m² สำหรับสภาวะการทำงานนี้ไม่สังเกตเห็นแถบการแห้ง จึงนิยามสภาวะการทำงานนี้ว่า สภาวะการทำงานปกติ ดังแสดงในรูป 4.4(ก)

จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยต่อจนกระทั่ง 200 °C พบว่ารูปแบบการไหลภายในส่วนใหญ่ของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบมีแนวโน้มเป็นแบบวงแหวนมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามบางครั้งสังเกตเห็นแบบก้อนเกิดร่วมด้วย โดยพบว่ามีค่าเฉลี่ยของรูปแบบการไหลภายในประมาณ 79.68 % และ 12.92 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งมีทิศทางการ

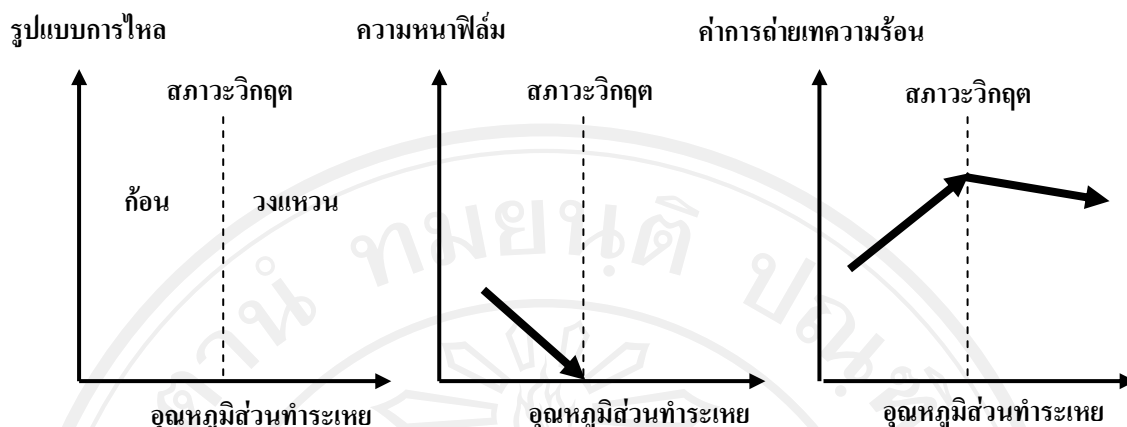
เคลื่อนที่หลักเป็นทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.23 s แต่บางจังหวะสามารถสังเกตเห็นการเคลื่อนที่ย้อนกลับทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.22 s ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และเริ่มสังเกตเห็นการเกิดแถบการแห้งแบบชั่วคราวขึ้นเป็นครั้งแรกที่บริเวณปากทางออกท่อร้อนของส่วนทำระเหย ด้วยความถี่ในการเกิดแถบการแห้งเฉลี่ยประมาณ 0.67 Hz และมีความยาวของแถบการแห้งเฉลี่ยประมาณ 3.4 cm ดังแสดงในรูป 4.4(ข) โดยภาพรวมพบว่ารูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวนเป็นรูปแบบการไหลภายในที่นำเข้าไปสู่สภาวะวิกฤต ซึ่งที่สภาวะการทำงานนี้สามารถสังเกตเห็นแถบการแห้งแบบชั่วคราวขึ้นเป็นครั้งแรกจึงนิยามสภาวะนี้ว่า สภาวะเริ่มวิกฤต ที่มีสาเหตุของการเกิดสภาวะวิกฤตจากปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์ม

เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยขึ้นจนถึง 220 °C พบว่ารูปแบบการไหลส่วนใหญ่ของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบสามารถสังเกตเห็นเป็นแนวโน้มของการเกิดแบบวงแหวนเพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตามพบรูปแบบการไหลภายในแบบก้อนและแบบฟองในบางครั้ง ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยของรูปแบบการไหลภายในประมาณ 81.35 % และ 12.45 % ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยพบว่าสารทำงานมีทิศทางการเคลื่อนที่หลักในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.20 s แต่บางจังหวะก็ยังสามารถสังเกตเห็นการเคลื่อนที่แบบทวนเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.11 s ดังแสดงในตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ที่บริเวณปากทางออกท่อร้อนที่ส่วนทำระเหยสามารถพบแถบการแห้งแบบถาวรที่มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 3 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ค) นอกจากนี้บางครั้งก็พบแถบการแห้งแบบชั่วคราวที่บริเวณด้านล่างของแถบการแห้งถาวรในท่อร้อนของส่วนทำระเหย เพราะเมื่อสารทำงานเคลื่อนที่จากท่อเย็นเพื่อมารับความร้อนในส่วนทำระเหย แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่ท่อร้อน พบว่ารูปแบบการไหลส่วนใหญ่เป็นแบบวงแหวน ดังนั้นเมื่อฟิล์มของเหลวที่ล้อมรอบผิวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบได้รับความร้อนก็จะระเหิดกลายเป็นไอและไอดังกล่าวพยายามเคลื่อนตัวออกจากส่วนทำระเหยเพื่อระบายความร้อนซึ่งในขณะเดียวกันไอดังกล่าวก็จะผลึกฟิล์มของเหลวในรูปแบบการไหลแบบวงแหวนที่ท่อร้อนของส่วนทำระเหยนั้นเคลื่อนที่ออกจากส่วนทำระเหยด้วย แต่ฟิล์มของเหลวดังกล่าวขณะพยายามเคลื่อนที่ขึ้นก็ได้รับความร้อนและระเหิดกลายเป็นไอเช่นกัน และในที่สุดฟิล์มของเหลวก็จะระเหยไปจนหมดที่บริเวณด้านล่างของแถบการแห้งถาวรด้วยความยาวเฉลี่ยประมาณ 1.6 cm จากนั้นฟิล์มของเหลวในรูปแบบการไหลแบบวงแหวนรอบใหม่ที่เคลื่อนที่มาจากท่อเย็นของส่วนทำระเหยก็ไหลเข้ามาแทนที่แถบการแห้งแบบชั่วคราวและเกิดการระเหยกลายเป็นไोजจนกระทั่งหายไป ในที่สุดอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นในการทดลองนี้ได้นิยามการแห้งลักษณะนี้เรียกว่า การแห้งแบบชั่วคราว โดยสำหรับการทดลองนี้มีความถี่ในการเกิดแถบการแห้งชั่วคราวเฉลี่ยประมาณ 0.94 Hz ซึ่งมี

ความยาวเฉลี่ยของการเกิดแถบการแห้งรวมประมาณ 4.6 cm เนื่องจากสภาวะการทำงานนี้สามารถสังเกตพบแถบการแห้งอย่างถาวรได้ชัดเจนและมีความยาวของแถบการแห้งรวมเพิ่มขึ้น โดยพบว่าสภาวะการทำงานนี้มีแนวโน้มของการเกิดรูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นรูปแบบการไหลที่นำเข้าสู่สภาวะวิกฤต และนอกจากนี้ยังพบความถี่ในการเกิดแถบการแห้งเพิ่มขึ้นมากกว่าสภาวะเริ่มวิกฤต ดังนั้นจึงนิยามสภาวะการทำงานนี้ว่า สภาวะวิกฤต ซึ่งมีสาเหตุของสภาวะวิกฤตเกิดจากปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์ม

ในรูปที่ 4.4(ง) หากเพิ่มอุณหภูมิส่วนที่ระเหยจนกระทั่งถึง 240°C พบว่ารูปแบบการไหลภายในส่วนใหญ่ที่อุณหภูมิแบบสันชนิดวงรอบมีแนวโน้มเป็นแบบวงแหวนเพิ่มขึ้น แต่บางครั้งอาจพบแบบก้อนและแบบฟองมีแนวโน้มลดลง จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าเฉลี่ยของรูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวนประมาณ 83.76 % สำหรับทิศทางการเคลื่อนหลักในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.15 s แต่บางจังหวะก็ยังสามารถสังเกตเห็นการเคลื่อนที่แบบทวนเข็มนาฬิกาด้วยคาบการเคลื่อนที่เฉลี่ยประมาณ 0.10 s ดังแสดงในตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ยังพบแถบการแห้งรวมความยาวเฉลี่ยประมาณ 5.8 cm ที่บริเวณปากทางออกที่ร้อนของส่วนที่ระเหย โดยเป็นแถบการแห้งแบบถาวรความยาวเฉลี่ยประมาณ 5.2 cm และการแห้งแบบชั่วคราว 0.6 cm ด้วยความถี่ในการเกิดการแห้งชั่วคราวเฉลี่ยประมาณ 1.67 Hz สำหรับที่สภาวะการทำงานนี้พบว่ารูปแบบการไหลส่วนใหญ่เป็นแบบวงแหวน และพบแถบการแห้งที่ชัดเจนทั้งแบบชั่วคราวและถาวร โดยมีค่าความยาวเฉลี่ยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะวิกฤต ดังนั้นสภาวะการทำงานนี้จึงนิยามว่าเป็น สภาวะหลังวิกฤต

จากลำดับการเกิดการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ด้วยสัดส่วนการผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 จำนวน 2 กิโลกรัม พบว่ารูปแบบการไหลภายในมีการเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบการไหลแบบวงแหวนและแบบก้อนเปลี่ยนเป็นรูปแบบการไหลแบบวงแหวนมากขึ้นและบางครั้งก็พบรูปแบบการไหลแบบก้อนเกิดร่วมด้วยเล็กน้อยที่ส่วนที่ระเหย พบว่ารูปแบบการไหลแบบวงแหวนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเข้าสู่สภาวะวิกฤต เนื่องจากฟิล์มของเหลวที่ล้อมรอบผิวท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบในรูปแบบการไหลแบบวงแหวน เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ และเมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องฟิล์มของเหลวก็จะระเหยจนกระทั่งในที่สุดฟิล์มของเหลวเกิดการระเหยจนหมดทำให้ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ซึ่งพฤติกรรมนี้นำไปสู่การเกิดแถบการแห้ง ที่มีสาเหตุมาจากการแห้งของฟิล์มของเหลว โดยพบว่าที่สภาวะวิกฤตพบแถบการแห้งแบบถาวรและแบบชั่วคราวที่บริเวณปากทางออกที่ร้อนของส่วนที่ระเหย



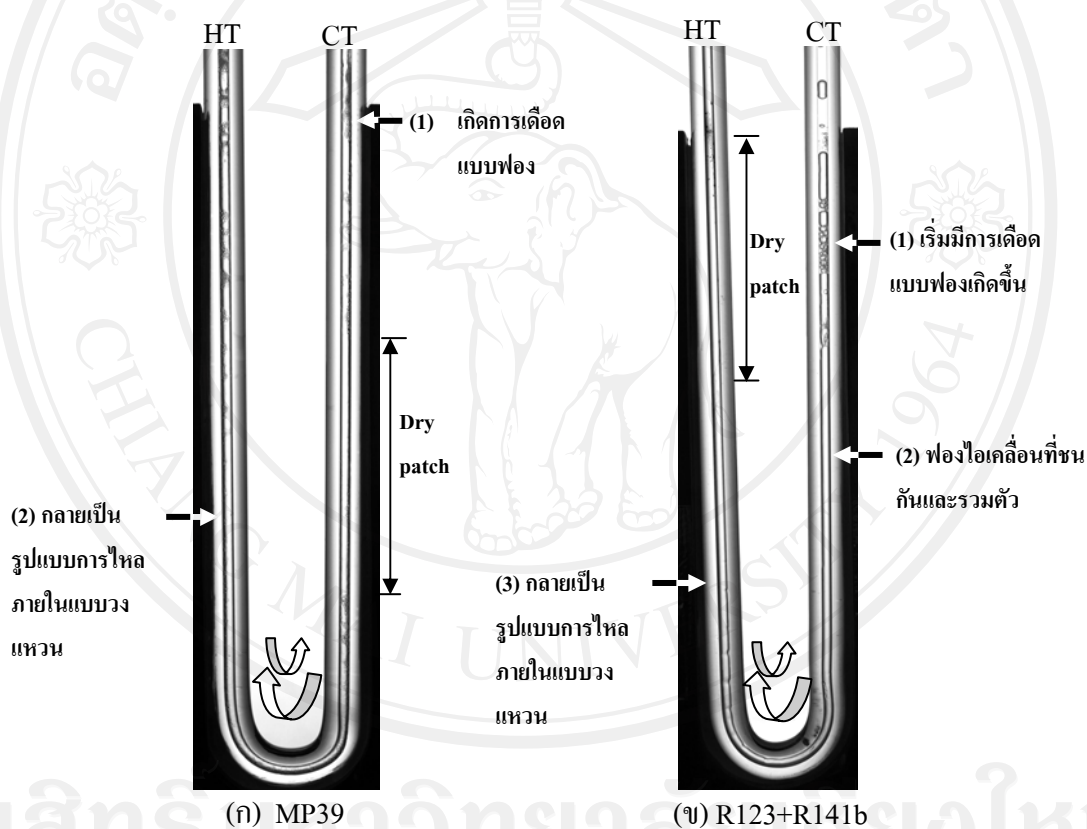
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

รูปที่ 4.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบกับอุณหภูมิส่วนทำระเหย ที่ใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ด้วยสัดส่วนการผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 พบว่าเมื่อรูปแบบการไหลแบบก่อนได้รับความร้อนจากอุณหภูมิส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น ก้อนฟองไอน้ำที่รับความร้อนจะมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ทำให้ในบางครั้งเกิดการชนกันและรวมตัวกันของก้อนฟองไอน้ำ เกิดเป็นฟองไอน้ำที่มีขนาดยาว และในที่สุดเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไอน้ำที่มีความเร็วสูงก็จะเคลื่อนที่บริเวณกลางท่อและมีฟิล์มของเหลวบางล้อมรอบลำไอน้ำดังกล่าว นั่นก็หมายความว่าเมื่ออุณหภูมิส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นรูปแบบการไหลภายในจะเปลี่ยนจากแบบก่อนมาเป็นแบบวงแหวน โดยเมื่อรูปแบบการไหลแบบวงแหวนรับความร้อนอย่างต่อเนื่องฟิล์มของเหลวที่ล้อมรอบแกนไอน้ำ จะเกิดการระเหยจนหมดส่งผลทำให้เกิดการแห้งของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ (สภาวะวิกฤต) ซึ่งพบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะวิกฤตค่าการส่งถ่ายความร้อนจะมีแนวโน้มลดลง มีผลทำให้ท่อความร้อนไม่สามารถส่งถ่ายความร้อนได้ตามปกติ

ดังนั้นจากการทดลองนี้พบว่ารูปแบบการไหลภายในที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤต คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวน และสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเกิดจากปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์ม

4.3 ผลของสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ ที่สภาวะวิกฤตชนิด (กรณีเปรียบเทียบสารทำงานชนิด Azeotropic blend และ Non-azeotropic blend)

โดยในหัวข้อนี้จะวิเคราะห์ถึงผลของสารทำงานชนิด Azeotropic blend (สารทำงาน MP39) และ Non-azeotropic blend (สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b) เพื่อเปรียบเทียบปรากฏการณ์ภายในที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตของสารทำงานทั้ง 2 ชนิด ว่าเหมือนหรือต่างกันอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์ที่ท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเดี่ยว สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสภาวะวิกฤต ดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



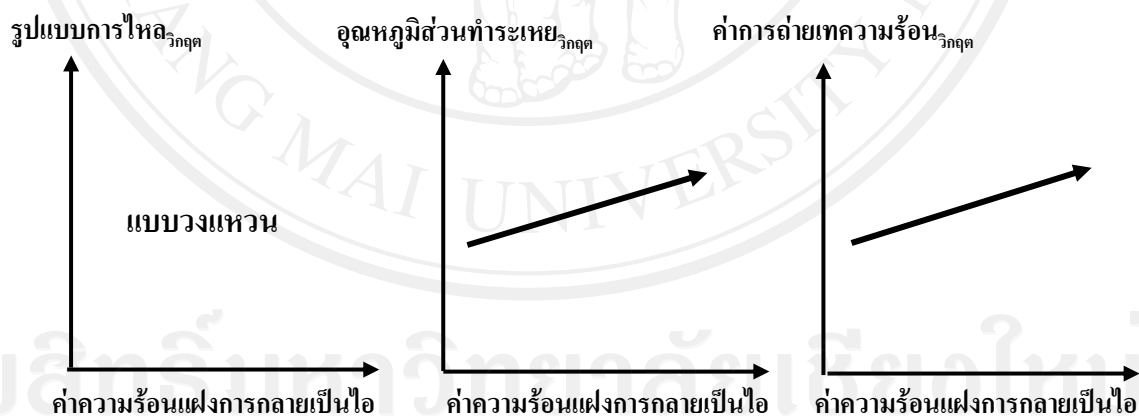
รูปที่ 4.6 ผลของสารทำงานผสมที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเดี่ยว ที่ใช้ MP39 และสารผสมระหว่าง R123 และ R141b เป็นสารทำงาน

ตารางที่ 4.5 ผลของสารทำงาน MP39 และสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b เป็นสารทำงานที่จำนวน 2 โคล์งเลี้ยว ที่สภาวะวิกฤต

สารทำงาน	อุณหภูมิ ส่วนทำระเหย (°C)	รูปแบบการไหล ภายใน	สาเหตุการเกิด สภาวะวิกฤต	ลักษณะเด่นของ การเกิดแถบการแห้ง
MP39	170	แบบวงแหวน	การแห้งแบบฟิล์ม	แถบการแห้งเกิดที่ท่อเย็น
R123+R141b	220	แบบวงแหวน	การแห้งแบบฟิล์ม	แถบการแห้งเกิดที่ท่อร้อน

จากการศึกษาผลของสารทำงาน 2 ชนิด คือ MP39 และสารผสมระหว่าง R123 กับ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:1 ในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 2 โคล์งเลี้ยว พบว่ารูปแบบการไหลภายในที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดสภาวะวิกฤตของสารทำงานทั้ง 2 ชนิด เหมือนกัน คือรูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ก)และ(ข) เนื่องจากเมื่อรูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวนรับความร้อนฟิล์มของเหลวบางที่เคลือบอยู่ที่ผิวท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ส่งผลทำให้เกิดการระเหยและหากได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งฟิล์มของเหลวดังกล่าวได้รับความร้อนและระเหยจนหมดในที่สุด โดยพฤติกรรมนี้นำไปสู่การเกิดแถบการแห้งที่มีสาเหตุมาจากการแห้งแบบฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามสารทำงานทั้ง 2 ชนิด มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่างกัน คือ MP39 มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ 140 kJ/kg และสารผสมระหว่าง R123 กับ R141b (1:1) มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ 196.60 kJ/kg ซึ่งหากพิจารณาสารทำงานทั้ง 2 ชนิด ที่มีมวล 1 kg เท่ากัน พบว่าสารทำงาน MP39 รับความร้อนเพื่อระเหยกลายเป็นไอน้อยกว่าสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ดังนั้นสารทำงาน MP39 จึงมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะวิกฤตได้เร็วกว่าสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1) แต่เป็นที่น่าสังเกตว่ายังมีข้อแตกต่างบางประการของลักษณะการเกิดแถบการแห้งที่สภาวะวิกฤต โดยพบว่าเมื่อสารทำงาน MP39 สถานะของเหลวเคลื่อนที่เข้าสู่ท่อเย็นจะเกิดการเดือดและระเหยอย่างรวดเร็วเนื่องจากสารทำงาน MP39 มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอต่ำ ดังนั้นจึงใช้ปริมาณความร้อนในการระเหยกลายเป็นไอไม่สูงมากนัก เพื่อนำเข้าสู่สภาวะวิกฤต โดยลักษณะการเกิดแถบการแห้งเป็นแบบชั่วคราว พบบริเวณกึ่งกลางท่อเย็นของส่วนทำระเหย ส่วนสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1) ที่สภาวะวิกฤต โดยเป็นสภาวะที่มีแนวโน้มของการเกิดรูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้พบแถบการแห้งอย่างต่อเนื่องที่เกิดจากปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์มของเหลว ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่สูงกว่าสารทำงาน

MP39 ซึ่งหมายความว่าสารผสมดังกล่าวจำเป็นต้องรับปริมาณความร้อนในปริมาณที่มากกว่าเพื่อระเหยสารทำงานสถานะของเหลวให้กลายเป็นไอ ดังนั้นจึงต้องใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่รับปริมาณความร้อนมากกว่าสารทำงาน MP39 ทำให้สารทำงานผสม R123 และ R141b (1:1) เกิดแถบการแห้ง (สถานะวิกฤต) และแถบการแห้งดังกล่าวเป็นแถบการแห้งแบบถาวรบริเวณปากทางออกที่ท่อร้อนของส่วนทำระเหย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ดังนั้นสามารถสรุปผลของสารทำงานทั้งสารทำงานกลุ่ม Azeotropes (สารทำงาน MP39) และ Non-azeotropes (สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1)) ได้ว่ารูปแบบการไหลภายในที่ทำให้เกิดสถานะวิกฤต คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวนเหมือนกันทั้ง 2 ชนิด โดยมีสาเหตุเกิดจากปรากฏการณ์การแห้งของฟิล์มของเหลว แต่ลักษณะการเดือดมีข้อแตกต่างกัน สำหรับกรณีที่สารทำงานกลุ่ม Azeotropes (สารทำงาน MP39) พบว่าลักษณะการเดือดเป็นการเดือดที่เกิดขึ้นพร้อมกัน ส่วนสารทำงานกลุ่ม Non-azeotropes (สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1)) พบว่าลักษณะการเดือดสังเกตเห็นการเดือดไม่พร้อมกัน เนื่องจากสารทำงานกลุ่มนี้สามารถแยกออกจากกันได้โดยวิธีการกลั่น ดังนั้นสารทำงานผสมที่มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอล่าจะเกิดการเดือดและระเหยก่อน ในขณะที่สารทำงานผสมที่มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูงจะเกิดการเดือดและระเหยในลำดับต่อมา



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

รูปที่ 4.7 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่สภาวะวิกฤต จากหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าสารทำงานกลุ่ม Azeotropes (สารทำงาน MP39) มีลักษณะการเดือดที่พร้อมกัน ส่วนสารทำงานกลุ่ม Non-azeotropes (สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1)) พบลักษณะการเดือดแบบแยกกัน โดยสารทำงานผสมที่มีค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอต่ำจะเดือดก่อนสารทำงานผสมที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤตเหมือนกัน คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤต คือ การแห้งแบบฟิล์ม โดยสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอสูง จำเป็นต้องรับปริมาณความร้อนมากกว่าสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอต่ำ ดังนั้นสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอสูง จึงมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะวิกฤตได้ยากกว่า เนื่องจากต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมากสำหรับการระเหยกลายเป็นไอ จึงส่งผลทำให้อุณหภูมิส่วนทำระเหยที่สภาวะวิกฤตของสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอสูงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเมื่อสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนที่สภาวะวิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้นสำหรับการทดลองนี้พบว่าสารทำงานไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่สภาวะวิกฤต เนื่องจากรูปแบบการไหลภายในที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตเหมือนกัน คือ รูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวน โดยมีสาเหตุเกิดจากปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์ม

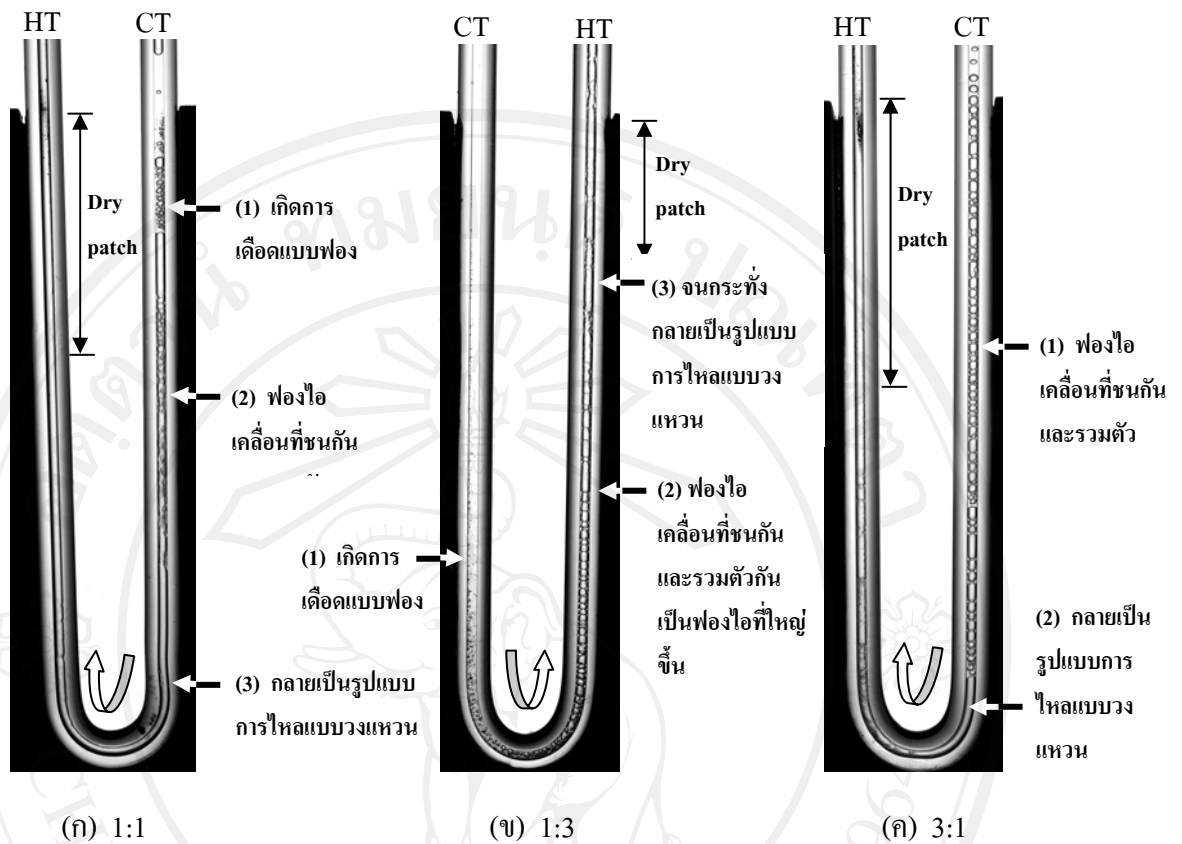
4.4 ผลของสัดส่วนผสมโดยปริมาตรที่ต่างกันของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สภาวะวิกฤต

จากการทดลองผลของสัดส่วนผสมโดยปริมาตรที่ต่างกันของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สภาวะวิกฤต ในสัดส่วนผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1, 1:3 และ 3:1 ซึ่งมีลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของสารทำงานผสม R123 และ R141b ในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ของสารทำงานผสมทั้ง 3 สัดส่วนผสมโดยปริมาตรมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยพบว่ารูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่นำไปสู่สภาวะวิกฤตเหมือนกัน คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวน และสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตได้แก่ การแห้งแบบฟิล์ม โดยแถบการแห้งสามารถพบที่บริเวณปากทางออกของส่วนทำระเหย ซึ่งลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของสารทำงานผสม R123 และ R141b ในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ดังนั้นสำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสภาวะวิกฤตของสารทำงานทั้ง 3 สัดส่วนผสมโดยปริมาตร ถึงแม้ว่าการเกิดสภาวะ

วิกฤตมีลักษณะคล้ายกัน แต่กระนั้นหากพิจารณาอย่างละเอียดก็จะพบข้อแตกต่างบางประการของสารทำงานผสมที่มีสัดส่วนผสมระหว่าง R123 และ R141b ด้วยสัดส่วนผสมโดยปริมาตรที่ต่างกัน ดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.6 แสดงถึงรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 2 โคนเดี่ยว ที่ใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b เป็นสารทำงาน ด้วยสัดส่วนผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1, 1:3 และ 3:1 ที่สภาวะวิกฤต โดยพบว่ารูปแบบการไหลภายในของทั้ง 3 สัดส่วนผสมโดยปริมาตร ที่สภาวะวิกฤต คือ รูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวนที่ส่งผลทำให้พบแถบการแห้งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีสาเหตุจากปรากฏการณ์การแห้งของฟิล์ม

แต่อย่างไรก็ตามที่บริเวณท่อเย็นของส่วนทำระเหยสังเกตพบข้อแตกต่างของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ทั้ง 3 สัดส่วนผสมโดยปริมาตร เมื่อสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b สถานะของเหลวเคลื่อนตัวเข้ามารับความร้อนที่ท่อเย็นของส่วนทำระเหย ในรูป 4.8 (ก) แสดงถึงสัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:1 โดยสภาวะวิกฤตที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ บริเวณท่อเย็นของส่วนทำระเหยพบลักษณะเด่น คือ พบการเกิดรูปแบบการไหลภายในแบบก้อนและแบบฟองใกล้เคียงกัน โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่หลักในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เนื่องจากจังหวะที่เริ่มมีการหมุนเวียนปริมาณไอในท่อร้อนของส่วนทำระเหยมีปริมาณของสารทำงานผสมสถานะไอมากกว่าสถานะของเหลว จึงส่งผลทำให้เมื่อได้รับความร้อนสารทำงานผสมสถานะไอเริ่มขยายตัวจนกระทั่งสารทำงานผสมภายในเกิดการสั่นเพื่อส่งถ่ายความร้อน โดยถือว่าพฤติกรรมดังกล่าวเป็นสภาวะเริ่มต้นทำงาน ของสารทำงานผสมที่บรรจุอยู่ภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ อีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าหากท่อใดมีปริมาณสารทำงานผสมสถานะไอมากกว่าสถานะของเหลวจะทำให้ท่อนั้นเริ่มเคลื่อนที่ก่อนและเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของสารทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก)



รูปที่ 4.8 รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 2 โคน์เดี่ยว ที่ใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b เป็นสารทำงานที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตรต่างกัน

ตารางที่ 4.6 ผลของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนการผสมโดยปริมาตรต่างกัน จำนวน 2 โคน์เดี่ยว ที่สภาวะวิกฤต

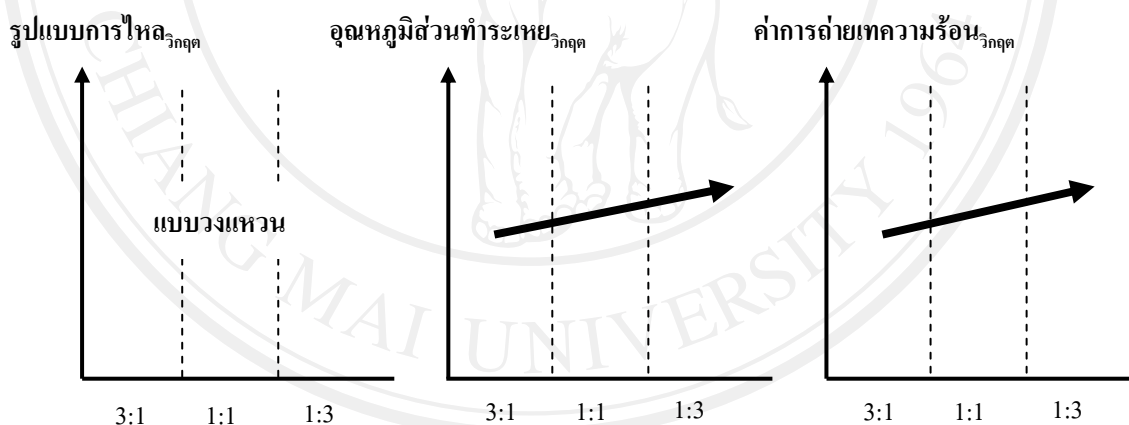
สารทำงาน (% โดยปริมาตร)		อุณหภูมิ ส่วนทำระเหย (°C)	รูปแบบ การไหลภายใน	สาเหตุการเกิด สภาวะวิกฤต	ลักษณะเด่นที่พบในท่อเย็น
R123	R141b				
1	1	220	แบบวงแหวน	การแห้งแบบฟิล์ม	การเกิดรูปแบบการไหลภายในแบบก้อนและแบบฟองใกล้เคียงกัน
1	3	310	แบบวงแหวน	การแห้งแบบฟิล์ม	การเกิดรูปแบบการไหลภายในแบบฟองที่มีขนาดเล็กละเอียดเท่านั้น
3	1	200	แบบวงแหวน	การแห้งแบบฟิล์ม	การเกิดรูปแบบการไหลภายในแบบก้อนมากกว่าแบบฟอง

สำหรับรูปที่ 4.8(ข) แสดงรูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤตของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ด้วยสัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:3 ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 310°C ซึ่งในท่อเย็นของส่วนทำระเหยมีลักษณะเด่น คือ พบการเกิดรูปแบบการไหลแบบฟองขนาดเล็กละเอียดจำนวนมาก จากการสังเกตยังพบอีกว่าในท่อเย็นของส่วนทำระเหยฟองไอน์มีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะทางที่ได้รับความร้อน เนื่องจากสารทำงานเคลื่อนที่พร้อมกับการรับความร้อนอย่างต่อเนื่องตามระยะทาง โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่หลักทวนเข็มนาฬิกา ส่วนรูปที่ 4.8(ค) แสดงถึงรูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤตของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 3:1 พบว่าเกิดสภาวะวิกฤตที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 200°C โดยที่ท่อเย็นของส่วนทำระเหยพบลักษณะเด่น คือ พบการเกิดรูปแบบการไหลแบบก้อนมากกว่าแบบฟอง เนื่องจากสัดส่วนโดยปริมาตรของ R123 ผสมถึงสามส่วนในสารทำงานผสมดังกล่าว ซึ่งสารทำงาน R123 มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ ส่งผลทำให้สารทำงานผสมเมื่อได้รับปริมาณความร้อนเพียงเล็กน้อย จึงสามารถเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอได้ง่าย ดังนั้นเมื่อสารทำงานเคลื่อนที่เข้าสู่ท่อเย็นของส่วนทำระเหย สารทำงานก็เริ่มรับความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ฟองไอน์ที่มีขนาดเล็กเกิดการขยายตัว แล้วรวมตัวกันเป็นฟองไอน์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ก่อนที่จะเข้าสู่ท่อร้อนของส่วนทำระเหย โดยในการทดลองนี้มีทิศทางการเคลื่อนที่หลักในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 แต่อย่างไรก็ตามที่สาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตเหมือนกัน คือ ปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์ม

จากผลการทดลองดังที่กล่าวข้างต้นที่สภาวะวิกฤตของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ด้วยสัดส่วนผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1, 1:3 และ 3:1 พบว่าปรากฏการณ์ภายในที่ท่อเย็นของส่วนทำระเหยมีลักษณะการเกิดรูปแบบการไหลภายในที่ต่างกัน เนื่องจากสารทำงานผสมที่ใช้เป็นสารผสมกลุ่ม Non-azeotropes โดยปกติสารทำงาน R123 มีค่าจุดเดือดต่ำกว่าสารทำงาน R141b ดังนั้นเมื่อนำสารทำงานทั้งสองมาผสมกัน จากนั้นเริ่มให้ความร้อนโดยการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยแก่ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ พบว่าสารทำงานผสมมีลักษณะการเดือดแบบแยกกัน โดยสารทำงาน R123 เป็นสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ เมื่อได้รับปริมาณความร้อนเพียงพอสำหรับการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ สารทำงาน R123 จะเริ่มเกิดเดือดก่อนที่อุณหภูมิส่วนทำระเหยต่ำ ๆ และหากสารทำงานผสมดังกล่าวได้รับปริมาณความร้อนอย่างต่อเนื่องโดยการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยสารทำงาน R141b ก็เริ่มการเดือดในลำดับถัดมา แต่ในขณะที่เดียวกันสารทำงาน R123 มีปริมาณการเดือดเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่มีการทดลองแปรค่าสัดส่วนโดยปริมาตรที่ต่างกัน คือ 1:1, 1:3 และ 3:1 พบว่าในรูปที่ 4.8(ค) แสดงรูปแบบการไหลของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 3:1 เมื่อสารทำงานผสมดังกล่าวในสถานะของเหลวเคลื่อนตัวลงมารับความร้อนที่บริเวณปากทางเข้า

ท่อเย็นของส่วนทำระเหย เริ่มสังเกตพบการเดือดและขยายตัวของฟองไออยู่ในรูปแบบการไหลภายในแบบฟองและแบบก้อน เนื่องจากสารทำงานดังกล่าวมีปริมาตรของสารทำงาน R123 สามส่วน ซึ่งเป็นสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ ส่วนปริมาตรของสารทำงาน R141b ที่มีเพียงหนึ่งส่วน ดังนั้นจึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณความร้อนอย่างต่อเนื่องและมากพอ สารทำงาน R123 จะเกิดการเดือดและระเหยกลายเป็นไวก่อนสารทำงาน R141b จึงส่งผลให้พบรูปแบบการไหลภายในแบบฟองและแบบก้อน แต่ในรูปที่ 4.8(ข) แสดงรูปแบบการไหลภายในของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:3 โดยมีสัดส่วนผสมโดยปริมาตรของสารทำงาน R141b สามส่วน ซึ่งสารทำงาน R141b เป็นสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูง ทำให้สารทำงานดังกล่าวต้องรับปริมาณความร้อนจำนวนมากเพื่อใช้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ดังนั้นลักษณะการเดือดที่เกิดขึ้นในท่อเย็นของส่วนทำระเหยเป็นรูปแบบการไหลภายในแบบฟองที่มีขนาดเล็กค่อนข้างละเอียดมาก เนื่องจากเมื่อสารทำงานผสมดังกล่าวในสถานะของเหลวได้รับความร้อนก็จะเริ่มเกิดการเดือด แต่เพราะสารทำงานดังกล่าวมีสัดส่วนของสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง จึงส่งผลทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่รับความร้อนมากกว่า สังเกตได้จากที่ท่อเย็นของส่วนทำระเหยพบว่าลักษณะของการเดือดแบบฟองมีลักษณะใหญ่ขึ้นตามระยะทางในการรับความร้อนตั้งแต่บริเวณปากทางเข้าจนกระทั่งถึงด้านล่างของท่อเย็นที่ส่วนทำระเหย แล้วจากนั้นเริ่มเกิดการขยายตัวจนเป็นรูปแบบการไหลแบบก้อนและแบบวงแหวนในส่วนของท่อร้อนของส่วนทำระเหย ดังนั้นกล่าวได้ว่าเมื่อสัดส่วนผสมโดยปริมาตรของสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอต่ำมีสัดส่วนโดยปริมาตรมากกว่า รูปแบบการไหลที่พบในท่อเย็นของส่วนทำระเหยเป็นแบบฟองและแบบก้อน (ในการทดลองนี้ คือ สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 3:1) ในทางกลับกันหากสัดส่วนผสมโดยปริมาตรของสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูงมีสัดส่วนโดยปริมาตรมากกว่า รูปแบบการไหลภายในที่พบในท่อเย็นของส่วนทำระเหยเป็นแบบฟองที่มีขนาดเล็กละเอียด เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาสำหรับการเคลื่อนที่รับความร้อนที่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบอีกว่าสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1, 1:3 และ 3:1 มีอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่สภาวะวิกฤตต่างกัน เนื่องจากสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 3:1 มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเท่ากับ 187.88 kJ/kg ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:1 มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเท่ากับ 196.60 kJ/kg และสัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:3 มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเท่ากับ 215.13 kJ/kg ซึ่งเห็นได้ว่าสารทำงานผสมที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ (โดยเปรียบเทียบจากสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่ทดลอง 3

สัดส่วนผสมโดยปริมาตร) มีโอกาสเข้าสู่สภาวะวิกฤตได้ง่ายกว่าสารทำงานผสมที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง (โดยเปรียบเทียบจากสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่ ทดลอง 3 สัดส่วนผสมโดยปริมาตร) โดยในที่นี้พบว่าอุณหภูมิที่สภาวะวิกฤตของสารทำงานผสม ระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 มีค่าต่างกัน คือ 200 °C, 220 °C และ 310 °C ตามลำดับ เนื่องจากสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ เมื่อได้รับปริมาณความร้อนเพียงเล็กน้อยก็สามารถระเหยกลายเป็นไอและเกิดแถบการแห้งได้เร็วกว่า ดังนั้นจึงส่งผลทำให้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร เท่ากับ 3:1 สามารถเข้าสู่สภาวะวิกฤตได้ง่ายกว่า โดยใช้อุณหภูมิส่วนทำระเหยที่สภาวะวิกฤต 200 °C ส่วนสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:3 เป็นสาร ทำงานผสมที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงกว่าที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตรเท่ากับ 1:1 และ 3:1 ตามลำดับ จึงสามารถเข้าสู่สภาวะวิกฤตที่อุณหภูมิส่วนทำระเหยสูงกว่าที่ 310 °C



สัดส่วนโดยปริมาตร (R123:R141b) สัดส่วนโดยปริมาตร (R123:R141b) สัดส่วนโดยปริมาตร (R123:R141b)

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตร
ของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

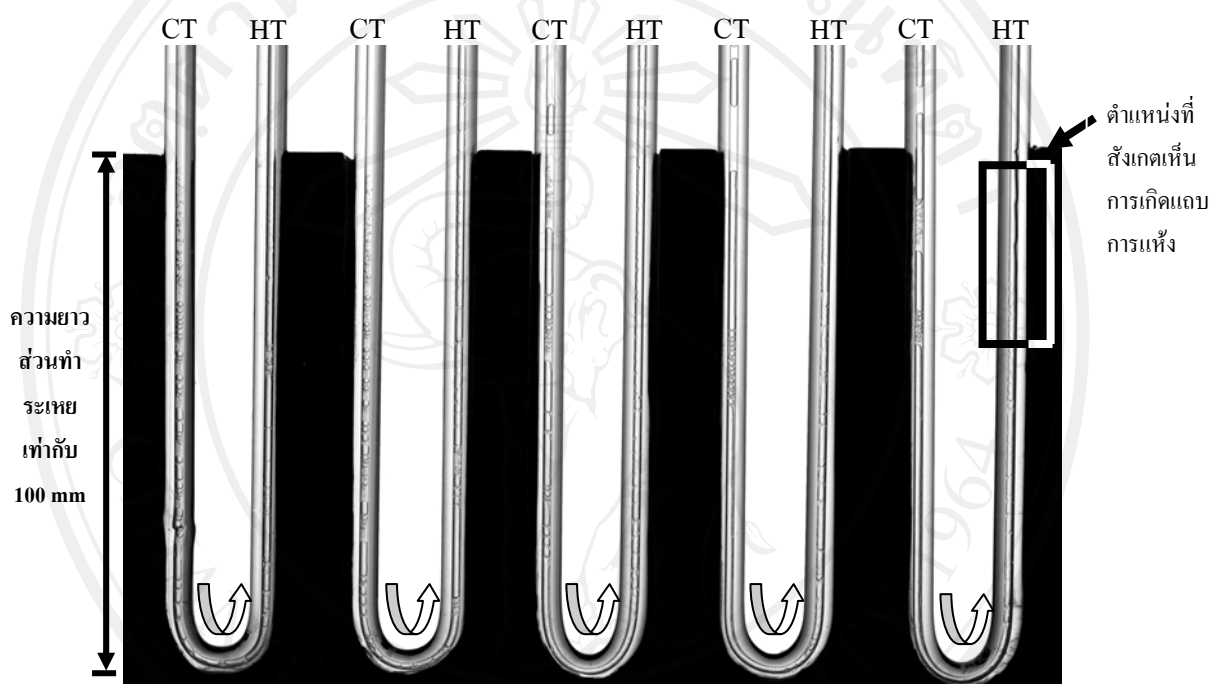
รูปที่ 4.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ภายในกับการแปรค่าสัดส่วนโดย ปริมาตรสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนโดยปริมาตร 1:1, 1:3 และ 3:1 พบว่า รูปแบบการไหลภายในที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ คือ รูปแบบ การไหลแบบวงแหวน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตขึ้น คือ แห้งแบบฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b มีค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของ

สารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง (ในที่นี้ คือ R141b) มากกว่าค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ (ในที่นี้ คือ R123) ส่งผลทำให้อุณหภูมิส่วนที่ระเหยที่สภาวะวิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง จำเป็นต้องใช้ปริมาณความร้อนจำนวนมาก เพื่อระเหยสารทำงานในสถานะของเหลวให้กลายเป็นไอ และการเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูง ทำให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่สภาวะวิกฤตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

ดังนั้นสำหรับการทดลองนี้พบว่าสัดส่วนโดยปริมาตรที่ต่างกันไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่สภาวะวิกฤต เนื่องจากรูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤตเหมือนกัน คือ รูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวน โดยที่สภาวะวิกฤตมีสาเหตุจากปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์ม

4.5 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวเมื่อใช้สารทำงาน MP39 ที่สภาวะวิกฤต

จากหัวข้อที่ 4.1 ได้ทราบแล้วว่าลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของสารทำงาน MP39 ซึ่งจากการศึกษาพบว่าลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของทั้งจำนวน 2 และ 5 โค้งเลี้ยว มีลักษณะที่คล้ายกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสภาวะวิกฤตของสารทำงาน MP39 ที่จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เท่านั้น โดยจะพิจารณาผลของจำนวน โค้งเลี้ยวเปรียบเทียบกับกรณีทดลองหัวข้อที่ 4.1



รูปที่ 4.10 การเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน

ตารางที่ 4.7 รูปแบบการไหลภายในแต่ละสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน (ขนาดของลูกศรแสดงความถี่ในการไหล)

สภาวะการทำงาน	รูปย่อ	อุณหภูมิ ส่วนทำระเหย (°C)	%รูปแบบการไหลภายในที่ปรากฏในส่วนทำระเหย		
			แบบฟอง	แบบก้อน	แบบวงแหวน
ปกติ	ก	70	7.92	33.36	58.72
เริ่มวิกฤต	ข	110	8.86	22.45	68.69
วิกฤต	ค	120	8.67	14.63	76.70
หลังวิกฤต	ง	150	8.40	11.27	80.33

ตารางที่ 4.8 ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั้นชนิดวงรอบ จำนวน 5 โคนงเดี่ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน

สภาวะการทำงาน	รูปย่อ	อุณหภูมิส่วนทำระเหย (°C)	รูปแบบการไหลภายใน	คาบ	คาบ	ความยาว	ความถี่	q (W/m ²)
				คาบคาบ นาฬิกา (s)	คาบคาบ นาฬิกา (s)	แถบการแห้ง (cm)	แถบการแห้ง (Hz)	
ปกติ	ก	70	ก่อน+วงแหวน	ตลอดเวลา	-	-	-	553
เริ่มวิกฤต	ข	110	วงแหวน+ก่อน	ตลอดเวลา	-	2.8	1.21	1,204
วิกฤต	ค	120	วงแหวน+ก่อน	ตลอดเวลา	-	3.4 (ถาวร 3 cm)	1.60	1,330
หลังวิกฤต	ง	150	วงแหวน+ก่อน	ตลอดเวลา	-	7.2 (ถาวร 5.8 cm)	3.24	1,656

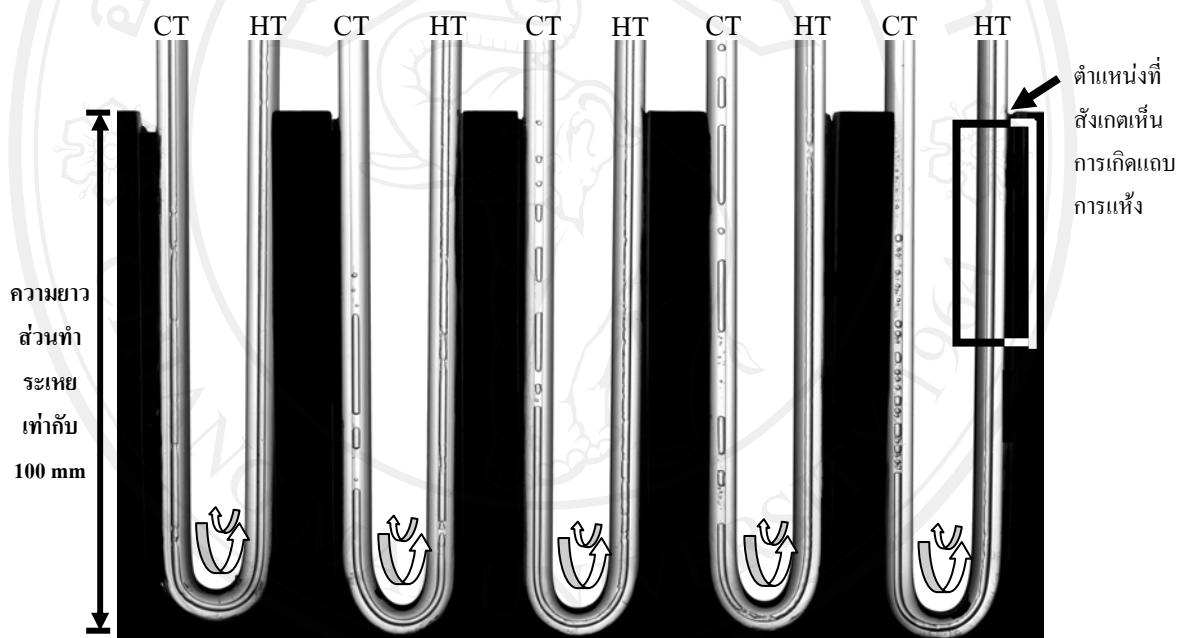
จากการศึกษาโดยทำการเพิ่มจำนวน โคนงเดี่ยวจาก 2 เป็น 5 โคนงเดี่ยว พบว่ารูปแบบการไหลภายในที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตเหมือนกัน คือ รูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวน เนื่องจากรูปแบบการไหลภายในดังกล่าวเป็นลักษณะของไอที่มีความเร็วสูงเคลื่อนที่บริเวณกลางท่อความร้อน ในขณะที่เดียวกันฟิล์มของเหลวบางก็เคลื่อนที่บริเวณผิวท่อความร้อน ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มความร้อนให้แก่ท่อความร้อนอย่างต่อเนื่องด้วยการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหย ฟิล์มของเหลวบางบริเวณรอบผิวท่อจะเกิดการระเหยและหมดไปในท้ายที่สุด โดยปรากฏการณ์นี้นำไปสู่การเกิดแถบการแห้ง หรือที่เรียกว่า สภาวะวิกฤต ซึ่งพบแถบการแห้งที่บริเวณตำแหน่งปากทางออกทางออกท่อร้อนของส่วนทำระเหย โดยสาเหตุของการเกิดสภาวะวิกฤตในหัวข้อนี้ คือ การแห้งแบบฟิล์ม และทิศทางการเคลื่อนที่แบบทวนเข็มนาฬิกาอย่างสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.7 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มจำนวน โคนงเดี่ยวจาก 2 เป็น 5 โคนงเดี่ยว พบว่าลักษณะการเกิดการแถบแห้งต่างกัน โดยที่จำนวน 2 โคนงเดี่ยว เกิดแถบการแห้งขึ้นพร้อมกันที่บริเวณท่อเย็นของส่วนทำระเหยทั้ง 2 โคนงเดี่ยว แต่สำหรับจำนวน 5 โคนงเดี่ยว แถบการแห้งที่เกิดขึ้นสังเกตพบบริเวณท่อร้อนของส่วนทำระเหยที่โคนงเดี่ยวสุดท้าย เนื่องจากท่อร้อนของส่วนทำระเหยที่โคนงเดี่ยวสุดท้าย (โคนงเดี่ยวขวามือสุด) มีปริมาณการเคลื่อนที่ของสารทำงานในสถานะของเหลวที่ควบแน่นจากส่วนควบแน่นของโคนงเดี่ยวก่อนหน้านั้นเข้าสู่ท่อเย็นของส่วนทำระเหยของโคนงเดี่ยวสุดท้ายมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับโคนงเดี่ยวอื่น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของสารทำงานตั้งแต่โคนงเดี่ยวแรก (โคนงเดี่ยวซ้ายมือสุด) จนถึงโคนงเดี่ยวสุดท้ายมีระยะทางในการเคลื่อนที่มาก จึงทำให้ที่โคนงเดี่ยวดังกล่าวพบรูปแบบการ

ไหลแบบวงแหวนเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดสภาวะวิกฤตหรือการเกิดแถบการแห้ง เนื่องจากการแห้งแบบฟิล์มก่อน ไค้งเลี้ยวอื่น และหากอุณหภูมิส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นอีก พบว่าแนวโน้มของการเกิดแถบการแห้งจะเริ่มแห้งที่ไค้งเลี้ยวถัดไค้งเลี้ยวสุดท้ายเรื่อยไปจนถึงไค้งเลี้ยวแรกของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ในขณะที่เดียวกัน ไค้งเลี้ยวสุดท้ายมีแนวโน้มของความยาวการเกิดแถบการแห้งในท่อร้อนของส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น โดยท่อร้อนของส่วนทำระเหยที่เกิดสภาวะวิกฤตพบว่า มีแนวโน้มของความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และพบว่าปรากฏการณ์การแห้งแบบฟิล์มเป็นสาเหตุทำให้เกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ

ดังนั้นในการทดลองนี้พบว่ารูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤต คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวน และสาเหตุของสภาวะวิกฤตเกิดจากการแห้งแบบฟิล์ม

4.6 ผลของจำนวนโคงเลี้ยวเมื่อใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1) ที่สภาวะวิกฤต

จากหัวข้อที่ 4.2 ได้ทราบแล้วว่าลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b มีลำดับการเกิดอย่างไร ซึ่งจากการศึกษาพบว่าลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของทั้งจำนวน 2 และ 5 โคงเลี้ยว มีลักษณะคล้ายกันดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสภาวะวิกฤตเท่านั้น เนื่องจากเป็นสภาวะที่สนใจ โดยเลือกพิจารณาสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:1 จำนวน 5 โคงเลี้ยว เพื่อนำข้อมูลการทดลองที่ได้สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับหัวข้อที่ 4.2



รูปที่ 4.11 การเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 5 โคงเลี้ยว

เมื่อใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1) เป็นสารทำงาน

ตารางที่ 4.9 รูปแบบการไหลภายในแต่ละสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเดี่ยว เมื่อใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1) เป็นสารทำงาน (ขนาดของลูกศรแสดงความถี่ในการไหล)

สภาวะการทำงาน	รูปย่อ	อุณหภูมิ (°C)	%รูปแบบการไหลภายในที่ปรากฏในส่วนทำระเหย		
			แบบฟอง	แบบก้อน	แบบวงแหวน
ปกติ	ก	100	11.36	40.76	47.88
ก่อนวิกฤต	ข	150	15.56	21.80	62.64
วิกฤต	ค	170	10.12	13.60	76.28
หลังวิกฤต	ง	200	7.50	12.86	79.64

ตารางที่ 4.10 ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเดี่ยว เมื่อใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1) เป็นสารทำงาน

สภาวะการทำงาน	รูปย่อ	อุณหภูมิ ส่วนทำระเหย (°C)	รูปแบบการไหลภายใน	คาบ	คาบ	ความยาว	ความถี่	q (W/m ²)
				ตามเข็มนาฬิกา (s)	ทวนเข็มนาฬิกา (s)	แบบการแห้ง (cm)	แบบการแห้ง (Hz)	
ปกติ	ก	100	วงแหวน+ก้อน	0.17	0.29	-	-	1,134
เริ่มวิกฤต	ข	150	วงแหวน+ก้อน	0.20	0.32	4.4	1.19	1,741
วิกฤต	ค	170	วงแหวน+ก้อน	0.18	0.24	5.0	1.36	1,788
หลังวิกฤต	ง	200	วงแหวน+ก้อน	0.14	0.20	6.2	2.08	2,070

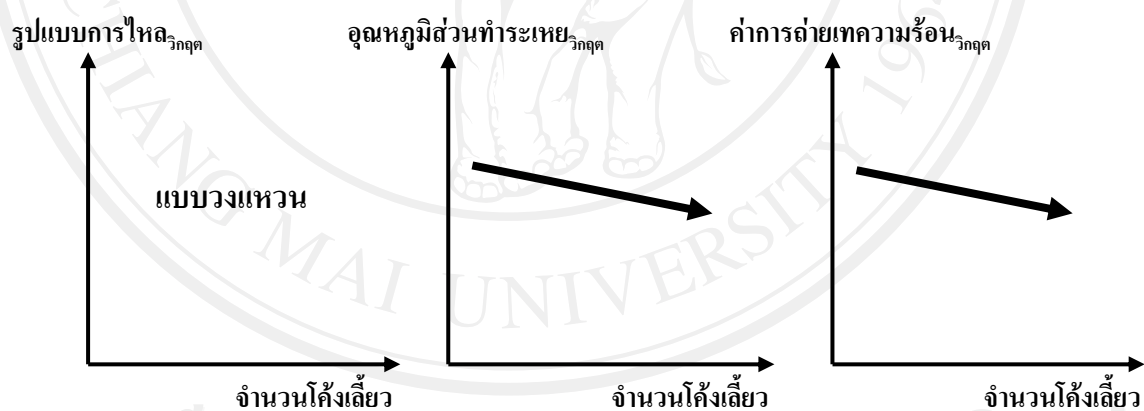
จากการศึกษาโดยทำการเพิ่มจำนวน โค้งเดี่ยวจาก 2 เป็น 5 โค้งเดี่ยว ของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ที่ใช้สารทำงานทำงานผสม R123 และ R141b (1:1) พบว่ารูปแบบการไหลภายในทำให้เกิดสภาวะวิกฤตเหมือนกัน คือ รูปแบบการไหลภายในแบบวงแหวน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และสังเกตพบแถบการแห้งเกิดขึ้นบริเวณท่อร้อนของส่วนทำระเหย โดยการเคลื่อนที่หลักเป็นทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูป 4.11 แต่อย่างไรก็ตามพบว่า การเพิ่มจำนวน โค้งเดี่ยวจาก 2 เป็น 5

โคง์เลี้ยว มีผลของลักษณะการเกิดการแห้งต่างกัน กล่าวคือท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่จำนวน 2 โคง์เลี้ยว มีลักษณะการเกิดแถบการแห้งขึ้นพร้อมกันที่ท่อร้อนของส่วนทำระเหยทั้ง 2 โคง์เลี้ยว เนื่องจากสารทำงานมีการไหลเวียนเป็นวงรอบอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีปริมาณของสารทำงานในสถานะของเหลวเคลื่อนที่มารับความร้อนที่ท่อเย็นของส่วนทำระเหยอย่างต่อเนื่องทั้ง 2 โคง์เลี้ยว จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนโคง์เลี้ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเป็น 5 โคง์เลี้ยว พบว่าลักษณะการเกิดการแห้งหรือสภาวะวิกฤตเริ่มเกิดที่บริเวณท่อร้อนของส่วนทำระเหยจากโคง์เลี้ยวสุดท้าย (โคง์เลี้ยวขวามือสุด) และหากเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยให้สูงขึ้น การเกิดแถบการแห้งมีแนวโน้มเริ่มแห้งในโคง์เลี้ยวถัดโคง์เลี้ยวสุดท้ายเรื่อยไปจนถึงโคง์เลี้ยวแรก (โคง์เลี้ยวซ้ายมือสุด) ของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ ในขณะที่เดียวกัน โคง์เลี้ยวสุดท้ายมีแนวโน้มของความยาวการเกิดแถบการแห้งเพิ่มขึ้น และท่อร้อนของส่วนทำระเหยที่ทุกโคง์เลี้ยวที่เกิดแถบการแห้งมีแนวโน้มความยาวของแถบการแห้งเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยรูปแบบการไหลภายในที่นำไปสู่สภาวะวิกฤต คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวนและสาเหตุการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ คือ การแห้งแบบฟิล์ม

จากการเพิ่มจำนวนโคง์เลี้ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบจากจำนวน 2 เป็น 5 โคง์เลี้ยว เปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่รับความร้อน ส่งผลทำให้สารทำงานในสถานะของเหลวมีโอกาสระเหยกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีแรงขับเคลื่อนสารทำงานให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันมากขึ้น จึงทำให้สารทำงานเข้าสู่สภาวะวิกฤตได้ง่ายกว่า โดยในกรณีที่สารทำงานมีค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอลำ มีโอกาสการระเหยได้มากกว่าสารทำงานที่มีค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอสูงที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่ารูปแบบการไหลภายในที่ทำให้เกิดแถบการแห้ง (สภาวะวิกฤต) คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ คือ การแห้งแบบฟิล์ม เหมือนกันทั้ง 2 โคง์เลี้ยว ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเพิ่มจำนวนโคง์เลี้ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤตและสาเหตุการเกิดของสภาวะวิกฤตและไม่ว่าทำการเปลี่ยนสารทำงานเป็นสารทำงาน MP39 หรือสารทำงานผสม R123 และ R141b ก็ไม่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในที่สภาวะวิกฤตและสาเหตุการเกิดของสภาวะวิกฤต แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการเกิดแถบการแห้งมีความแตกต่างกันเล็กน้อย คือ เมื่อพิจารณาการเกิดแถบการแห้งที่สภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่จำนวน 2 โคง์เลี้ยว มีพฤติกรรมการเกิดแถบการแห้ง บริเวณท่อร้อนของส่วนทำระเหยโดยเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 2 โคง์เลี้ยว แต่ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบที่มีจำนวน 5 โคง์เลี้ยว พบว่าลักษณะของการเกิดแถบการแห้งเริ่มจากบริเวณท่อร้อนของส่วนทำระเหยในโคง์เลี้ยวแรก (โคง์เลี้ยวซ้ายมือสุด) เนื่องจากท่อร้อนของส่วนทำระเหยที่โคง์เลี้ยวสุดท้าย (โคง์เลี้ยวขวามือสุด) มีปริมาณสารทำงานใน

สถานะของเหลวเคลื่อนที่จากส่วนควบแน่นเข้าท่อเย็นส่วนทำระเหยน้อยกว่าไค้งเดี่ยวอื่น ๆ ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณความร้อนของส่วนทำระเหยขึ้น แลบการแห้งมีแนวโน้มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยที่สาเหตุการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ คือ การแห้งแบบฟิล์ม

จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับจำนวนไค้งเดี่ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ พบว่าเมื่อจำนวนไค้งเดี่ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบเพิ่มขึ้นจาก 2 ไค้งเดี่ยว เป็น 5 ไค้งเดี่ยว พบว่ารูปแบบการไหลภายในที่นำไปสู่สภาวะวิกฤตเหมือนกัน คือ รูปแบบการไหลแบบวงแหวน แต่อุณหภูมิส่วนทำระเหยที่สภาวะวิกฤตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อจำนวนไค้งเดี่ยวเพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ในการรับความร้อน จึงส่งผลทำให้ที่ท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบจำนวน 5 ไค้งเดี่ยว สามารถเข้าสู่สภาวะวิกฤตได้ง่ายกว่าท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบจำนวน 2 ไค้งเดี่ยว ส่งผลให้อุณหภูมิส่วนทำระเหยที่สภาวะวิกฤตมีค่าต่างกัน นอกจากนี้เมื่อเพิ่มจำนวนไค้งเดี่ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ มีทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สภาวะวิกฤตมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับจำนวนไค้งเดี่ยวของท่อความร้อนแบบสันชนิดวงรอบ