

## บทที่ 1

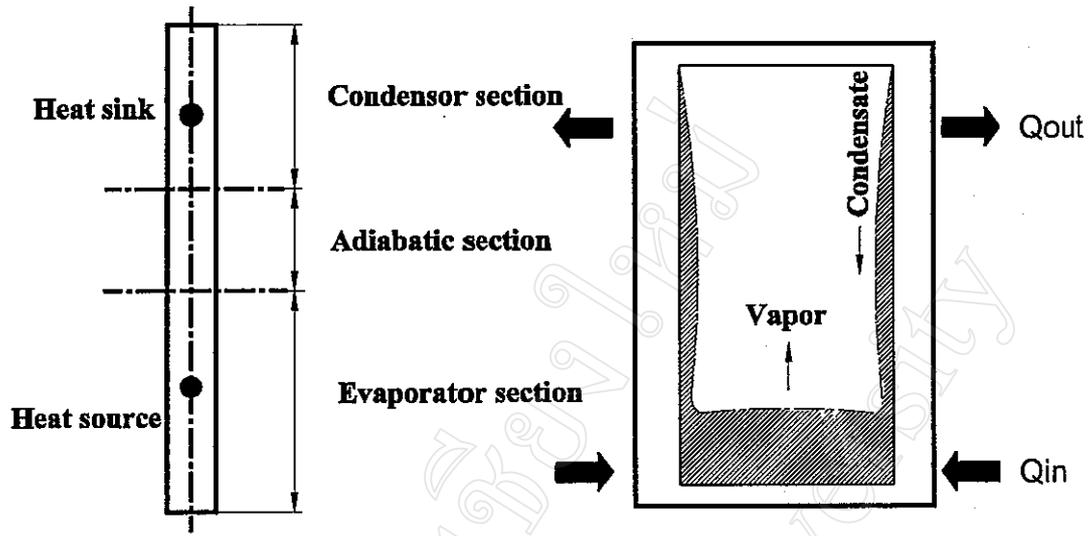
### บทนำ

#### 1.1 ปัญหาและที่มาของโครงการ

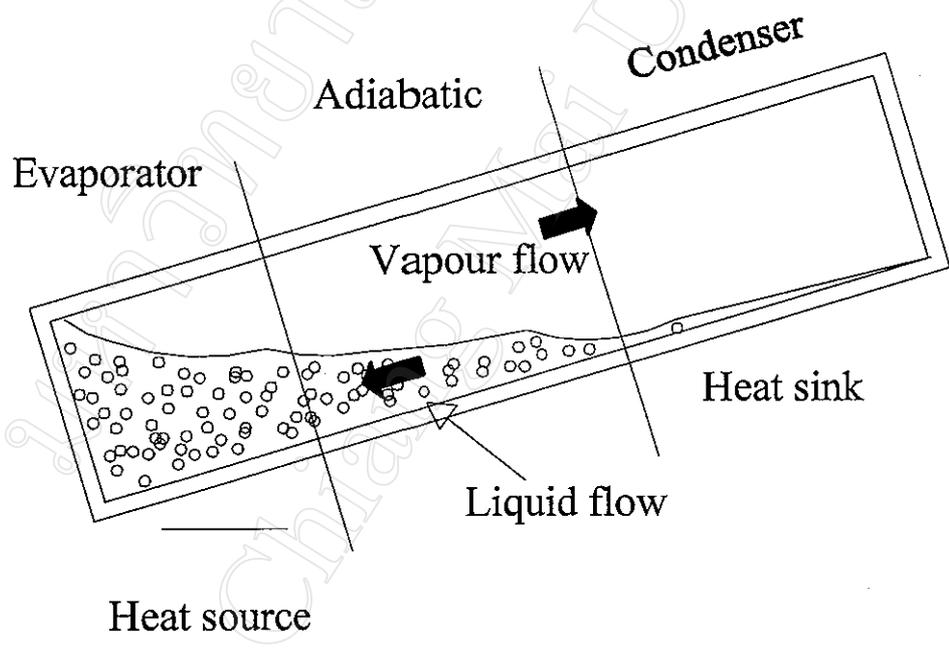
เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้งานเพื่อประหยัดพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน มีการนำเทอร์โมไซฟอนมาใช้ในงานหลายประเภทด้วยกัน เช่น ใช้ในระบบดึงความร้อนกลับ ใช้เป็นเครื่องถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ ใช้ในการลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ และใช้เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนในระบบทำความเย็น เทอร์โมไซฟอนมีข้อดีมากมาย เช่น อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง มีโครงสร้างง่าย และราคาต่ำในแง่อุตสาหกรรม

เทอร์โมไซฟอนเป็นท่อที่มีการทำภายในให้มีสภาพเป็นสุญญากาศและเติมของไหลทำงานจำนวนหนึ่งเข้าไปไว้ภายในและปิดไว้ เทอร์โมไซฟอนประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น ดังแสดงในรูป 1.1 หลักการทำงานคือ สารทำงานจะได้รับความร้อนจากส่วนทำระเหย ทำให้กลายเป็นไอ และลอยขึ้นไปด้านบนในส่วนควบแน่น ซึ่งเย็นกว่า และควบแน่นเนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมีค่าสูงมากจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่ง โดยมีอุณหภูมิแตกต่างเพียงเล็กน้อยของเหลวที่ควบแน่นจะไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วง เพราะฉะนั้นส่วนทำระเหยจะต้องอยู่ด้านล่าง และส่วนควบแน่นจะต้องอยู่ด้านบนเสมอ ดังรูป 1.1 ส่วนเทอร์โมไซฟอนแบบเอียงก็จะมีการทำงานคล้ายกับแบบตั้งตรง แต่ลักษณะการไหลเวียนภายในจะเปลี่ยนไปดังแสดงในรูป 1.2 เนื่องจากผลของแรงโน้มถ่วงทำให้ความหนาฟิล์มภายในตัวเทอร์โมไซฟอนมีขนาดบางลงกว่าที่วางในแนวตั้งในบริเวณส่วนบนของเทอร์โมไซฟอน ซึ่งทำให้ความสามารถในการส่งผ่านความร้อนผ่านฟิล์มของเหลวมีค่าสูงขึ้นทำให้เทอร์โมไซฟอนแบบเอียงสามารถส่งผ่านความร้อนได้มากขึ้น แต่ในขณะที่เอียงท่อมากขึ้นนั้นฟิล์มของเหลวที่บางเกินไปจะทำให้เกิดการแห้งที่ผิวแตกเปลี่ยนความร้อนได้ และทำให้เทอร์โมไซฟอนมีความสามารถในการส่งผ่านความร้อนลดลง

แม้ว่าเทอร์โมไซฟอนจะเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการส่งผ่านความร้อนสูง แต่เทอร์โมไซฟอนก็ยังมีขีดจำกัดในการส่งผ่านความร้อน เช่นเดียวกับอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอื่นๆ กล่าวคือเมื่อการส่งผ่านความร้อนเกิดขึ้นที่ขีดจำกัดของอุปกรณ์ พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมาก จากนั้นจะเกิดการไหม้เป็นสาเหตุให้อุปกรณ์เสียหาย และเกิดอันตรายอย่างมากกับทั้งตัวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และผู้เดินเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูป 1.1 เทอร์โมไซฟอนแบบตั้งตรง [1]



รูป 1.2 เทอร์โมไซฟอนแบบเอียง [1]

ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องทราบว่าขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นๆ มีค่าเท่าไร เพื่อที่จะสามารถหลีกเลี่ยงการทำงานในช่วงขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนได้ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายขีดจำกัดสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนเปิดสองสถานะแบบเอียงโดยสร้างจากสมการควบคุมพื้นฐาน ซึ่งทำให้แบบจำลองที่ได้มีความยืดหยุ่นและใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

สำหรับเทอร์โมไซฟอน มีหลายปรากฏการณ์ที่ควบคุมขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อน เช่น ปรากฏการณ์การท่วม ปรากฏการณ์การเดือด ซึ่งขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนที่ถูกกำหนดจาก ปรากฏการณ์การท่วมจะเรียกว่าขีดจำกัดการท่วม ในทำนองเดียวกันขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนที่กำหนดจากปรากฏการณ์การเดือดจะเรียกว่าขีดจำกัดการเดือด เนื่องจากมีหลายปรากฏการณ์ที่ควบคุมขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนของเทอร์โมไซฟอน ดังนั้นจะเรียกขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในเทอร์โมไซฟอนว่า ขีดจำกัดสมรรถนะ

การทราบว่าเทอร์โมไซฟอนที่ออกแบบมีขีดจำกัดสมรรถนะเท่าไร เป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะป้องกันการเสียหายของตัวเทอร์โมไซฟอนในขณะที่ทำการส่งผ่านความร้อน และสามารถให้เทอร์โมไซฟอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการสร้างแบบจำลองขีดจำกัดสมรรถนะสำหรับเทอร์โมไซฟอน ตามปกติแล้วการทำนายขีดจำกัดสมรรถนะจะกระทำในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ โดยตัวแปรไร้มิติที่สำคัญมีดังนี้

บอนด์นัมเบอร์ (Bond number) คืออัตราส่วนของแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นต่อแรงเนื่องจากความตึงผิวของฟองอากาศ ซึ่งเหมือนกับปรากฏการณ์การเดือดแบบฟองในเทอร์โมไซฟอน จึงเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ทำนายปรากฏการณ์การเดือดในเทอร์โมไซฟอน

เวเบอร์นัมเบอร์ (Weber number) คืออัตราส่วนความเฉื่อยเนื่องจากความเร็วต่อแรงเนื่องจากความตึงผิว ซึ่งเป็นตัวแปรในการอธิบายการสัมผัสที่ผิวหน้าระหว่างแก๊สกับของเหลวหรือของเหลวกับของเหลว ซึ่งเหมือนกับการสัมผัสที่ผิวหน้าระหว่างไอกับฟิล์มของเหลวในเทอร์โมไซฟอน จึงเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ทำนายปรากฏการณ์การแห้งในเทอร์โมไซฟอน

ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number) คืออัตราส่วนของแรงเนื่องจากการเคลื่อนที่ หรือแรงเฉื่อยที่ไหลอิสระบนพื้นผิวของเหลวต่อแรงเนื่องจากน้ำหนัก ซึ่งเหมือนกับการไหลของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์มของเหลวในเทอร์โมไซฟอน จึงเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ทำนายปรากฏการณ์การเกิดคลื่นของฟิล์มของเหลวในเทอร์โมไซฟอน

คูหาเทลลัดเซอ (Kutateladze number) คืออัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมโซฟอน

อย่างไรก็ตามแบบจำลองขีดจำกัดสมรรถนะที่สร้างขึ้นโดยนักวิจัยท่านต่างๆ จะอาศัยหลักการวิเคราะห์เชิงมิติ หรือความสัมพันธ์อิมพิริกัล ซึ่งต้องการข้อมูลจากการทดลองสนับสนุนและมีความยืดหยุ่นน้อย คือไม่สามารถใช้ได้ในช่วงที่เกินจากข้อมูลการทดลอง

แต่สำหรับการศึกษาในครั้งนี้จะสร้างแบบจำลองขีดจำกัดสมรรถนะ โดยใช้สมการควบคุมพื้นฐานซึ่งประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม สำหรับปริมาตรควบคุม ที่ส่วนส่วนควบแน่นของเทอร์โมโซฟอน และประกอบกับการกำหนดเงื่อนไขการไหลจากปรากฏการณ์การแห้งและปรากฏการณ์การท่วมที่ถูกต้อง ก็จะได้แบบจำลองขีดจำกัดสมรรถนะที่มีความยืดหยุ่น สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางในการทำนายเงื่อนไขการทำงานงานของเทอร์โมโซฟอน

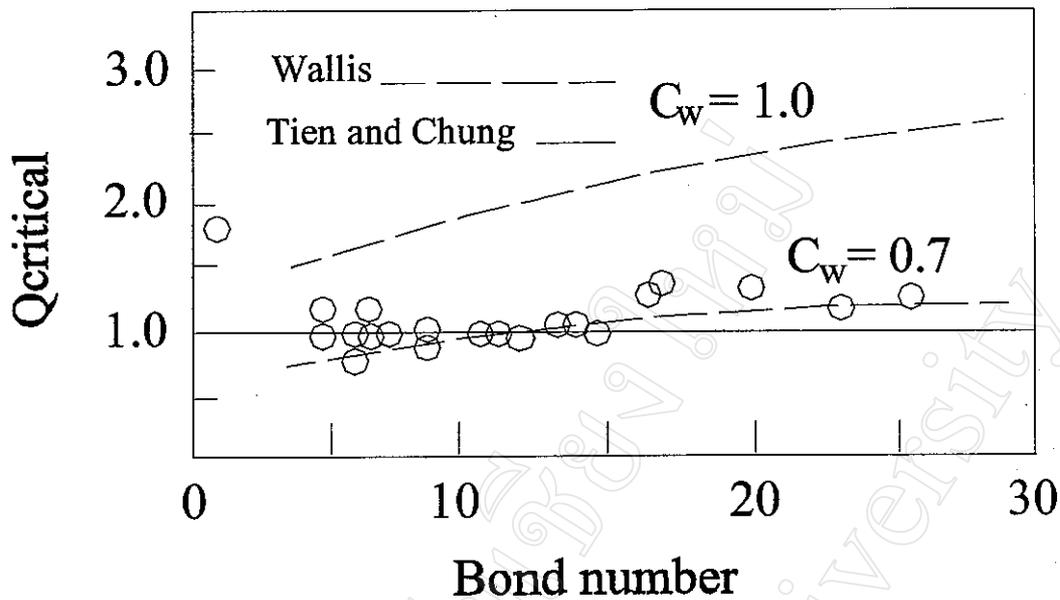
## 1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 1.2.1 เทอร์โมโซฟอนแนวตั้ง

#### 1.2.1.1 แบบจำลองขีดจำกัดสมรรถนะ และสมการความสัมพันธ์ที่ทำนาย

##### ปรากฏการณ์การท่วม

Tien and Chung [21] ได้อธิบายถึงขีดจำกัดการพาในเทอร์โมโซฟอนซึ่งระบุว่าขีดจำกัดการพา คือปรากฏการณ์ที่ไอน้ำมีความเร็วสูงมากจนสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลว ทำให้ของเหลวหลุดเข้าไปในแก่นไอ และเป็นเหตุให้ของเหลวกลับมายังส่วนทำระเหยไม่ได้จึงเกิดการไหม้ขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปขีดจำกัดการพาและขีดจำกัดการท่วมจะกล่าวถึงในความหมายที่ใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ยังได้เสนอสมการความสัมพันธ์ สำหรับทำนายการท่วมสำหรับกรณีการไหลสวนทาง โดยคูหาเทลลัดเซอซึ่งทำให้สามารถทำนายการท่วมในเทอร์โมโซฟอนแนวตั้งได้ ผลการคำนวณอัตราการส่งผ่านความร้อนในกรณีที่เกิดขีดจำกัดการท่วมจากสมการความสัมพันธ์และข้อมูลการทดลองเป็นดังรูป 1.3 ซึ่งในรูปได้แสดงผลจากการทำนายโดยใช้ความสัมพันธ์ของ Wallis [10] ซึ่งใช้ค่าบอนด์นัมเบอร์ในการทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดด้วย ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดโดยใช้คูหาเทลลัดเซอนำสงสัยอยู่



รูป 1.3 ผลการคำนวณการส่งผ่านความร้อนในกรณีที่เกิดขีดจำกัดการท่วมจากสมการความสัมพันธ์และข้อมูลจากการทดลอง [21]

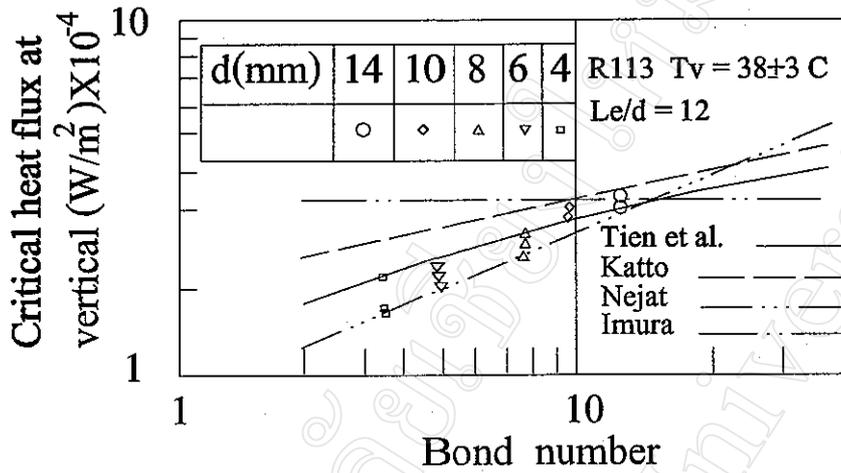
#### 1.2.1.2 ผลของคุณลักษณะทางความร้อนที่สภาวะวิกฤติ

Shiraishi [15] ได้ศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อการส่งผ่านความร้อนโดยทำการทดลองกับเทอร์โมไซฟอนขนาด 4-14 mm โดยรักษาอุณหภูมิไว้ที่  $38 \pm 3^\circ\text{C}$  โดยค่า Aspect ratio คงที่ที่ 12 ผลการทดลองแสดงไว้ในรูป 1.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤติกับค่าบอนด์นัมเบอร์ แสดงให้เห็นว่าบอนด์นัมเบอร์มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤติ ผลจากการทดลองตรงกับสมการของ Tien and Chung แต่ข้อมูลทั้งหมดยังบกพร่องที่บอนด์นัมเบอร์สูงๆ ในการที่จะทำนายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

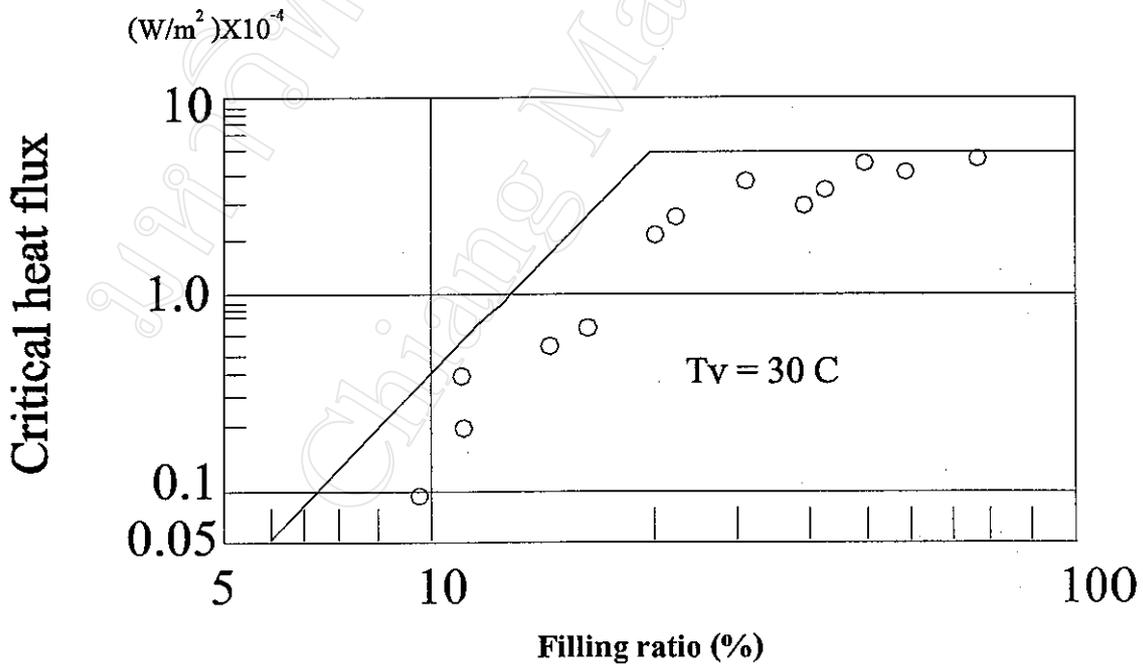
#### 1.2.1.3 การศึกษาเชิงทัศน์ของรูปแบบการไหล และขีดจำกัดการทำงาน

Shiraishi et al. [14] ได้ทำการศึกษาเชิงทัศน์ขีดจำกัดการทำงานของเทอร์โมไซฟอนแบบเปิดสองสถานะแนวตั้ง โดยพิจารณารูปแบบการไหลภายในท่อเทอร์โมไซฟอนที่อัตราส่วนการเติมต่างๆ โดยใช้สาร Freon 113 เป็นสารทำงาน พบว่าที่อัตราส่วนการเติมน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ การไหลเป็นแบบวงแหวนและแบบวงแหวนและเกิดการไหม้เนื่องจากการขาดฟิล์มของเหลวไหลกลับไปเคลือบส่วนล่าง

ของส่วนทำระเหย ในขณะที่อัตราส่วนการเติมที่มีค่ามากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ การไหม้เกิดจากปรากฏการณ์การท่วม และการไหม้เกิดขึ้นที่บริเวณส่วนบนของส่วนทำระเหย ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนการส่งผ่านความร้อนวิกฤตกับอัตราส่วนการเติมเป็นดังรูป 1.5



รูป 1.4 เปรียบเทียบผลของ Bond number กับอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตที่มุม 90 องศา กับค่าที่ได้จากสมการต่างๆ [15]



รูป 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่งผ่านความร้อนวิกฤตกับอัตราส่วนการเติม [14]

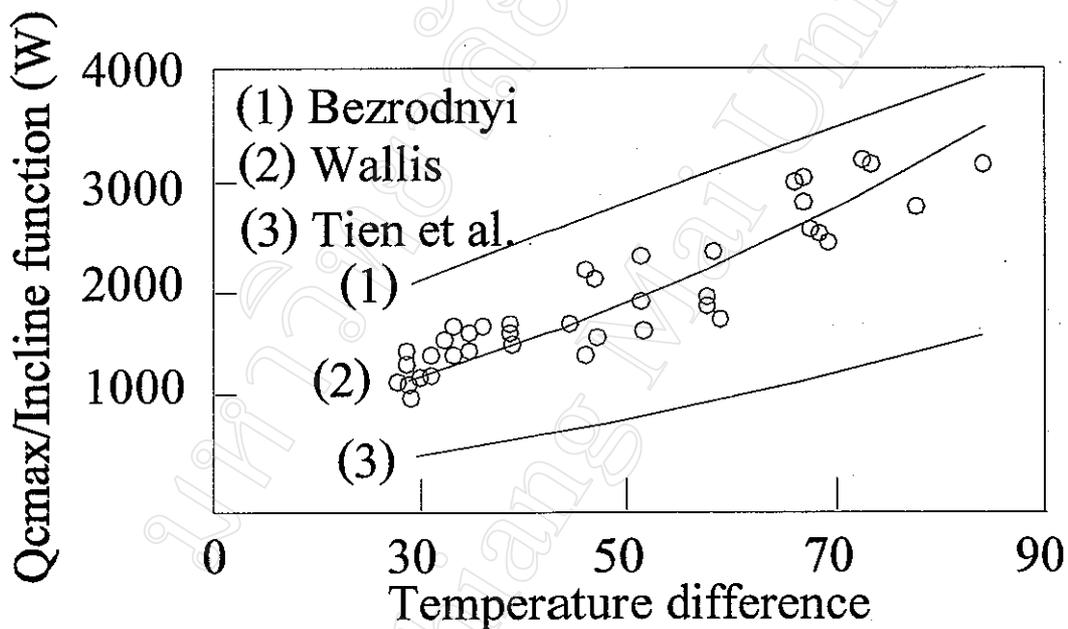
## 1.2.2 เทอร์โมไซฟอนที่มุมเอียง

### 1.2.2.1 แบบจำลองขีดจำกัดสมรรถนะ

Nguyen-Chi and Groll [9] ได้พิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนการเติม มุมเอียง และอุณหภูมิทำงาน ต่อขีดจำกัดการพา พบว่าอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดจะลดลงเป็นฟังก์ชันของมุมเอียง ( $\beta$ ) ดังนี้

$$f(\beta) = \left[ \frac{\beta}{180^\circ} + \sqrt{\sin 2\beta} \right]^{0.65}$$

ข้อมูลจากการทดลองของ Nguyen-Chi and Groll เข้ากันได้ดีกับแบบจำลองของ Wallis ซึ่งได้แสดงผลไว้ในรูป 1.6



รูป 1.6 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับความสัมพันธ์ของ Wallis Bezrodnyi และ Tien and Chung [9]

Shiraishi et al. [18] ได้มีการสร้างแบบจำลองทางกายภาพ เพื่อทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงต่างๆ โดยพิจารณาจุดที่คลื่นเกิดความไม่เสถียร แบบจำลองที่ได้มี

ลักษณะสอดคล้องเชิงคุณภาพกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แต่ไม่สามารถทำนายค่าที่ถูกต้องเชิงปริมาณได้

Shiraishi et al. [17] ได้สร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในเทอร์โมไซฟอนเอียง แบบปิดสองสถานะ โดยใช้เทอร์โมไซฟอนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14 และ 21 มิลลิเมตร และค่าสัดส่วนของความยาวส่วนทำระเหยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่า 11, 22 และ 32 ใช้สารทำงานเป็น Fluorinert (FC72), Freon R113, Alternative Freon (DF123), Ethanol และน้ำ พบว่าตัวแปรไร้มิติที่ทำการปรับปรุงใหม่คือ คูหาเทสต์เซนัมเบอร์ปรับปรุง (Modified Kutateladze Number) สามารถใช้สร้างสมการอิมพีริกัลซึ่งใช้ทำนายค่า  $Q_{critical}/Q_{c90}$  ด้วยความคลาดเคลื่อน  $\pm 10$  เปอร์เซ็นต์

Bontemps et al. [2] ได้สร้างตัวคูณประจํามุมเอียงเพื่อหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงต่างๆจากข้อมูลการทดลองของเทอร์โมไซฟอนเหล็กและสารทำงานเป็น Toluene ดังนี้

$$f(\beta) = \left[ \frac{\sin(\beta)}{(0.635 - 0.35 \cos(2\beta))^{1.5}} \right]^{1.5}$$

Feldman and Srinivisan [5] ได้สร้างตัวคูณประจํามุมเอียงเพื่อหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงต่างๆดังนี้

$$f(\beta) = (\sin \beta)^{0.206}$$

ความสัมพันธ์นี้เกิดจากการทดสอบกับสารทำงาน R113 methanol และน้ำ ที่ค่ามุมเอียงจากแนวราบ 0-20 องศาเท่านั้น

### 1.2.2.2 ผลของคุณลักษณะทางความร้อนที่สภาวะวิกฤติ

Terdtoon et al. [19] ได้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนวิกฤตต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่  $90^{\circ}\text{C}$  ( $Q_{critical}/Q_{c90}$ ) ที่มุมเอียงใดๆ โดยใช้เทอร์โมไซฟอนทำจาก Stainless Steel โดยใช้สารทำงาน 3 ชนิดคือ Ethanol R-113 และ Fluorinert (FC-72) ที่อัตราการเติม 80% 50% และ 30% โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤติหาในช่วงของ Isothermal ในการทดลองนี้ทำใ้ค่าจุดเดือด โดยอัตราส่วน  $Q_{critical}/Q_{c90}$  กำหนดเป็นฟังก์ชันของมุมเอียง

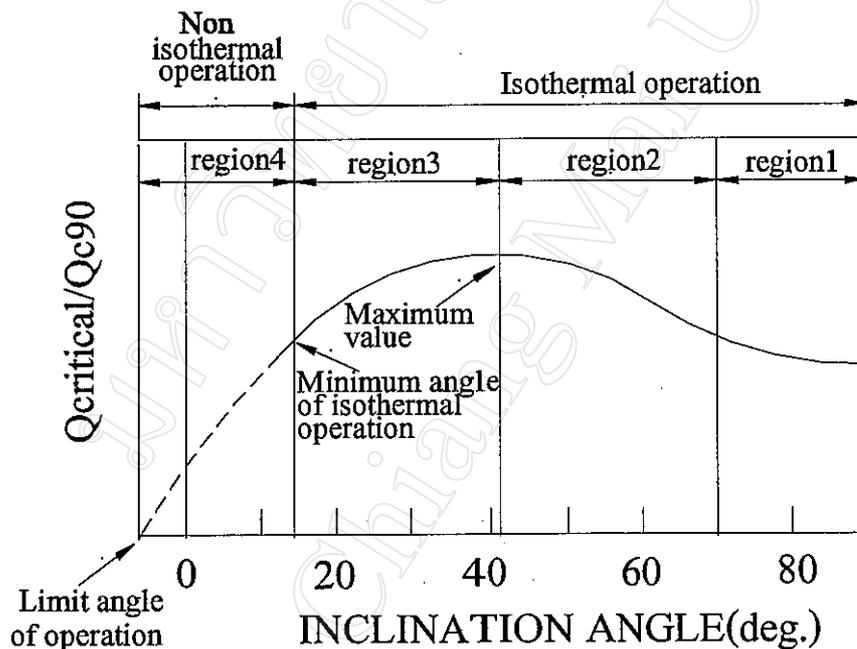
จากผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วน  $Q_{critical}/Q_{c90}$  ของของไหลทำงานทั้งหมดขึ้นอยู่กับมุมเอียง ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 4 ช่วงใหญ่ๆ ดังแสดงในรูป 1.7 และรูป 1.8 จากรูป

ช่วงที่ 1 ตำแหน่งตั้งตรงถึงประมาณ 70 องศา ในช่วงนี้การเพิ่มของ  $Q_{critical}$  จะขึ้นอยู่กับ การลดลงของมุมเอียง จะไม่ขึ้นกับอัตราการเติม

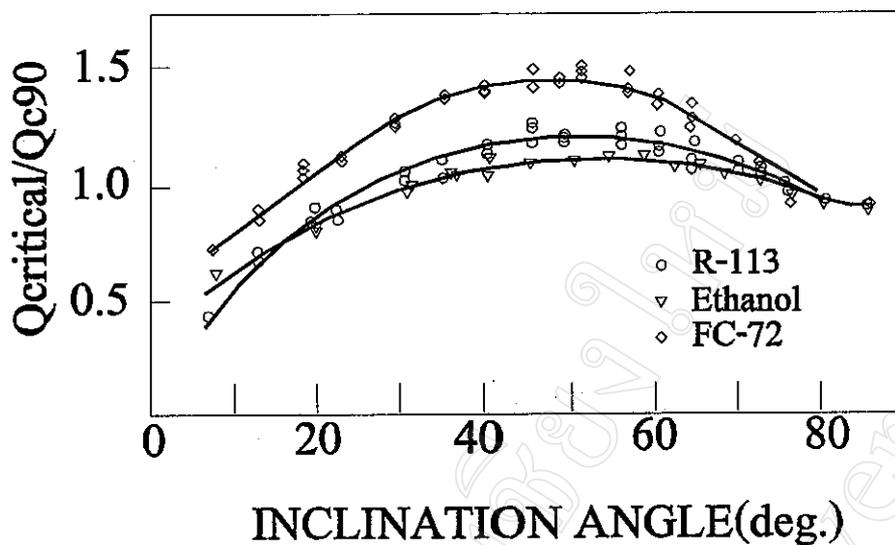
ช่วงที่ 2 ที่มุม 70 องศาถึงประมาณ 50 องศา  $Q_{critical}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงลดลงจนถึงค่า สูงสุด อัตราการเติมมีผลต่อ  $Q_{critical}/Q_{c90}$

ช่วงที่ 3 ที่มุม 50 องศาถึงมุมเล็กที่สุดที่เทอร์โมไซฟอนสามารถทำงานได้ในภาวะไอโซ- เทอร์มอล (Isothermal) ในช่วงนี้  $Q_{critical}$  จะลดลงเมื่อมุมเอียงลดลง และอัตราการเติมมีผลมากต่ออัตรา- ส่วน  $Q_{critical}/Q_{c90}$  และมุมเล็กที่สุดที่เทอร์โมไซฟอนสามารถทำงานได้ในภาวะไอโซเทอร์มอล

ช่วงที่ 4 ที่มุมเล็กที่สุดที่เทอร์โมไซฟอนสามารถทำงานได้ในภาวะ จนถึง 0 องศา ในช่วง นี้จะมีบางส่วนที่ด้านในของส่วนทำระเหยที่ไม่เป็ยกคังนั้นการกระจายอุณหภูมิภายในจึงไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่สามารถกำหนดค่า  $Q_{critical}$  ได้



รูป 1.7 ลักษณะของ  $Q_{critical}/Q_{c90}$  ที่มุมเอียงต่างๆ [19]



รูป 1.8 อัตราส่วนของ  $Q_{critical}/Q_{c90}$  ที่มุมเอียงใดๆ [19]

### 1.2.2.3 การศึกษาเชิงทัศน์ของรูปแบบการไหล และขีดจำกัดการทำงาน

Shiraishi et al. [16] ได้ทำการศึกษารูปแบบการไหลเชิงทัศน์ในเทอร์โมไซฟอนเชิงแบบปิดสองสถานะ โดยใช้เทอร์โมไซฟอนที่มีความยาวรวม 930 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 13 มิลลิเมตร ส่วนทำระเหยทำจากแก้ว ทำการสังเกตที่มุมเอียง 90, 80, 70, 60, 55, 45, 35, 20 และ 5 องศา ทำการบันทึกรูปแบบการไหลและวัดอัตราการส่งผ่านความร้อน พบว่ารูปแบบการไหลในเทอร์โมไซฟอนสามารถจำแนกได้ตามค่ามุมเอียง พบการไหลแบบวงแหวนที่แนวตั้งหรือมุมเอียงมีค่าใกล้เคียง แนวตั้ง การแห้งเกิดจากการที่สารทำงานควบแน่นไม่สามารถไหลกลับลงมาได้ เนื่องจากปลั๊กของเหลวอุดไว้ ปลั๊กของเหลวนี้เกิดจากการที่ไอมีความเร็วมาพอที่จะต้านการไหลของของเหลวและดันของเหลวไว้ ที่มุมเอียงมีค่าลดลงรูปแบบการไหลเป็นแบบคลื่น ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าในกรณีของการไหลแบบคลื่น จะเกิดการแห้งที่ผนังส่วนทำระเหยเพราะไม่มีสารทำงาน ซึ่งเป็นผลมาจากคลื่นที่ผิวหน้าของเหลวเกิดความไม่เสถียรภาพทำให้ของเหลวไหลกลับลงมาไม่ได้ สารทำงานในส่วนล่างลงมาจึงน้อยลงทำให้คลื่นที่ช่วงนี้มีขนาดความสูงน้อยลงจนไม่เพียงพอที่จะแตะผนังส่วนบนของส่วนทำระเหยให้เปียกอยู่ได้

### 1.2.3 การคำนวณหาความหนาฟิล์มของไหลผ่านระนาบโดยอาศัยสมการควบคุมพื้นฐาน

Von Karman [12] สร้างสมการทำนายความหนาของฟิล์มของไหล ในกรณีการไหลผ่านแผ่นเรียบโดยอาศัยการตั้งสมการควบคุมโดยตั้งปริมาตรควบคุมไว้ที่ฟิล์มของเหลว และโดยการให้

เงื่อนไขที่ขอบได้อย่างเหมาะสมจะสามารถทำนายความหนาฟิล์มที่ไหลผ่านพื้นผิวได้ โดยอาศัยการประมาณสมการการกระจายความเร็วที่เหมาะสมกับเงื่อนไขที่ขอบนั้นๆ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.3.1 เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์การไหลภายในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง เพื่อทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดที่มุมเอียงที่เหมาะสมค่าหนึ่ง

1.3.2 เพื่อสร้างแบบจำลองการไหลภายในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง เพื่อทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดที่มุมเอียง 0 องศาถึง 80 องศา

1.3.3 แบบจำลองชนิดจำกัดสมรรถนะที่สร้างขึ้นนี้จะมีความแม่นยำกว่าแบบจำลองทางกายภาพของ Shiraishi et al. [18]

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1.4.1 มีแบบจำลองที่สามารถทำนายอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในเทอร์โมไซฟอนที่มุมเอียงค่าต่างๆ ทำให้สามารถเลือกใช้เทอร์โมไซฟอนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.4.2 มีแบบจำลองที่สามารถคำนวณความหนาของฟิล์มของเหลวที่เคลือบผนังเทอร์โมไซฟอนทำให้สามารถกำหนดอัตราการส่งผ่านความร้อนที่สภาวะปกติได้

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 เพื่อสร้างแบบจำลองชนิดจำกัดสมรรถนะในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง ที่สามารถทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดที่มุมเอียงที่เหมาะสมค่าหนึ่ง

1.5.2 แบบจำลองชนิดจำกัดสมรรถนะในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียงนี้ จะสามารถทำนายค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนสูงสุดที่มุมเอียง 0 องศาถึง 90 องศา

1.5.3 แบบจำลองการไหลภายในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียงนี้ จะทำนายการไหลได้ในช่วงส่วนสูงสุดของหน้าตัดท่อถึง 20 องศาวัดจากส่วนล่างสุดไปทั้งสองข้างของหน้าตัดท่อ เนื่องจากในส่วน 20 องศาวัดจากส่วนล่างสุดของหน้าตัดท่อไปทั้งสองข้างนั้น จะเป็นการไหลบรรจบกันของของไหลทั้งสองข้างทำให้การไหลแปรปรวนและไม่สามารถอธิบายการไหลในช่วงนี้ได้

1.5.4 แบบจำลองชนิดจำกัดสมรรถนะนี้ใช้ทำนายชนิดจำกัดสมรรถนะ ในช่วงอุณหภูมิใช้งานของสารทำงานใดๆ เท่านั้น