



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดเพื่อใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม
Development of boiling heat transfer for use in industry



T137638

นายอดิเรก สุริยะวงศ์
นายปัญญา แดงวิไลลักษณ์
นายศิระ สายศร
นายไพรัตน์ เพชรศิริ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH

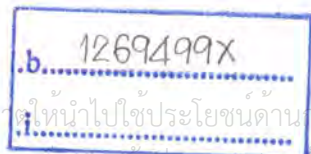
0127ก

2557

เลขหมู่

เลขทะเบียน 137638

ปี พ.ศ. 2558



เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การพัฒนาการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดเพื่อใช้ในโรงงานด้านอุตสาหกรรม

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 499,600 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2556 ถึง 30 กันยายน 2557

หัวหน้าโครงการ นายอดิเรก สุริยะวงศ์ ผู้ร่วมโครงการ นายปัญญา แดงวิไลลักษณ์ ดร. ศิริระ สายศร และ นายไพรัตน์ เพชรศิริ หน่วยงานต้นสังกัด วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่น ลักษณะของพื้นผิวให้ความร้อนเป็นทองแดงวางในแนวราบ ซึ่งพื้นผิวของทองแดง มีความขรุขระเท่ากับ $0.2 \mu\text{m}$ และได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนให้กับสารทำงาน การทดลองได้ศึกษาผลของจำนวนใบของ twisted tape และ ระยะห่างระหว่างปลายของ twisted tape กับพื้นผิวให้ความร้อน ที่มีผลต่อ nucleate pool boiling ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ความดันบรรยากาศ จากผลการทดลองโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับ non twisted tape ที่ twisted tape ชนิด 2 ใบ ที่ระยะห่าง 15 10 และ 5 mm เพิ่มขึ้นเป็น 0% 77% และ 57% ตามลำดับ ชนิด 3 ใบ ที่ระยะห่าง 15 10 และ 5 mm เพิ่มขึ้นเป็น 51% 59% และ 83% ตามลำดับ และชนิด 4 ใบ ที่ระยะห่าง 15 10 และ 5 mm เพิ่มขึ้นเป็น 68% 26% และ 66% ตามลำดับ นอกจากนี้ ในทุกๆการทดลองผลของระยะห่างระหว่าง twisted tape กับพื้นผิวให้ความร้อนพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ Non twisted tape โดยที่ระยะของ twisted tape ที่ 15 mm ของ twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ เพิ่มขึ้นเป็น 0% 51% และ 68% ตามลำดับ ที่ระยะห่าง 10 mm ของ twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ เพิ่มขึ้นเป็น 77% 59% และ 26% ตามลำดับ และ ที่ระยะห่าง 5 mm ของ twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ เพิ่มขึ้นเป็น 57% 83% และ 66% ตามลำดับ นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนแบบ Pool boiling ชนิด 3 ใบ สามารถรับแรงจาก bubble ได้ดีกว่าชนิด 2 และ 4 ใบ ตามลำดับ และผลของระยะห่างที่แตกต่างกันพบว่า ความปั่นป่วนของ working fluid เพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะห่างระหว่างพื้นผิวให้ความร้อนของปลาย twisted tape ของชนิด 2 3 และ 4 ใบ ที่ 5 mm จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด

คำสำคัญ: การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทความร้อนสองสถานะ การเดือด

Research Title: Development of boiling heat transfer for use in industry

Research: Mr. Adirek Suriyawong, Mr. Panya Duangvilulux, Dr. Sira Saisorn and
Mr. Chairat Petkeree

Faculty: Prince of Chumphon Campus **Department:** Engineering

ABSTRACT

This research was to study the characteristics of nucleate pool boiling heat transfer of distilled water. Horizontal circular plates made from copper with different roughness values of 0.2 μm are used as heating surface and twisted tape is installed above the heating surface to increase turbulence of working fluid. The experiment is studied about result of blade number of twisted tape and result of distance between end of the twisted tape and heating surface effect to nucleate pool boiling curve and the heat transfer coefficient at atmospheric pressure. The experimental result of twisted tape is installed above the heating surface. The heat transfer coefficient of twisted tape is higher than that compared with non twisted tape. At the 2 blades with distance 15, 10 and 5 mm increase 0%, 77% and 57% respectively, at the 3 blades with distance 15, 10 and 5 mm increase 51%, 59% and 83% respectively, and 4 blades with distance 15, 10 and 5 mm increase 68%, 26% and 66% respectively. In addition the effect of twisted tape distance it was found that, the heat transfer coefficient of installed twisted tape is increased as compared with the non twisted tape. At distance is 15 mm of twisted tape type 2, 3 and 4 blades increase 0%, 51% and 68% respectively. At distance is 10 mm of twisted tape type 2, 3 and 4 blades increase 77%, 59% and 26% respectively and at distance is 5 mm of twisted tape type 2, 3 and 4 blades increase 57%, 83% and 66% respectively. In addition the phenomena experiment of pool boiling heat transfer show that the twisted tape 3 blades type can receive force from bubble better than 2 blades and 4 blades respectively. And the effect of difference spacing found. Agitation of the working fluid increase as the distance between the heating surface of the twisted tape type 2, 3 and 4 blades at 5 mm to provide heat transfer coefficient of the best.

Keywords: Heat transfer enhancement, Two-phase heat transfer, Boiling

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุนจากท่านรักษาการแทนรองอธิบดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมธิญชัยภักดิ์ ไชยสิทธิ์ คณะกรรมการวิจัย เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย เจ้าหน้าที่พัสดุ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายการเงิน ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทั้งกรุงเทพฯ และวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อติเรก สุริยวงค์
ปัญญา แดงวิไลลักษณ์
ศิระ สายศร
ไพรัตน์ เพชรศิริ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
รายการสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง	6
3.1 ทฤษฎี	6
3.2 Pool boiling	8
3.2.1 การเกิดฟองของ Pool boiling	10
3.2.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)	12
3.2.3 Nucleate boiling	13
3.2.4 ฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ (Critical heat flux)	14
3.2.5 Transition boiling	15
3.2.6 Film boiling	15
3.3 การคำนวณ	16
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	18
4.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	18
4.1.1 ระบบ Pool boiling	19
4.1.2 ระบบไฟฟ้า	19
4.1.3 ระบบวัดอุณหภูมิ	20
4.1.4 ระบบระบายความร้อน	20
4.1.5 ระบบเป่าลม	20
4.2 ขั้นตอนการทดลอง	20
บทที่ 5 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	22
5.1 เทียบสอบอุปกรณ์การทดลอง	22
5.2 ผลของระยะห่างของ twisted tape กับพื้นผิวให้ความร้อน	23

สารบัญ

	หน้า
5.3 ผลของจำนวนใบของ twisted tape	27
5.4 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์	31
บทที่ 6 สรุปลและข้อเสนอแนะ	42
6.1 สรุป	42
6.2 ข้อควรระวังในงานวิจัย	42
6.3 ข้อเสนอแนะ	42
บรรณานุกรม	43
ภาคผนวก ก อุปกรณ์การทดลอง	45
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	48
ภาคผนวก ค สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	111
ประวัติผู้วิจัย	113



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัย	3
ค.1 สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	112



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 แผนภาพความดัน – อุณหภูมิแสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์	7
3.2 Nucleate boiling ใน (a) Pool boiling, (b) Flow boiling	7
3.3 Nucleate pool boiling ใน Sub-cooled boiling และ Saturated boiling	8
3.4 แสดงลักษณะของ Pool boiling curve ที่ได้จากการทดลอง	9
3.5 Pool boiling curve ของน้ำที่ความดันบรรยากาศ	10
3.6 การเกิดฟองในอุดมคติ	11
3.7 แสดงความดันที่กระทำกับฟองและความตึงผิวของฟอง	11
3.8 แสดงปรากฏการณ์ของการพาความร้อนแบบธรรมชาติที่เวลาต่างๆ กันโดยเริ่มจาก (a) → (f)	12
3.9 Nucleate pool boiling ในช่วงของ (a) Onset of nucleate boiling (b) Low heat fluxes (c) High heat fluxes	13
3.10 แสดงลักษณะของ Pool boiling ที่ฟลักซ์ความร้อนวิกฤต	14
3.11 ลักษณะของ Pool boiling ในช่วงของ Transition boiling	15
3.12 ลักษณะของ Pool boiling ในช่วงของ Film boiling	15
4.1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของ Pool boiling	18
4.2 แสดงลักษณะของ Boiling test section	19
4.3 แสดงลำดับขั้นตอนของการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling	21
5.1 การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากการทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Rohsenow และการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ	22
5.2 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนที่ระยะห่าง 5 mm	24
5.3 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนที่ระยะห่าง 10 mm	25
5.4 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนที่ระยะห่าง 15 mm	26
5.5 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape 2 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	28
5.6 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape 3 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	29
5.7 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape 4 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	30
5.8 แสดงปรากฏการณ์การเดือดของน้ำกลั่นบนพื้นผิวทองแดงเพื่อทำการเทียบอุปกรณ์การทดลอง	32
5.9 แสดงปรากฏการณ์การเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบและระยะห่าง 5 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	33

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
5.10 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ และ ระยะห่าง 10 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	34
5.11 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ และ ระยะห่าง 15 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	35
5.12 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ และ ระยะห่าง 5 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	36
5.13 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ และ ระยะห่าง 10 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	37
5.14 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ และ ระยะห่าง 15 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	38
5.15 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ และ ระยะห่าง 5 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	39
5.16 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ และ ระยะห่าง 10 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	40
5.17 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ และ ระยะห่าง 15 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	41
ก.1 แสดงชุดอุปกรณ์การทดลอง Boiling	46
ก.2 แสดงชุดอุปกรณ์ทำความเย็นให้กับการทดสอบ Pool boiling	47
ข.1 การเปรียบเทียบค่า heat flux ที่ได้จากการทดลองสหพันธ์ของ Rohsenow และการทดลอง ของนักวิจัยท่านอื่นๆ	49
ข.2 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 5 mm.	52
ข.3 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 10 mm.	53
ข.4 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 15 mm.	54
ข.5 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 5 mm.	55
ข.6 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 10 mm.	56
ข.7 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 15 mm.	57
ข.8 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 5 mm.	58

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ข.9 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 10 mm.	59
ข.10 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 15 mm.	60
ข.11 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะห่าง 5 mm.	63
ข.12 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะห่าง 10 mm.	64
ข.13 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะห่าง 15 mm.	65
ข.14 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะห่าง 5 mm.	66
ข.15 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะห่าง 10 mm.	67
ข.16 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะห่าง 15 mm.	68
ข.17 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะห่าง 5 mm.	69
ข.18 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะห่าง 10 mm.	70
ข.19 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะห่าง 15 mm.	71
ข.20 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	74
ข.21 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	75

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
ข.22 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	76
ข.23 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	77
ข.24 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	78
ข.25 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	79
ข.26 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	80
ข.27 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	81
ข.28 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	82
ข.29 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นบนพื้นผิวทองแดงเพื่อทำการเทียบอุปกรณ์การทดลอง	84
ข.30 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	85
ข.31 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	86
ข.32 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	87
ข.33 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	88
ข.34 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	89
ข.35 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	90
ข.36 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 40 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	91
ข.37 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 40 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	92
ข.38 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบขนาด 40 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ข.39 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	94
ข.40 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	95
ข.41 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	96
ข.42 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	97
ข.43 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	98
ข.44 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	99
ข.45 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบขนาด 40 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	100
ข.47 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบขนาด 40 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	101
ข.48 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	102
ข.49 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	103
ข.50 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 30 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	104
ข.51 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	105
ข.52 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	106
ข.53 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 35 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	107
ข.54 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 40 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	108
ข.55 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 40 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	109
ข.56 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบขนาด 40 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมายสัญลักษณ์
A	พื้นที่ (m^2)
C_p	ความร้อนจำเพาะ พิจารณาที่ความดันคงที่ ($J/kg K$)
d	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 K$)
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการกลาย (J/kg)
I	กระแสไฟฟ้า (A)
k	การนำความร้อน ($W/m K$)
M	มวลโมเลกุล (Mol)
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
Nu	Nusselt number
P	ความดัน (N/m^2)
Pc	ความดันวิกฤต (N/m^2)
Pr	Prandtl number
\dot{Q}	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยเวลา (W)
\dot{q}	ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)
R	ความขรุขระ (μm)
Re	Reynolds number
r	รัศมี (m)
T	อุณหภูมิ (K)
V	ศักย์ไฟฟ้า (V)
v	ความเร็ว (m/s)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)
σ	ความตึงผิว (N/m)
μ	ความหนืดจลน์ ($kg/m s$)
ε	Emissivity ของพื้นผิวให้ความร้อนตัวห้อยด้วยก
B	การเดือด (Boiling)
b	ฟอง
g	สถานะแก๊ส
l	สถานะของเหลว
sat	ของเหลวอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โลกในยุคปัจจุบันมีการขยายตัวหลายด้านทั้งในด้านเศรษฐกิจ การเพิ่มจำนวนของประชากร และที่สำคัญคือในภาคอุตสาหกรรม ที่มีอิทธิพลเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งพลังงานในปัจจุบันมีแนวโน้มลดลง และอาจหมดไปภายในอนาคตอันสั้น หลายประเทศจึงได้มีแผนที่จะลดการใช้พลังงาน โดยให้นักวิจัยออกแบบอุปกรณ์มาทดแทนพลังงานที่ใช้อยู่ จากธรรมชาติ pool boiling จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ และประโยชน์สูงสุด เช่น ในวัฏจักรผลิตกำลังงาน (power cycle) และวัฏจักรการทำความเย็น (refrigeration cycle)

อย่างไรก็ตาม pool boiling เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและมีการพัฒนาในสองด้านคือ 1.ปรับปรุงพื้นผิวให้ความร้อน 2.ปรับปรุงสารทำงาน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนเป็นการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ จะเกิดฟองขึ้นบริเวณที่ผิวสัมผัสของของแข็งซึ่งจะมีความร้อนแฝงเกิดขึ้นด้วยเหตุนี้จึงได้นำหลักการของ pool boiling มารองรับความต้องการในการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมที่มีตัวเลขการใช้พลังงานมากที่สุด ซึ่งในปี ค.ศ.2040 คาดว่า จะมีการใช้พลังงานมากกว่าปี ค.ศ.2012 ถึง 30% จึงจำเป็นต้องหาพลังงานรูปแบบใหม่มาทดแทน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.ศึกษาถึงปรากฏการณ์ pool boiling ที่ติดอุปกรณ์ twisted sheet เหนือพื้นผิวให้ความร้อน
- 2.ศึกษาผลของ มุมบิด จำนวนของใบ และระยะห่างจากพื้นผิวให้ความร้อน ของ twisted sheet ที่มีผลต่อ boiling curve และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ
2. พื้นผิวให้ความร้อนเป็นแผ่นกลมวางในแนวราบ
3. อุปกรณ์ twisted tape มีลักษณะการติดตั้งจำนวนใบเป็น 2 3 และ 4 ใบ
4. ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ twisted tape กับพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนที่ 15, 10 และ 5 mm

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ปัจจุบันการประหยัดพลังงานเป็นเรื่องที่ทุกคนให้ความสนใจ ระบบของการถ่ายเทความร้อนเป็นสิ่งหนึ่งที่นักวิจัยและพัฒนาให้ความสนใจ อุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนแบบสองสถานะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดและมีใช้กันในอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนในปัจจุบัน Pool boiling เป็นทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่มีใช้ในปัจจุบัน การพัฒนาอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling สามารถทำได้สองลักษณะคือ ปรับปรุงพื้นผิวให้ความร้อน และการปรับปรุงของไหลทำงานที่ใช้ในระบบ ในงานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling โดยการติดตั้ง twisted sheet บนพื้นผิวให้ความร้อน เพื่อสร้างความปั่นป่วนของของไหลทำงานบนพื้นผิวให้ความร้อนนั้น งานวิจัยนี้มีวิธีดำเนินการดังนี้

1. ทำ simulation model จากซอฟต์แวร์สำเร็จรูปเพื่อหาขนาด มุมบิดและจำนวนใบของ twisted sheets ที่ดีที่สุดสำหรับการสร้างความปั่นป่วนบนพื้นผิวให้ความร้อน
2. สร้าง twisted sheets จากการขึ้นโมลเพื่อให้ได้ ขนาด มุมบิดและจำนวนใบของ twisted sheets ที่ถูกต้อง
3. สร้างอุปกรณ์การทดลอง ดังรูปที่ 8.1 โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูง เพื่อให้ได้ข้อมูลการทดลองที่ความถูกต้องและความแม่นยำสูง ก่อนทำการทดลองจะทำการ calibration อุปกรณ์ โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการ pool boiling และข้อมูลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ
4. ทำการทดลองตามขั้นตอน ดังรูปที่ 8.3 เป็นแนวทางในการทดสอบที่ได้ผลของข้อมูลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำและใช้เวลาในการทดลองน้อยที่สุด ในหนึ่ง condition จะทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง
5. นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 1, 2 และ 3 นำข้อมูลการทดลองมาทำการสร้างกราฟและเทียบผลการทดลองกับ simulation model พร้อมอธิบายผลการทดลอง
6. นำข้อมูลการทดลองมาสร้างเป็น condition สำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ twisted sheets ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน
7. นำเสนอข้อมูลโดยการตีพิมพ์ในวารสาร และนำเสนอในประชุมวิชาการ โดยมีตารางแสดงแผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
	56	56	56	57	57	57	57	57	57	57	57	57
1. ศึกษาข้อมูลพื้นฐาน และงานวิจัยที่ เกี่ยวข้องกับ												
2. วางแนวคิดและ ออกแบบอุปกรณ์การ ทดลอง												
3. ดำเนินการสร้าง อุปกรณ์การทดลอง												
4. ทำการทดลองและ ประเมินผลการทดลอง												
5. วิเคราะห์และ สรุปผลการทดลอง												
6. เขียนรายงานและ นำเสนอผลการวิจัย												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling และค่า pool boiling heat transfer coefficient ที่มีผลต่อพื้นผิวให้ความร้อนและทราบถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

C.K. Guan et al. [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลรูปแบบใหม่และการถ่ายเทความร้อนที่มีการเดือดในแนวแกน x เป็นการแยก macrolayer ของของเหลวออกจากพื้นผิวให้ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงจาก nucleate ไปเป็นการเดือดแบบฟิล์มมีลักษณะการไหลเวียนของน้ำในขณะที่เดือดซึ่งทดสอบเกี่ยวกับเพนเทนและเฮกเซนบนพื้นผิวของทองเหลืองที่มีความดันแตกต่างกันคือ 150 300 และ 450 kPa ซึ่ง pool boiling จะเป็นแบบแนวนอนเช่นเดียวกับการเดือดของ Galloway และ Mudawar

D. Cooke and S. G. Kandlikar [2] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของการเดือดโดยการปรับเปลี่ยนพื้นผิวให้ความร้อน ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศด้วยทองแดง เพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวที่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับพื้นผิวธรรมดา จากผลการทดลองพบว่าพื้นผิวของทองแดงจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของฟองที่สามารถถ่ายเทความร้อนผ่านความพรุนของทองแดง สืบเนื่องจากความกว้างความลึกของทองแดงที่แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งประสิทธิภาพสอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้ทำการบันทึกไว้

C.M. Rops and R. Lindken [3] ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในช่วงการเดือด nucleate บนพื้นผิวให้ความร้อน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 15 mm ถึง 45 mm พบว่าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเดือด ขนาดและความลึกของ bounding ไม่มีผลกระทบต่อพื้นผิวให้ความร้อน ภาพถ่ายความเร็วสูงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนมีการไหลเวียนสวนทางกันกัน สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องในรูปแบบการไหลที่พบใน Singularisation เป็นกระบวนการเดือดแบบ nucleate

R.Pastuszko et al. [4] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อนในท่อที่วางในแนวแกน X กับ แกน Y เพื่อนำมาใช้ระบายความร้อนในระบบอเล็กทรอนิกส์ ทำการทดสอบด้วยเอทานอล และ R-123 ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีฉนวนหุ้มทองแดงมีความหนา 0.3 0.4 และ 0.5 mm เพื่อศึกษาความถี่ของนิวเคลียสและรูปแบบการไหลของฟองที่เกิดขึ้น จึงได้จำลองท่อและวิเคราะห์รูปแบบการเดือดที่เกิดขึ้นโดยผิวภายนอกของท่อเกิดการขยายตัวของ ฟลักซ์ความร้อน ทำให้ฟองเกิดการหมุนเวียนคงที่ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีทำให้ทราบข้อแตกต่างของการไหลที่อยู่ในช่วงของการเดือด

R. Chen et al. [5] ทำการศึกษากลไกการเดือดที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ ใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์การทำความเย็น เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนขณะที่เพิ่ม CHF และ HTC ทำให้ลดการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับของเหลวชนิดอื่น พลังงานที่เกิดขึ้นจากของเหลวที่มีทองแดงเป็นพื้นผิวให้ความร้อนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่ม CHF และ HTC ได้ 100%

N.Singh et al. [6] ศึกษาการเดือดที่ให้ความร้อนจากพื้นผิวโดยเครื่องกำเนิดความร้อนที่ประกอบด้วยเวเฟอร์ซิลิคอนเปลือยที่เคลือบคาร์บอนในผนังท่อ โดยมีทองแดงที่ติดกับเครื่องให้ความร้อนวางในแนวตั้ง โดยใช้ไอออนเป็นสารในการทดสอบอุณหภูมิของของเหลวที่ใช้ในการทดลองเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ การทดลองจะมีอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ในขณะที่สารเกิดการไหลความร้อนก็จะลดลงความเย็นก็จะเพิ่มขึ้น จึงได้ทำการทดสอบการไหลเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมของการเดือดต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

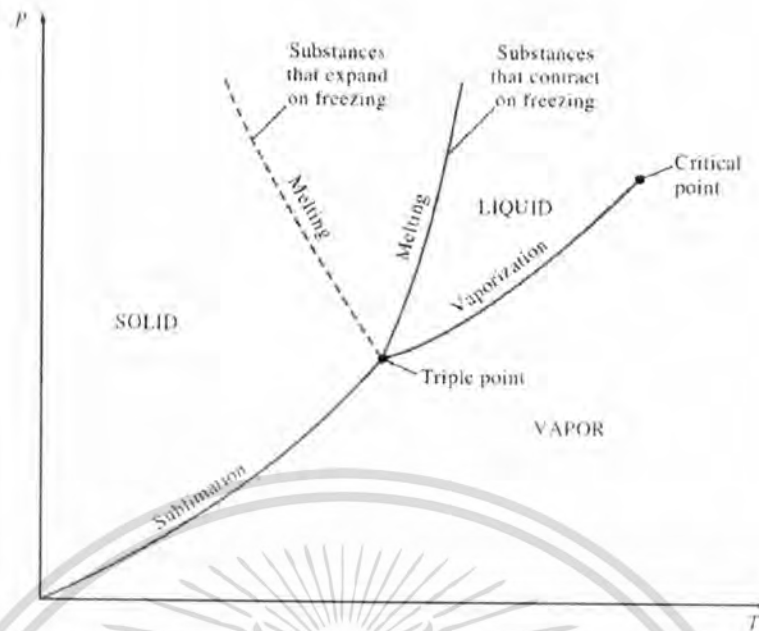
บทที่ 3

ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎี

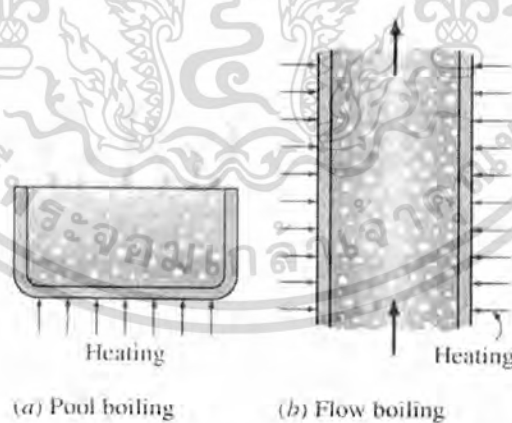
การเดือดเป็นการถ่ายเทความร้อนรูปแบบหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ในชีวิตประจำวันเราก็ได้สัมผัสและเคยเห็นการเดือดเช่น การหุงข้าว การเดือดของสาร ทำความเย็นในคอยล์เย็น (evaporator) ด้วยเหตุนี้จึงได้มีนักวิจัยที่สนใจศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์และลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการเดือดในรูปแบบต่างๆ การเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์โดยกระบวนการของการเดือดจะเกิดขึ้นบนเส้นของการกลายเป็นไอ (vaporization) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งระหว่างของเหลว (liquid) กับสถานะไอ (vapor) การถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling จะทำการศึกษาโดยควบคุม heat flux ที่จ่ายให้กับขดลวด heater ที่ถูกแช่อยู่ในน้ำที่ความดันบรรยากาศ และในปี ค.ศ. 1367 Benner ได้ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวด้วยความร้อน จากการทดลองในลักษณะนี้มีจุดเด่นที่การทำ pool boiling curve ในช่วง transition boiling สถานะของ Pool boiling curve จากการศึกษารายละเอียดของการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling ในลักษณะต่างสามารถแบ่งได้ตามกฎของการเดือดได้ 4 แบบคือ natural convective boiling, transition boiling และ pool boiling curve ของน้ำที่ความดันบรรยากาศซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $T_s - T_{sat}$ กับ Flux ความร้อน

ด้วยเหตุนี้จึงได้มีนักวิจัยจำนวนมากที่มีความสนใจเกี่ยวกับการศึกษาวิจัยถึงปรากฏการณ์และคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของการเดือดในรูปแบบต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ในรูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพความดันกับอุณหภูมิที่แสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์ โดยที่กระบวนการของการเดือดจะเกิดบนเส้นของการกลายเป็นไอ (vaporization) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งระหว่างสถานะของเหลว (liquid phase) กับสถานะไอ (vapor phase)



ภาพที่ 3.1 แผนภาพความดัน - อุณหภูมิแสดงกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์ [7]

การเดือดยังสามารถแบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ของสารทำงานได้ 2 แบบคือ flow boiling กับ pool boiling แต่ที่จะทำการศึกษาคือ pool boiling ซึ่ง boiling เป็นการเดือดในลักษณะที่มีการเคลื่อนที่ของของไหล โดยที่ผนังของช่องทางการไหลจะเป็นพื้นผิวให้ความร้อนด้วย boiling เป็นการเดือดบนพื้นผิวให้ความร้อนที่ถูกแช่อยู่ในของเหลวจะเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนเนื่องจากแรงลอยตัวของสารทำงาน

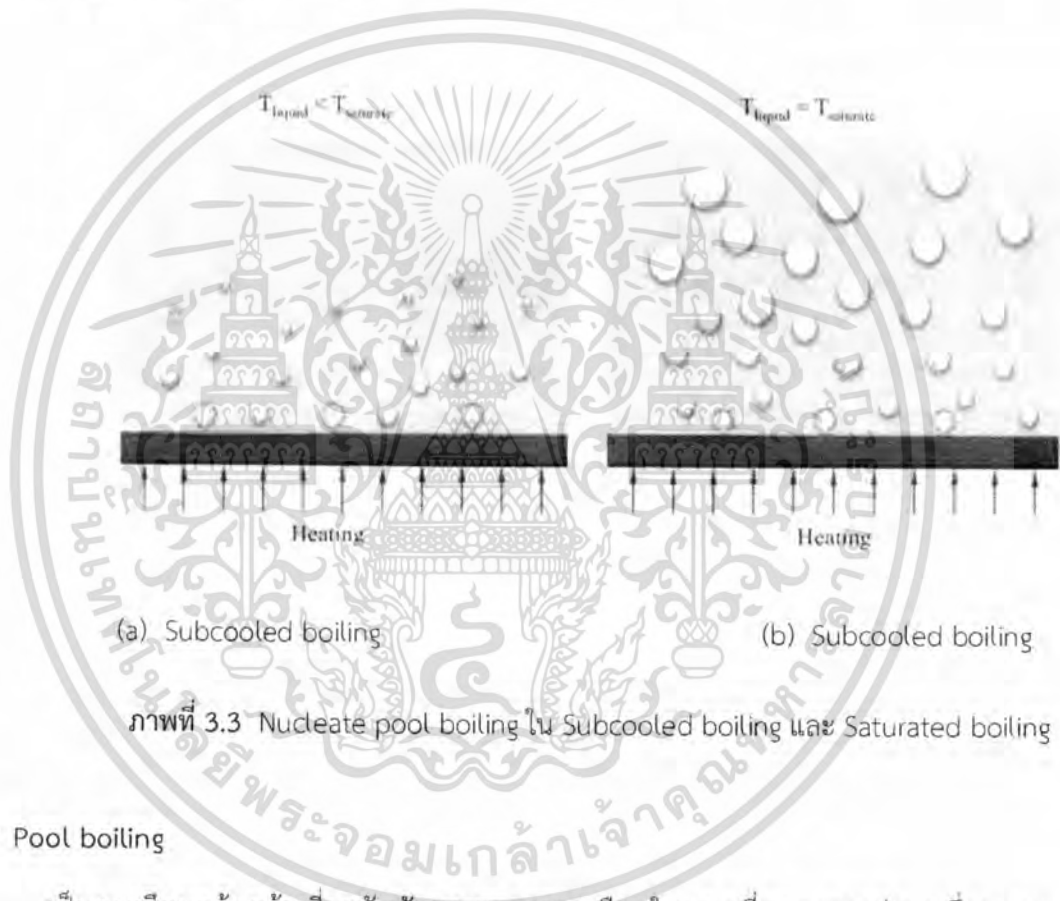


ภาพที่ 3.2 Nucleate boiling ใน (a) Pool boiling, (b) Flow boiling [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pool boiling และ flow boiling สามารถแบ่งตามอุณหภูมิของของไหลได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. **Subcooled boiling** คือการเดือดของของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของของเหลว นั้นๆ ฟองที่เกิดเนื่องจากการขยายตัวของอากาศบนพื้นผิวให้ความร้อนที่มีโพรงเล็กๆ เมื่อพื้นผิวให้ความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น อากาศที่อยู่ในโพรงก็จะพัฒนาเป็นฟองและจะหลุดออกจากพื้นผิว ให้ความร้อนที่สภาวะ subcooled boiling จากนั้นก็จะยุบตัวและสลายตัวไปก่อนถึงพื้นผิวของของไหล เนื่องจากอุณหภูมิของของเหลวรอบๆฟองต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของของเหลว นั้น
2. **Saturated boiling** คือการเดือดของของเหลวที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัวของของเหลว นั้นๆ การเดือดในลักษณะนี้ฟองที่หลุดออกจากพื้นผิวให้ความร้อนจะมีขนาดใหญ่และโตขึ้นเรื่อยๆ เมื่อฟองลอยขึ้นสู่พื้นผิวด้านบนก็จะสลายไป

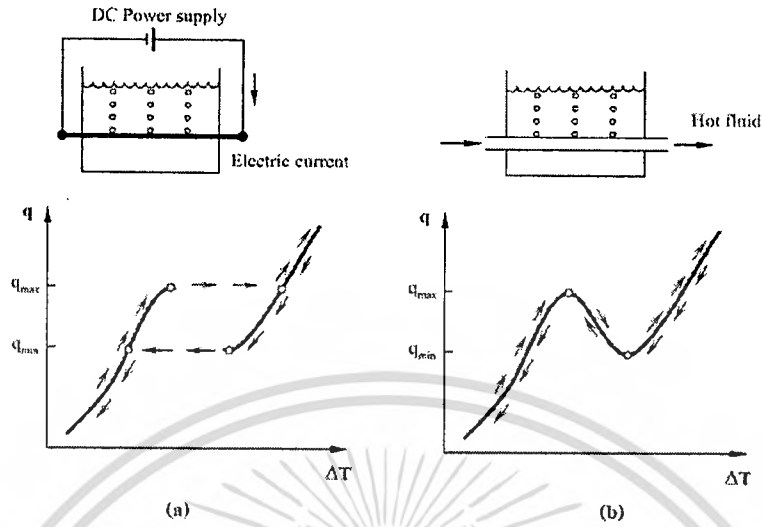


ภาพที่ 3.3 Nucleate pool boiling ใน Subcooled boiling และ Saturated boiling

3.2 Pool boiling

เป็นการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับลักษณะของการเดือดในขณะที่ของเหลวส่วนหนึ่งระเหยกลายเป็นไอ โดยจะนำเอาความร้อน อุณหภูมิของของเหลวบริเวณพื้นผิวให้ความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิส่วนใหญ่ของของเหลวจะสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวเล็กน้อย บริเวณพื้นผิวให้ความร้อนจะเกิดฟองลอยตัวขึ้นโดยพิจารณา pool boiling curve ของ Nukiyama ซึ่งเป็นบุคคลแรกที่ได้ทำการทดลอง และได้แยกแยะย่านต่างๆของการเดือด ซึ่งการเดือดแบบ pool boiling สามารถทำให้เข้าใจกลไกทางกายภาพของการเดือดได้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.4 (a) ส่วนในภาพที่ 3.4 (b) แสดงลักษณะของ pool boiling curve ที่ Bennett ได้ทำการศึกษาค้นคว้าโดยควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวให้ความร้อนจากการปรับอัตราการไหล ซึ่ง pool boiling curve จะอยู่ในช่วง transition boiling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ควบคุมฟลักซ์ความร้อน (b) ควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวให้ความร้อน

ภาพที่ 3.4 แสดงลักษณะของ pool boiling curve ที่ได้จากการทดลอง

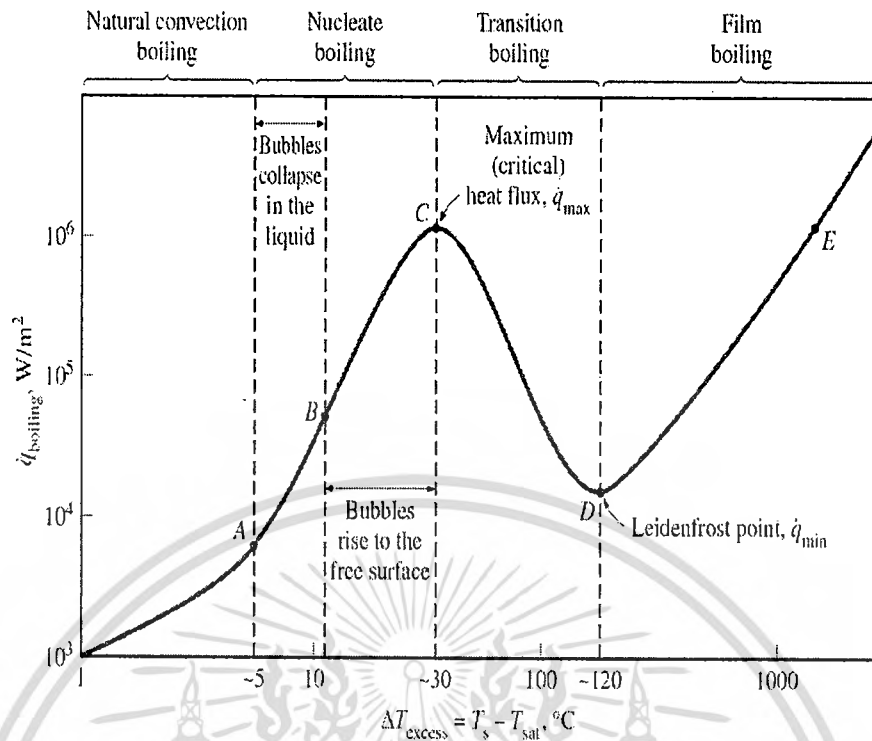
การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling สามารถแบ่งตามลักษณะของการเดือดได้ 4 แบบ

1. Natural convective boiling
2. Nucleate boiling
3. Transition boiling
4. Pool boiling curve

ในภาพ 3.5 แสดงลักษณะ pool boiling curve ของน้ำที่ความดันบรรยากาศที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง $T_s - T_{Sat}$ กับ ฟลักซ์ความร้อน จากกราฟแสดงให้เห็นว่า

- จากจุดเริ่มต้นจนถึงจุด A เป็นช่วง natural convective boiling
- จุด A ถึงจุด C คือช่วง nucleate boiling โดยที่จุด A ถึง B เป็นการเดือดในช่วงของฟลักซ์ความร้อนต่ำ และ จุด B ถึงจุด C เป็นการเดือดในช่วงฟลักซ์ความร้อนสูง
- จุด C คือจุดฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ
- จุด C ถึง D คือช่วง transition boiling
- จุด D เป็นต้นไปคือช่วงของ film boiling

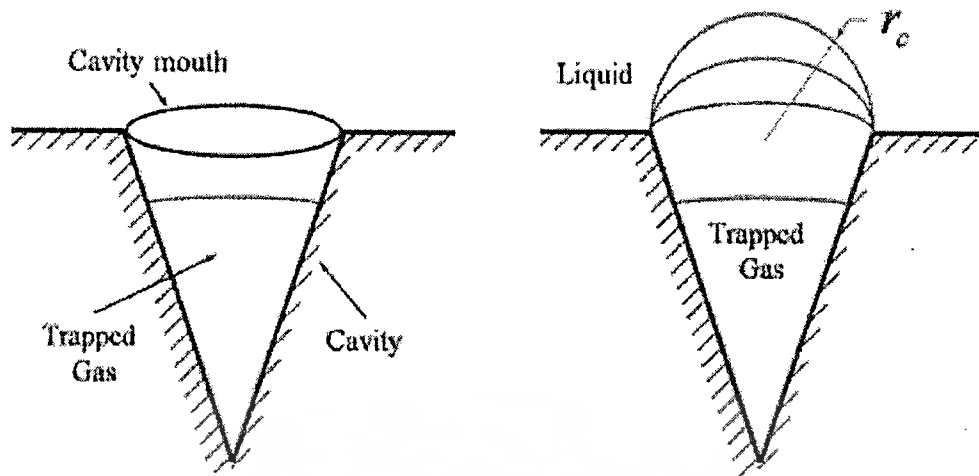
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 Pool boiling curve ของน้ำที่ความดันบรรยากาศ [9]

3.2.1 การเกิดฟองของ Pool boiling

การเกิดฟองของ nucleate pool boiling สันนิษฐานว่าพื้นผิวให้ความร้อนจะมีลักษณะเป็นโพรง ที่กักเก็บแก๊สไว้ภายในเมื่อพื้นผิวให้ความร้อนได้รับความร้อนจาก heater จะส่งผลให้แก๊ส ที่ถูกกักเก็บไว้ในโพรงเกิดการขยายตัวเป็นฟองลักษณะต่างๆบนพื้นผิวให้ความร้อนเนื่องจากโพรงมีลักษณะที่แตกต่างกันไป เพราะฉะนั้นการหาสมการเพื่อประมาณขนาดของฟองที่เกิดขึ้นได้มีการสมมุติลักษณะของโพรงในอุดมคติขึ้นมา (ดังแสดงในภาพที่ 3.6) โดยรัศมีน้อยสุดของฟองมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมบริเวณปากโพรงซึ่งรัศมีของฟองจะเท่ากับรัศมีของปากโพรง

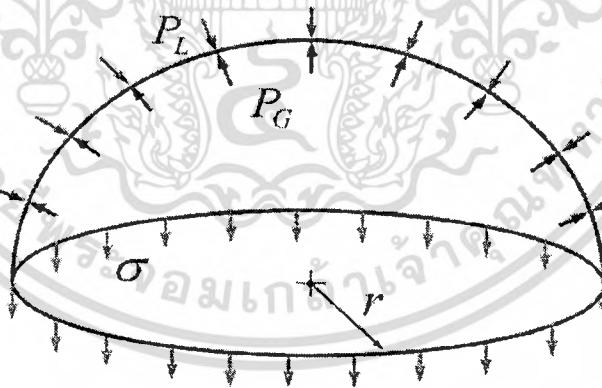


ภาพที่ 3.6 การเกิดฟองในอุโมงค์

ถ้า P_g คือความดันของแก๊สภายในฟอง (N/m^2) และ r_c คือรัศมีของปากโพรง (m) ซึ่งคำนวณได้จากการสมดุลแรงที่กระทำกับฟอง ดังแสดงในภาพที่ 3.7 จะได้สมการดังนี้คือ

$$P_g = P_l + \frac{2\sigma}{r} \quad (3.1)$$

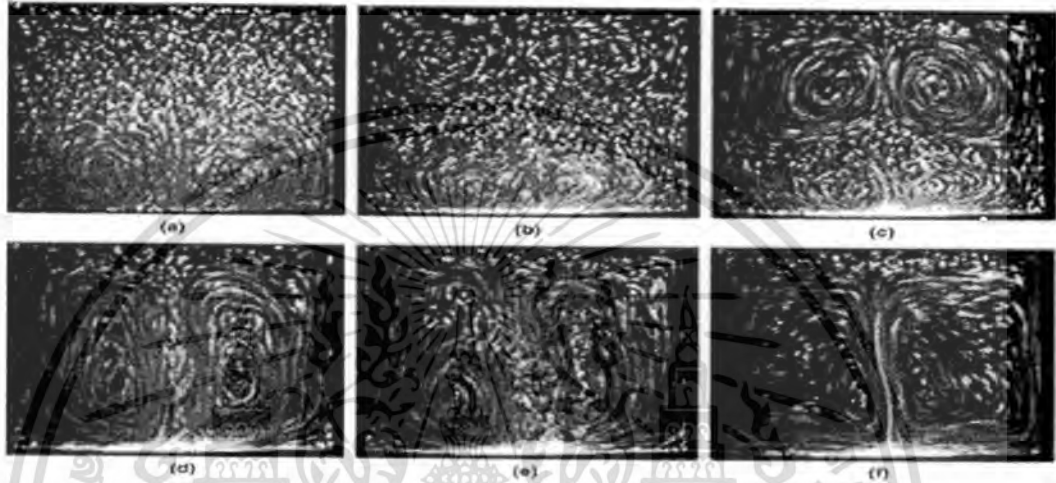
เมื่อ P_l คือ ความดันของของเหลวที่กระทำที่บริเวณพื้นผิวด้านนอกของฟอง (N/m^2)
 r คือ รัศมีของฟอง (m) โดยที่ $r = r_c$ ความดันของแก๊สภายในฟองจะมีค่าสูงสุด
 σ คือ ความตึงผิวของฟอง



ภาพที่ 3.7 แสดงความดันที่กระทำกับฟองและความตึงผิวของฟอง

3.2.2. การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)

การพาความร้อนแบบธรรมชาติเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งโดยใช้หลักการลอยตัว โดยการลอยตัวจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความหนาแน่นของของเหลวเกิดความแตกต่างกันโดยทั่วไปแล้วของเหลวที่อยู่ใกล้กับพื้นผิวให้ความร้อนสูง (ความหนาแน่นของของเหลวต่ำ) และของเหลวที่อยู่ห่างจากพื้นผิว ให้ความร้อนอุณหภูมิก็น้อย (ความหนาแน่นสูง) โดยที่ของไหลจะมีความหนาแน่นต่ำจะเคลื่อนที่ลอยขึ้น ในขณะที่เดียวกันของเหลวที่มีความหนาแน่นมากก็จะเข้ามาแทนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวน



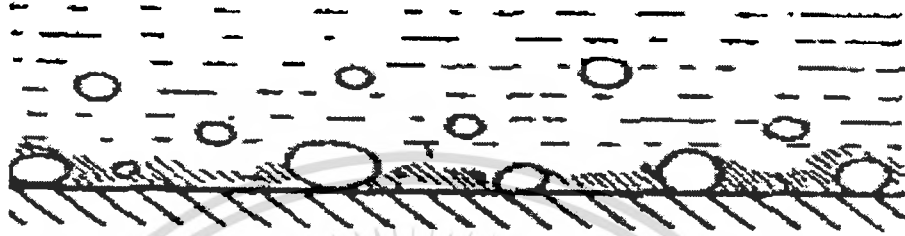
ภาพที่ 3.8 แสดงปรากฏการณ์ของการพาความร้อนแบบธรรมชาติที่เวลาต่างๆกัน โดยเริ่มจาก (a)→(f)

3.2.3. Nucleate boiling

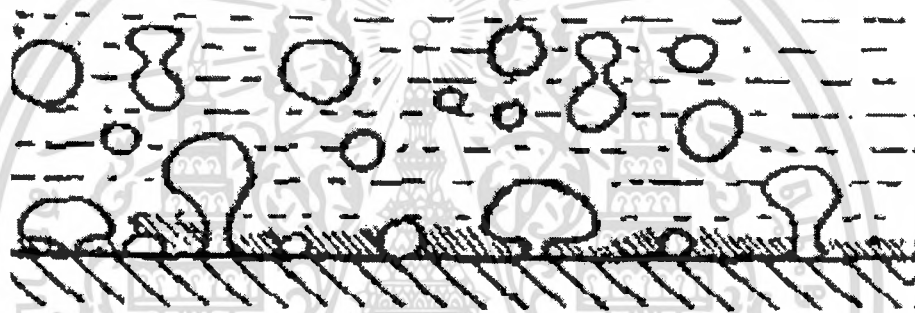
การวิเคราะห์การ nucleate boiling จะต้องรู้จำนวนจุดของการเกิดฟองที่พื้นผิวและอัตราการเกิดฟองแต่ละจุด ของไหลจะมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน การเกิดฟองจะมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่บริเวณพื้นผิวให้ความร้อน เมื่ออุณหภูมิของพื้นผิวให้ความร้อนสูงขึ้นจะทำให้ฟองบริเวณพื้นผิว ให้ความร้อนหลุดลอย ซึ่งเป็นลักษณะของ nucleate boiling ในช่วงฟลักซ์ความร้อนต่ำ ถ้าอยู่ในช่วงฟลักซ์ความร้อนสูงจะมีการเดือดที่รุนแรง ลักษณะของฟองที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบสลับสลับกับฟองแบบทรงกลม



(a) Onset of nucleate boiling



(b) Nucleate boiling low heat fluxes



(c) Nucleate boiling high heat fluxes

ภาพที่ 3.9 Nucleate pool boiling ในช่วงของ (a) Onset of nucleate boiling (b) Low heat fluxes (c) High heat fluxes [10]

การศึกษาเกี่ยวกับกลไกของการเดือดที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง ซึ่งกลุ่มของ Yamagata เป็นกลุ่มแรกที่ได้แสดงการเกิดฟอง (nucleation sites) ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนดังสมการ

$$q_s'' = C \Delta T_e^a n^b \quad (3.2)$$

ความหนาแน่นของจุดที่เกิดฟองคือ n (จำนวนจุดที่เกิดฟองต่อพื้นที่) และยกกำลังประมาณ $a = 1.2$ และ $b = 1/3$ ชนิดของของไหลจะขึ้นอยู่กับค่า c และ n แต่สำหรับพื้นผิวที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรมพบว่า n แปรผันตาม ΔT_e จากการพิจารณาของ Rohsenow's ได้เสนอสมการในย่านการเดือด nucleate boiling คือ

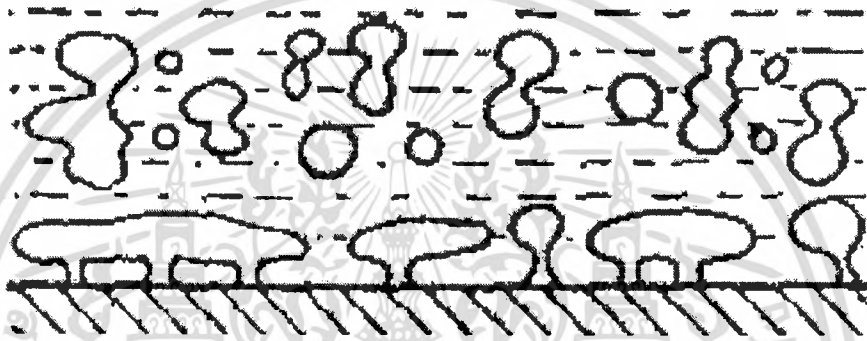
$$q_s'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l n} \right)^3 \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ของสถานะของเหลวจะห้อย l และ v การที่ความตึงผิวปรากฏอยู่ในสมการด้านบน เนื่องจากมีผลต่อการก่อตัวของฟอง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ $C_{s,f}$ และกำลัง n จะขึ้นอยู่กับพื้นผิวและชนิดของของเหลว สำหรับพื้นผิวของของเหลวบางชนิดค่าความตึงผิวและความร้อนแฝงจะกลายเป็นไอน้ำ

3.2.4. ฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ (Critical heat flux)

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเดือดนั้น จะต้องไม่ให้ทำงานเกินจุดฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ ถ้าหากเกินฟลักซ์ความร้อนวิกฤติจะเป็นช่วงที่เกิด burnout บนพื้นผิวให้ความร้อน ก็จะทำให้เกิดฟองแบบสลักขึ้น



ภาพที่ 3.10 แสดงลักษณะของ Pool boiling ที่ฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ [11]

Kutateladze ใช้วิธีการวิเคราะห์มิติและ Zuber ได้ใช้การวิเคราะห์ hydrodynamic stability analysis ซึ่งจะได้สมการอยู่ในรูป

$$q''_{\max} = \frac{\pi}{24} h_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left(\frac{\rho_l + \rho_v}{\rho_l} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

จะเห็นได้ว่าไม่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นพื้นผิวแต่ขึ้นอยู่กับรูปทรงของพื้นผิวเท่านั้น การทดลองพบว่าควรแทนค่า zuber constant ซึ่งได้แก่ $\frac{\pi}{24} = 0.149$ และจัดรูปของสมการใหม่

$$q''_{\max} = 0.149 h_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left(\frac{\rho_l + \rho_v}{\rho_l} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

3.2.5. Transition boiling

การเดือดจะเกิดขึ้นภายหลัง critical heat flux ซึ่งของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวให้ความร้อน ในจังหวะที่ไม่คงตัว การเดือดในที่นี้น่าสนใจเนื่องจากจะมีการก่อตัวของชั้นไอซึ่งมีเสถียรภาพ (stable vapor blanket) และเป็นสภาพที่เรียกว่า minimum heat flux condition ถ้า heat flux ลดต่ำลงชั้นของไอจะยุบตัวลงและการเดือดจะเป็นแบบ nucleate boiling



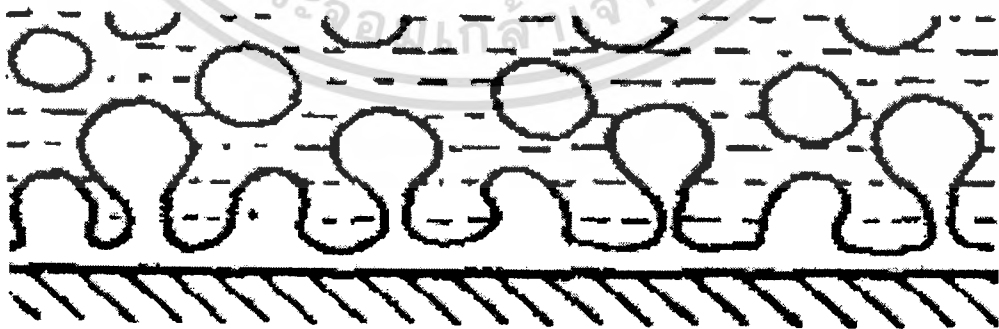
ภาพที่ 3.11 ลักษณะของ Pool boiling ในช่วงของ Transition boiling [12]

Zuber ได้ใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับ stability และให้ค่า minimum heat flux ดังสมการด้านล่าง

$$q''_{\min} = ch_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4} \quad (3.6)$$

3.2.6. Film boiling

การเดือดในช่วงนี้ชั้นของไอจะครอบคลุมพื้นผิวอย่างต่อเนื่อง ไม่มีการสัมผัสระหว่างของเหลวและพื้นผิว เนื่องจากชั้นของไอนี้มีความคล้ายคลึงกับ laminar film condensation จากทฤษฎีการควบแน่นจึงมักนิยมนำผลมาเป็นพื้นฐานสำหรับการเดือดแบบ film boiling



ภาพที่ 3.12 ลักษณะของ Pool boiling ในช่วงของ Film boiling [13]

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h}_{conv} D}{k_v} = C \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{U_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad (3.7)$$

โดยค่าคงที่ $c = 0.62$ สำหรับทรงกระบอกที่วางในแนวระดับและ $c = 0.67$ สำหรับทรงกลมและ $h'_{fg} = h_{fg} + 0.80 C_{p,v} (T_s - T_{sat})$ ส่วนคุณสมบัติต่างๆ ของไอหาที่ film temperature

$$T_f = (T_s - T_{sat})/2$$

เมื่อพื้นผิวอุณหภูมิสูงมาก ($T_s \geq 300^\circ C$) การแผ่รังสีความร้อนผ่านชั้นของไอจะมีความสำคัญ และผลของการแผ่รังสี จะทำให้ชั้นของไอนามากขึ้นการนำผลลัพธ์ของการพาความร้อนและการแผ่รังสี ความร้อนมาบวกกันจึงไม่สมเหตุผล Bromley ได้ทำการวิเคราะห์ การเดือดแบบ film boiling ที่ผิวนอกของท่อที่วางในแนวระดับและได้แนะนำการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากสมการ

$$\bar{h}^{4/3} = \bar{h}_{conv}^{4/3} + \bar{h}_{rad} \bar{h}^{1/3} \quad (3.8)$$

และถ้า $\bar{h}_{rad} \leq \bar{h}_{conv}$ อาจใช้สมการในรูปที่ง่ายกว่า

$$\bar{h} = \bar{h}_{conv} + (3/4) \bar{h}_{rad} \quad (3.9)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อนหาได้จาก

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}} \quad (3.10)$$

โดยที่ค่า ε คือค่า emissivity ของพื้นผิวให้ความร้อน และ σ คือ stefan-boltzmann constant

3.3 การคำนวณ

สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบ Pool boiling สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้
Flux ความร้อน (q)

$$\dot{q} = \frac{I \cdot V}{A} \quad (3.11)$$

โดยที่ \dot{q} คือ ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ (A)

V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ (V)

A คือ พื้นผิวให้ความร้อน (m^2)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h_b)

$$h_b = \frac{q}{T_s - T_{sat}} \quad (3.12)$$

เมื่อ h_b คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบ pool boiling (W/m^2K)

q คือ ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2)

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิวให้ความร้อน (K)

T_{sat} คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของของเหลว (K)

อุณหภูมิของพื้นผิวให้ความร้อน

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^4 T_i \sum_{i=1}^4 x_i^2 - \sum_{i=1}^4 x_i \sum_{i=1}^4 x_i T_i}{4 \sum_{i=1}^4 x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^4 x_i \right)^2} \quad (3.13)$$

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิวให้ความร้อน (K)

T_i คือ อุณหภูมิบนชุดทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (K)

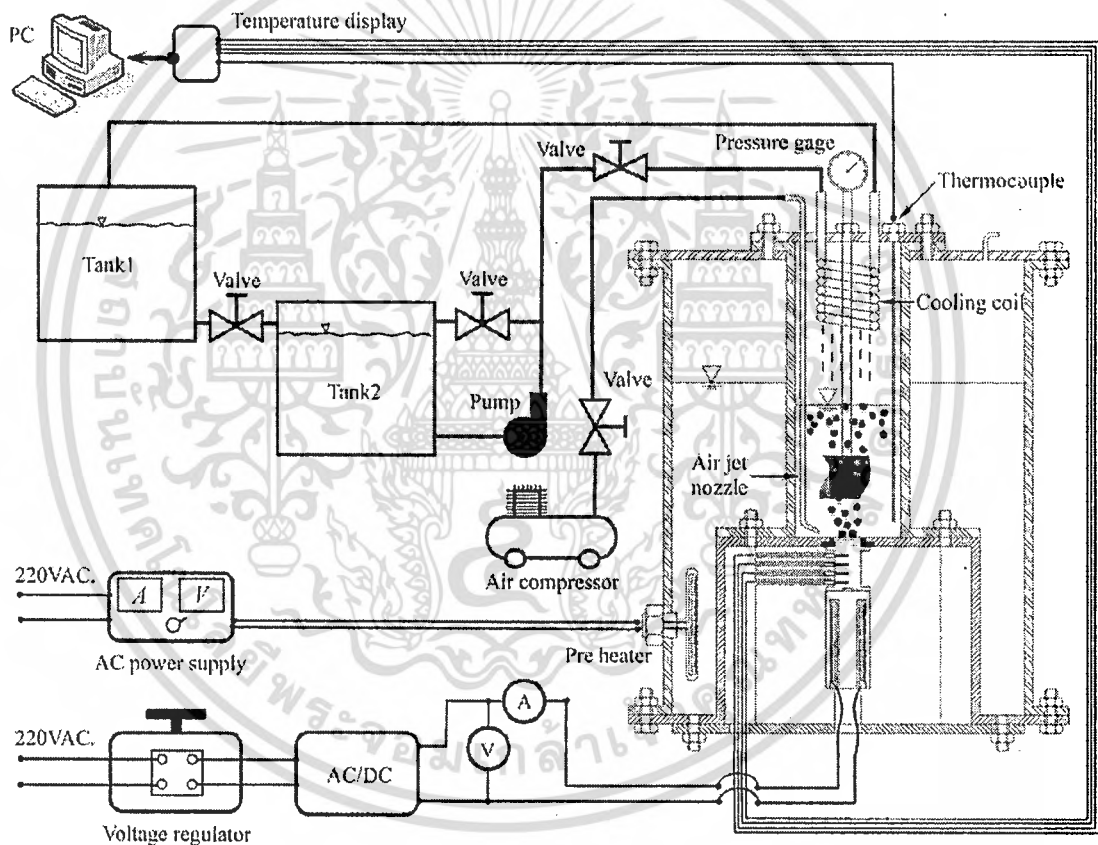
X_i คือ ระยะที่ติดตั้งตัววัดอุณหภูมิบนชุดทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ (K)

บทที่ 4

อุปกรณ์และวิธีการทดลองการพัฒนาการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือด เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม

4.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling บนพื้นผิวให้ความร้อน ที่มีอุปกรณ์ twisted tape เป็นอุปกรณ์หลักมีรายละเอียดดังภาพที่ 4.1 ซึ่งได้ทำการออกแบบขึ้นมาเพื่อต้องการหา pool boiling curve และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ภายใต้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ (constant heat flux) อุปกรณ์ในการทดลองมีอยู่ด้วยกัน 5 ระบบคือ ระบบ pool boiling ระบบไฟฟ้า ระบบวัดอุณหภูมิ ระบบระบายความร้อน และระบบเป่าลม

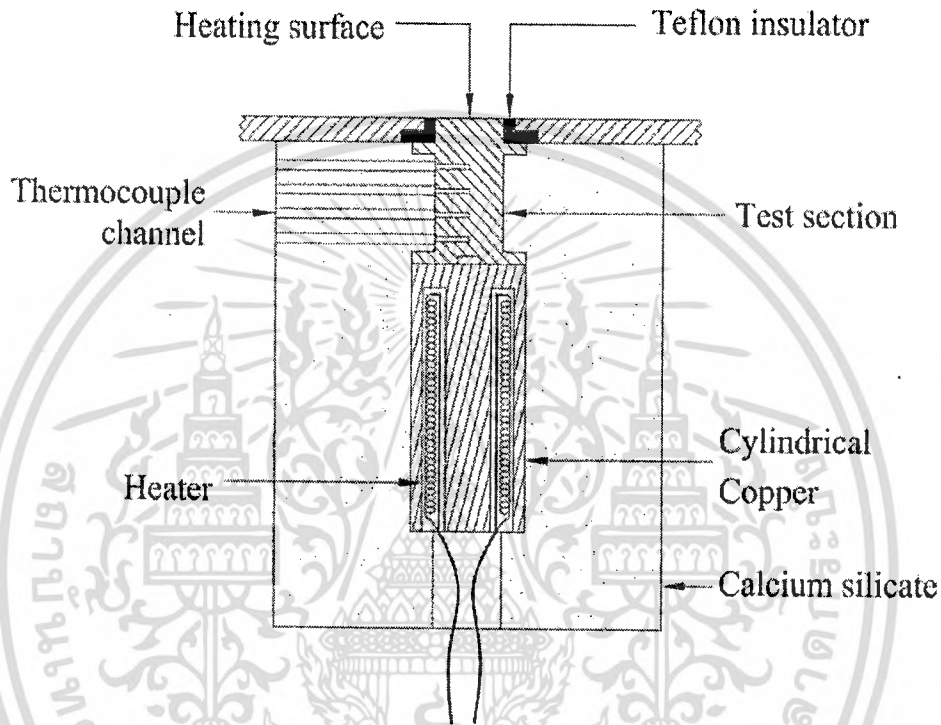


ภาพที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของ Pool boiling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1. ระบบ Pool boiling

ระบบ pool boiling ที่ใช้ในการทดลองมีอยู่ด้วยกัน 3 ส่วนคือ คอยล์เย็น boiling test section และถังความดันซึ่งทำมาจากเหล็กไร้สนิมมีขนาดด้วยกัน 2 ชนิดคือ ถังความดันขนาดเล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 300 mm บรรจุ working fluid ภายในกับถังความดันขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 mm สูง 400 mm ระหว่างถังทั้ง 2 มีการควบคุมอุณหภูมิน้ำที่บรรจุภายในถังเพื่อให้ความดันทั้งสองทำงานที่ความดันบรรยากาศ



ภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะของ Boiling test section

4.1.2. ระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ หม้อแปลงปรับค่าได้ ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง multimeter (FLUK366) โดยที่ แหล่งจ่ายไฟฟ้า AC จะควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ pre heater ขนาด 1.5 kW 220 VAC และ หม้อแปลงปรับค่าได้จะเป็นตัวควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ heater ขนาด 1.2 kW 220 VDC โดยมี multimeter เป็นตัววัดกระแสไฟฟ้า (ADC) และแรงดันไฟฟ้า (VDC) ที่ออกจากตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับที่ออกจากหม้อแปลงปรับค่าได้ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อส่งไปยังฮีตเตอร์

4.1.3. ระบบวัดอุณหภูมิ

ระบบวัดอุณหภูมิประกอบด้วย sheet thermocouple ชนิด T จำนวน 4 ตัว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ยาว 16 mm ใช้วัด test section ที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อประมาณอุณหภูมิพื้นผิวให้ความร้อน โดยแต่ละตัวจะมีระยะห่าง 10 mm จะใช้ตัวแสดงค่าอุณหภูมิที่มีความละเอียดในการอ่านที่เทคนิค 1 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 4.2

4.1.4. ระบบระบายความร้อน

ระบบนี้เป็นระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมความดันภายในถังให้คงที่ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งประกอบด้วย วาล์วน้ำ ป้อนน้ำ ถังน้ำ และคอยล์ทองแดง โดยจะมีขนาด $50 \times 50 \times 50 \text{ m}^2$ น้ำจาก tank 2 จะถูกปั๊มสูบให้ไหลผ่าน cooling coil ทำให้เกิดการควบแน่น การควบคุมอัตราการไหลของน้ำเพื่อที่จะต้องการให้ถึงความดันขนาดเล็กคงที่ที่ความดันบรรยากาศ สังเกตได้จากอุปกรณ์วัดความดันที่ติดตั้งไว้ด้านบน

4.1.5. ระบบเป่าลม

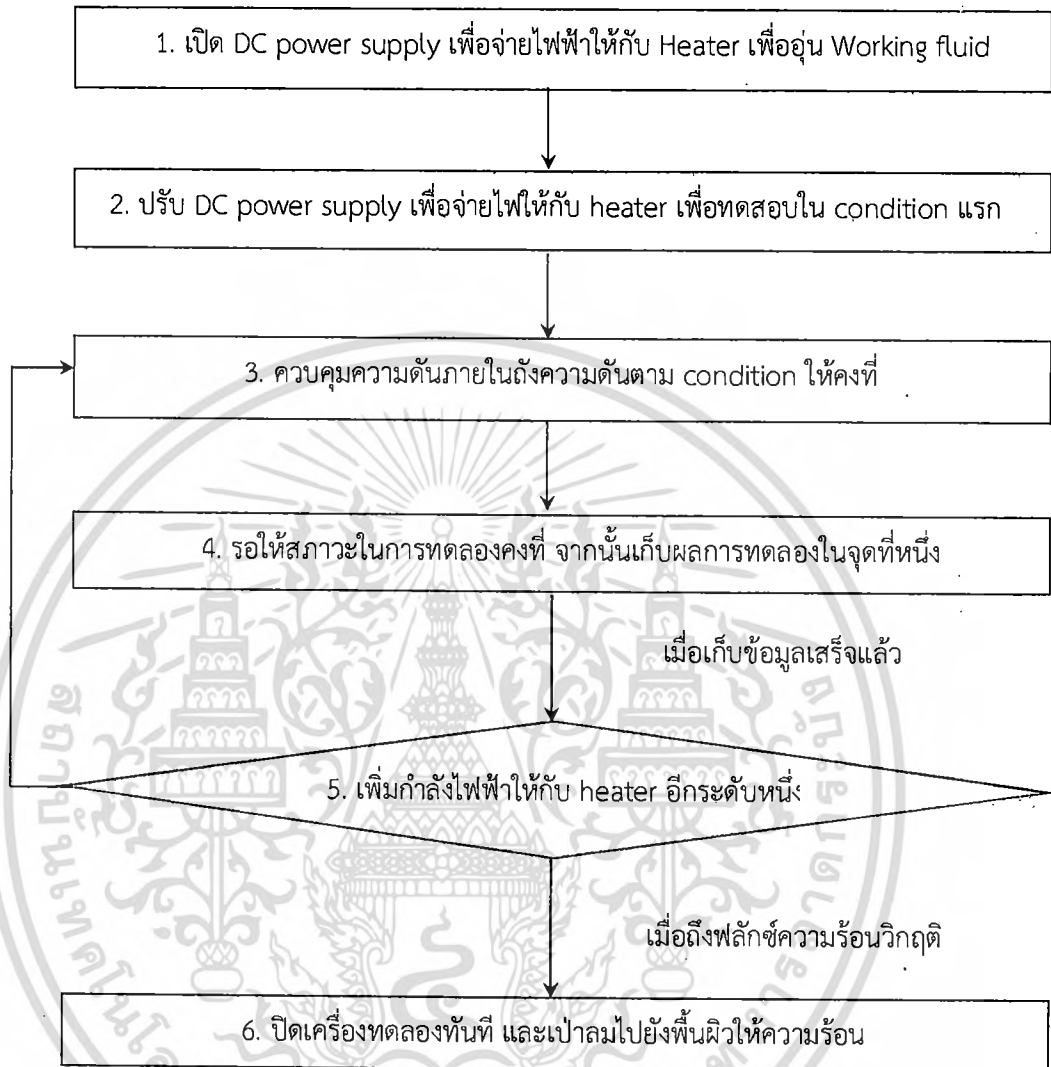
ระบบนี้จะทำหน้าที่กำจัดชั้นฟองที่เกิดขึ้นในช่วง film boiling เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ และยังลดอุณหภูมิบนพื้นผิวให้ความร้อนอีกด้วย ซึ่งระบบนี้จะประกอบด้วย วาล์ว ถังปั๊มลม และหัวเป่าลม การควบคุมลมจะควบคุมโดยวาล์วลม เพื่อให้ลมที่ต่อจากฝาด้านบนของถังความดันขนาดเล็กกลับมายังบริเวณพื้นผิวให้ความร้อน

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

อุปกรณ์การทดลองนี้เป็นอุปกรณ์ทดสอบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling และศึกษาถึงปรากฏการณ์ pool boiling ในขณะที่ติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มความปั่นป่วน twisted tab และที่ความดันบรรยากาศซึ่งรายละเอียดของวิธีการทดลอง มีดังต่อไปนี้

1. ในการทำการทดลองนั้นเริ่มจากเปิด heater ให้ความร้อนกับ working fluids ที่อยู่ในหลอดแก้วทนความดันจนถึงอุณหภูมิอิ่มตัวของ working fluids ที่ใช้ ในการทดสอบ
2. จากนั้นทำการปรับไฟฟ้ากระแสตรงให้กับ heater เพื่อส่งความร้อนไปยังพื้นผิว ให้ความร้อนที่ใช้ในการทดสอบ ต่อจากนั้นรอจนกว่าอุณหภูมิคงที่
3. ขั้นตอนต่อไป ให้ทำการควบคุมความดันภายในหลอดแก้วทนความดันให้คงที่ โดยปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำในระบบระบายความร้อนที่ผ่าน condenser coil
4. เมื่อควบคุมสภาวะในการทดลองคงที่แล้ว จากนั้นให้เก็บข้อมูลการทดลองจุดที่หนึ่ง ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงาน แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ heater และทำการถ่ายภาพปรากฏการณ์ของการเดือดด้วย
5. ขั้นตอนต่อไปให้เพิ่มกำลังไฟฟ้าขึ้นไปอีกระดับหนึ่งแล้วรอจนกว่า อุณหภูมิคงที่ จากนั้นให้ทำตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 4
6. ให้ทำตามขั้นตอนที่ 5 ไปเรื่อยๆจนกว่าถึงจุดพื้นผิวให้ความร้อนเป็นการเดือดแบบ film boiling (จุดฟลักซ์ความร้อนวิกฤติ) จากนั้นให้ทำการปิดเครื่องทดลองโดยทันที และเปิดวาล์วเป่าลมไปยังพื้นผิวให้ความร้อน กำจัดชั้นของฟองที่เกิดขึ้นในช่วง film boiling และช่วยลดอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวให้ความร้อน ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ในการทดลอง

7. ขั้นตอนต่อไปทำการถอดอุปกรณ์มาล้างทำความสะอาด หลังจากนั้นใช้ลมเป่าให้แห้ง แล้วประกอบอุปกรณ์ทดสอบเข้าที่เดิมเพื่อทดสอบในครั้งต่อไป



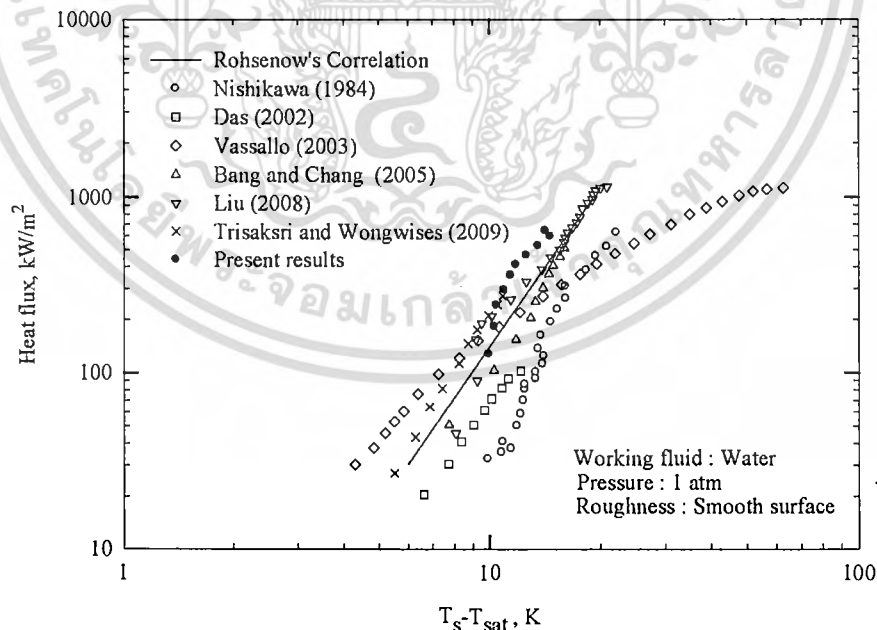
ภาพที่ 4.3 แสดงลำดับขั้นตอนของการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการศึกษาถึงคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ที่ความดันบรรยากาศซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็น working fluid โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนที่ทำมาจากทองแดงมีความขรุขระของพื้นผิวให้ความร้อนเท่ากับ $0.2 \mu m$ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาดทดลองเกี่ยวกับผลของระยะห่าง ผลของจำนวนใบ และวิเคราะห์ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ที่อยู่ในช่วงของ high heat flux ซึ่งได้นำข้อมูลการทดลองมาเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Rohsenow's และผลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ

5.1 การสอบเทียบอุปกรณ์การทดลอง

ในการสอบเทียบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำนายคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็น working fluids ในการสอบเทียบได้นำผลการทดลองมาทำการเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Rohsenow's นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ มาทำการเปรียบเทียบด้วย ดังแสดงใน ภาพที่ 5.1 เป็นกราฟแสดง pool boiling curve จากผลการสอบเทียบ พบว่าข้อมูลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับสหสัมพันธ์ของ Rohsenow's และอยู่ในกลุ่มข้อมูลการทดลองของ Das et al. [14] Vassallo et al. [15] Bang and Chang [16] Liu and Liao [17] และ Trisaksri and Wongwises [18]

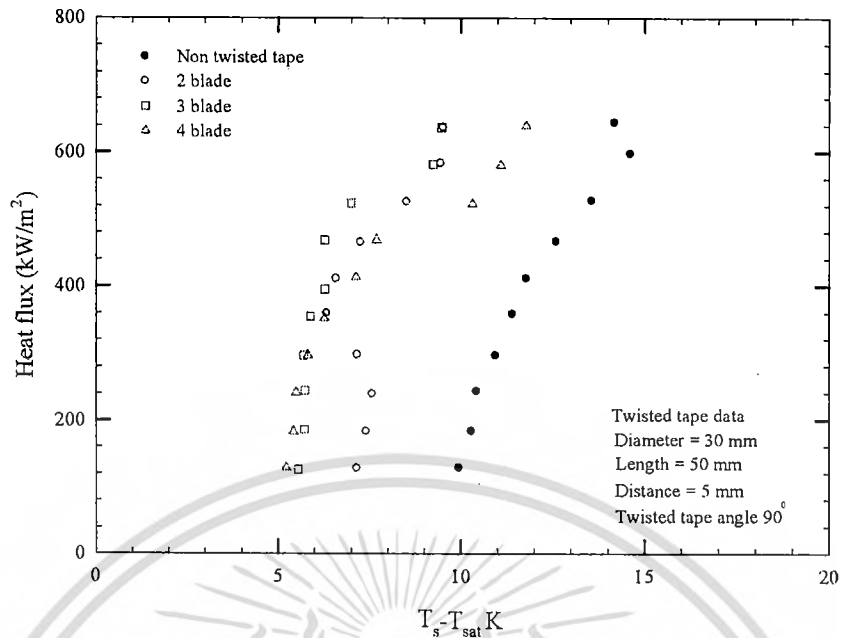


ภาพที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากการทดลองกับสหสัมพันธ์ของ Rohsenow และการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ

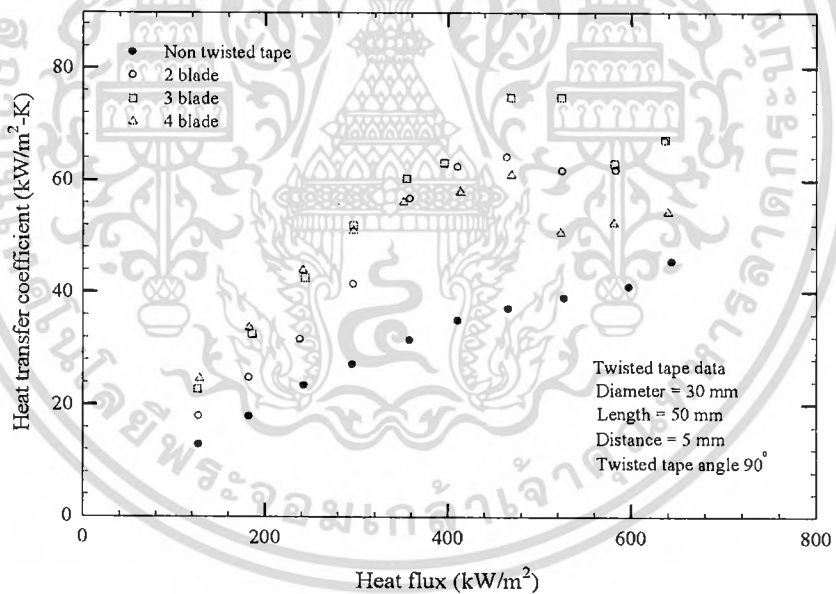
5.2 ผลของระยะห่างของ twisted tape กับพื้นผิวให้ความร้อน

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของระยะห่างระหว่างปลายของ twisted tape ที่มีผลต่อคุณลักษณะ pool boiling curve และ heat transfer coefficient ซึ่งทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ โดยมีข้อมูลของ twisted tape ดังนี้ มีความหนาเท่ากับ 0.2 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape เท่ากับ 30 mm ความยาวของ twisted tape เท่ากับ 50 mm และมีมุมบิด เท่ากับ 90° โดยทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนใบของอุปกรณ์ twisted tape เป็น 2 3 และ 4 ใบ ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 5.2 ถึง 5.4 ซึ่งแสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างพื้นผิวให้ความร้อนกับปลายของอุปกรณ์ twisted tape เป็น 15 10 และ 5 mm ตามลำดับ

จากภาพที่ 5.2 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling ซึ่งมีน้ำกลั่นเป็น working fluid ซึ่งภาพที่ 5.2 (ก) ถึง 5.4 (ก) เป็นกราฟ pool boiling curve โดยจะ plot ระหว่าง $T_s - T_{sat}$ กับ Heat flux จากกราฟแสดงให้เห็นว่ากราฟจะเลื่อนมาทางด้านซ้ายเมื่อเทียบกับ non twisted tape ส่วนภาพที่ 5.2(ข) ถึง 5.4 (ข) เป็นกราฟ Pool boiling heat transfer coefficient ซึ่ง plot ระหว่าง heat flux กับ heat transfer coefficient ซึ่งเมื่อทำการติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ที่ระยะ 15 10 และ 5 mm ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 0% 77% และ 57% ตามลำดับ twisted tape ชนิด 3 ใบ ที่ระยะ 15 10 และ 5 mm ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 51% 59% และ 83% ตามลำดับ และ twisted tape ชนิด 4 ใบ ที่ระยะ 15 10 และ 5 mm ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 68% 26% และ 66% ตามลำดับ เนื่องจาก twisted tape ที่ติดตั้งไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนสามารถสร้างความปั่นป่วนได้ดีกว่า non twisted tape



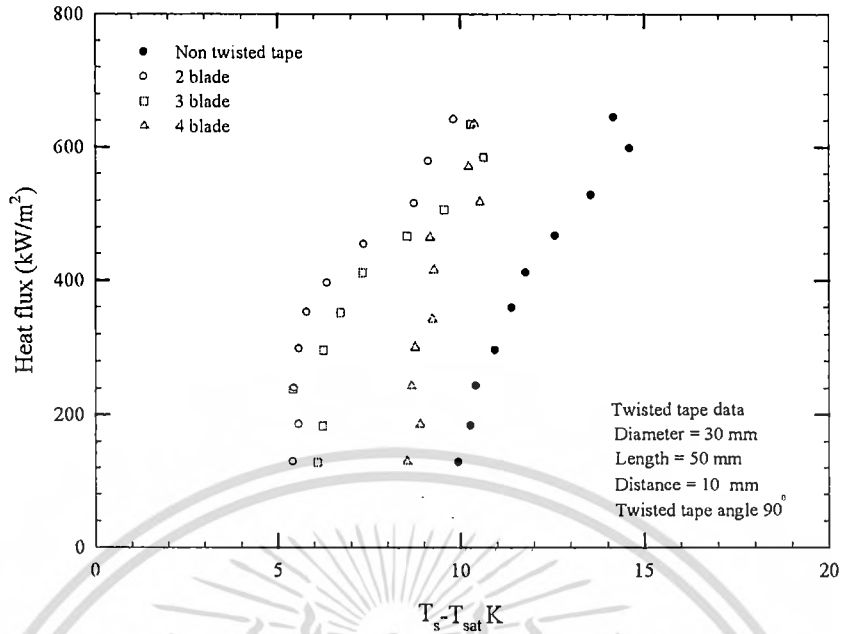
(ก) Pool boiling curve



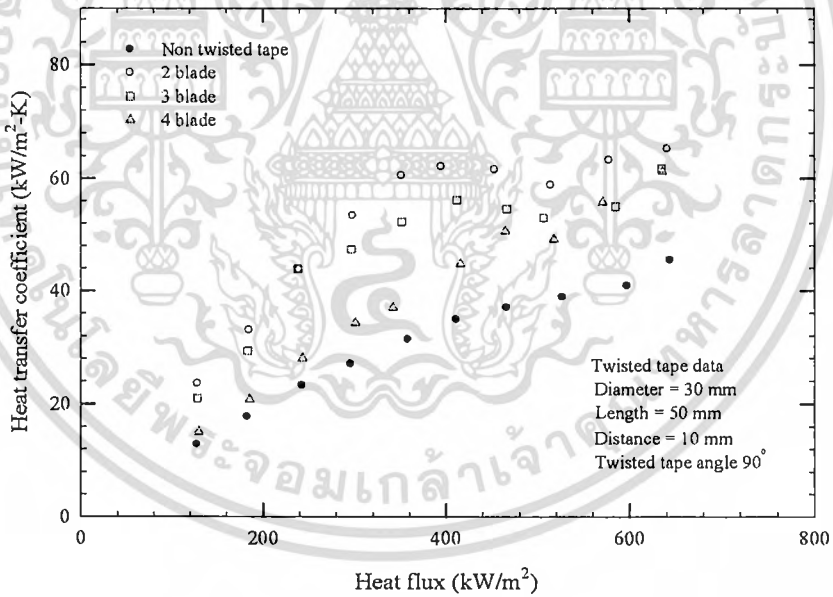
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

ภาพที่ 5.2 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 5 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



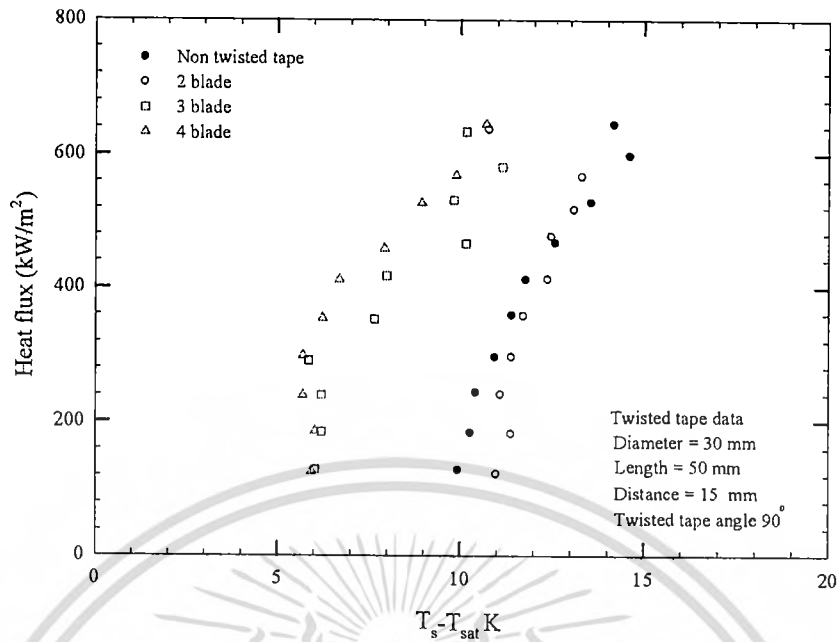
(ก) Pool boiling curve



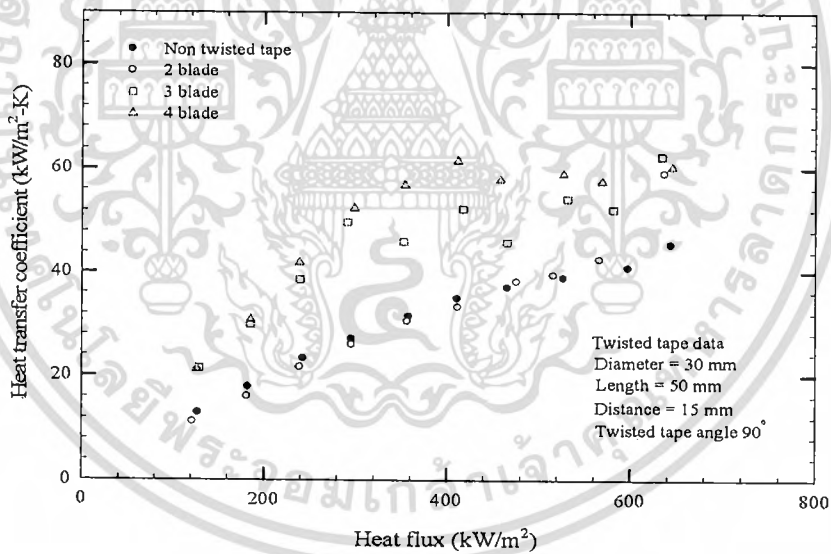
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

ภาพที่ 5.3 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 10 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Pool boiling curve



(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

ภาพที่ 5.4 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 15 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลของจำนวนใบของ twisted tape

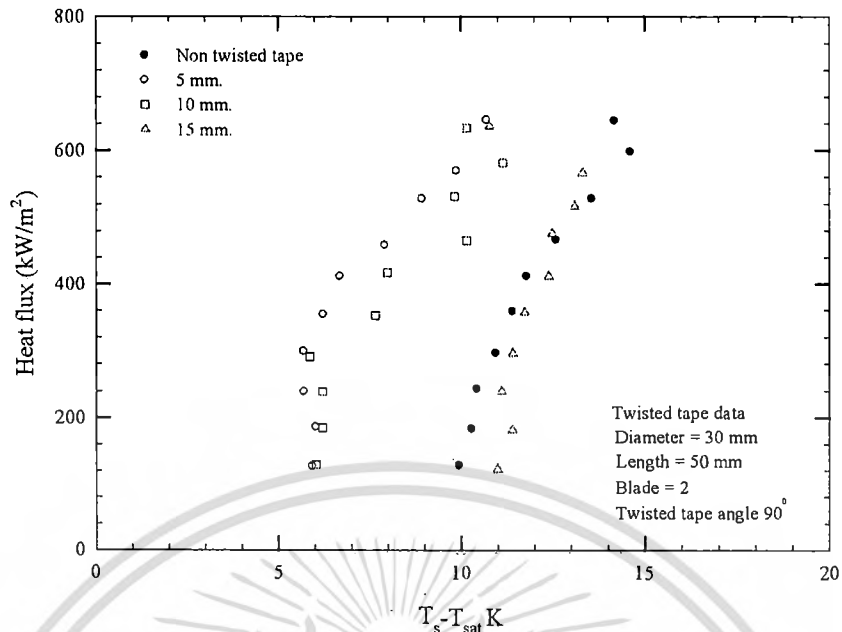
จากการวิเคราะห์ผลการทดลองของจำนวนใบ twisted tape ที่มีผลต่อคุณลักษณะ pool boiling curve และ heat transfer coefficient ซึ่งทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ข้อมูลของ twisted tape มีดังนี้ ความหนาของใบ 0.2 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape 30 mm ความยาวของ twisted tape 50 mm และมีมุมบิด เท่ากับ 90° นอกจากนี้ ในการทดลอง ได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนของ twisted tape เป็น 2 3 และ 4 ใบ ผลของการทดลองแสดงในภาพที่ 5.5 ถึง 5.7 มีรายละเอียดดังนี้

จากรูปที่ 5.5 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ pool boiling ซึ่งมี working fluid เป็นน้ำกลั่น โดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ซึ่งภาพที่ 5.5(ก) ถึง 5.7 (ก) เป็นกราฟ pool boiling curve โดยจะ plot ระหว่าง $T_s - T_{sat}$ กับ heat flux จากกราฟ แสดงให้เห็นว่า twisted tape ชนิด 2 ใบ ที่ระยะ 15 mm เลื่อนไปทางด้านขวาเมื่อเทียบกับ non twisted tape เนื่องจากระยะพื้นผิวให้ความร้อนกับ twisted tape สูงมากเกินไป bubble ที่เกิดขึ้น จึงไม่สามารถมาปะทะกับใบบิดเกลียวด้านในได้คงที่ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้น้อย ส่วนภาพที่ 5.5 (ข) ถึง 5.7 (ข) เป็นกราฟ pool boiling heat transfer coefficient ที่ติดตั้งชนิด 2 3 และ 4 ใบ ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อ $T_s - T_{sat}$ เพิ่มขึ้น heat flux ก็เพิ่มขึ้น heat transfer coefficient ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อ heat flux ประมาณ 351 kW/m^2 จากกราฟจะสังเกตได้ว่า heat transfer coefficient ค่อนข้างคงที่เนื่องจาก bubble ที่เกิดขึ้นปะทะกับด้านในของ twisted tape จึงเกิดความปั่นป่วนสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี

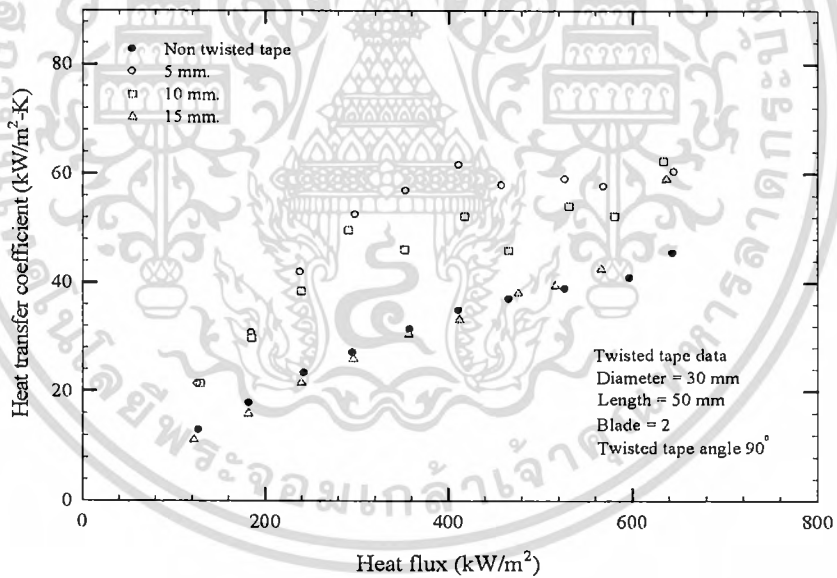
จากภาพที่ 5.6 (ข) แสดงให้เห็นว่าที่ twisted tape 3 ใบ ที่ระยะ 5 mm bubble ที่ลอยตัวขึ้นสู่พื้นผิวของ working fluid จะหมุนวนและปะทะกับ bubble ที่กำลังลอยตัวขึ้นสู่พื้นผิวด้านบน จึงทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นเหนือใบพัด กระแสน้ำจึงวนมาปะทะกับครีbsd้านนอกของใบพัด เกิดความปั่นป่วน ทำให้ค่า heat transfer coefficient เพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 5.7 (ข) แสดงกราฟ pool boiling heat transfer coefficient จากกราฟพบว่า เมื่อเทียบค่า heat flux เดียวกัน ค่า heat transfer coefficient เพิ่มขึ้นมากกว่า non twisted tape อาจเป็นเพราะที่ติดตั้ง twisted tape สามารถสร้างความปั่นป่วนได้ดีกว่า non twisted tape ค่าของการถ่ายเทความร้อนของ twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ จึงมีรายละเอียดดังนี้

twisted tape ชนิด 2 ใบที่ระยะ 15 10 และ 5 mm	เพิ่มขึ้นเป็น 0% 77% และ 57%
twisted tape ชนิด 3 ใบที่ระยะ 15 10 และ 5 mm	เพิ่มขึ้นเป็น 51% 59% และ 83%
twisted tape ชนิด 4 ใบที่ระยะ 15 10 และ 5 mm	เพิ่มขึ้นเป็น 68% 26% และ 66%



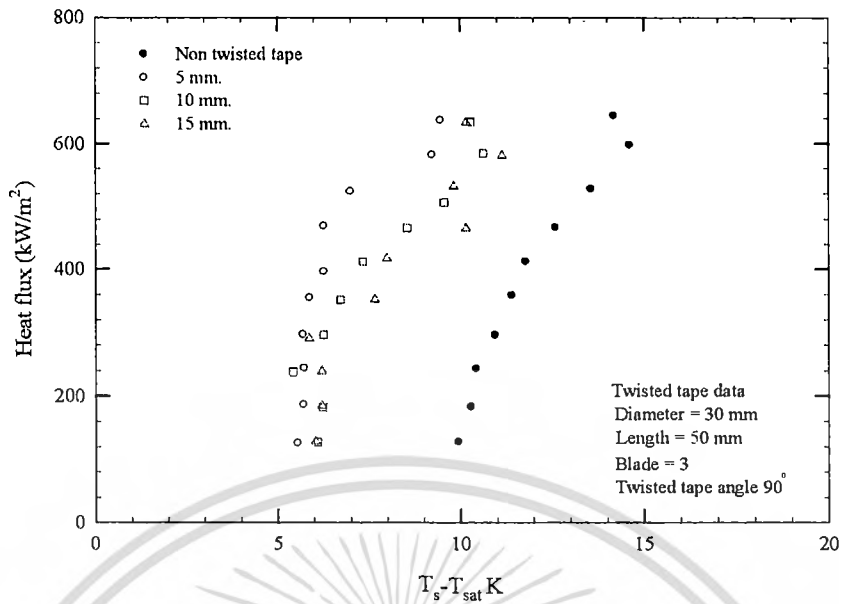
(ก) Pool boiling curve



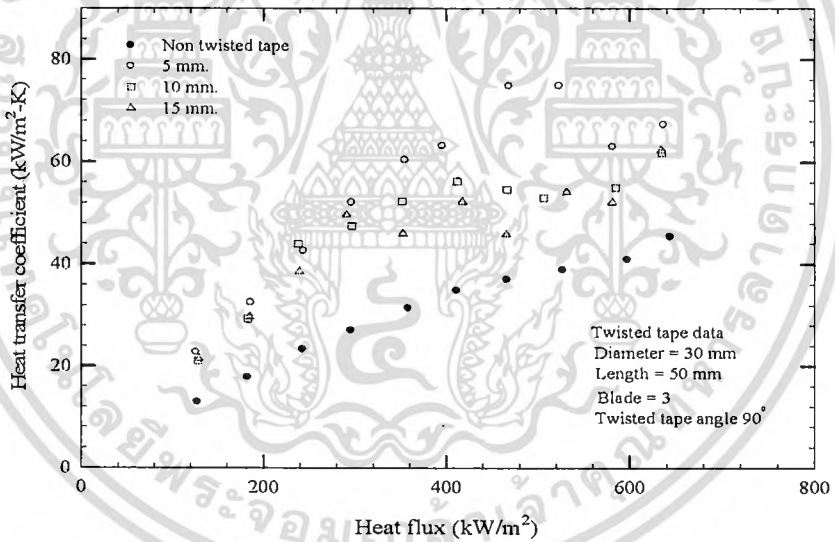
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

ภาพที่ 5.5 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 2 ใบ ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



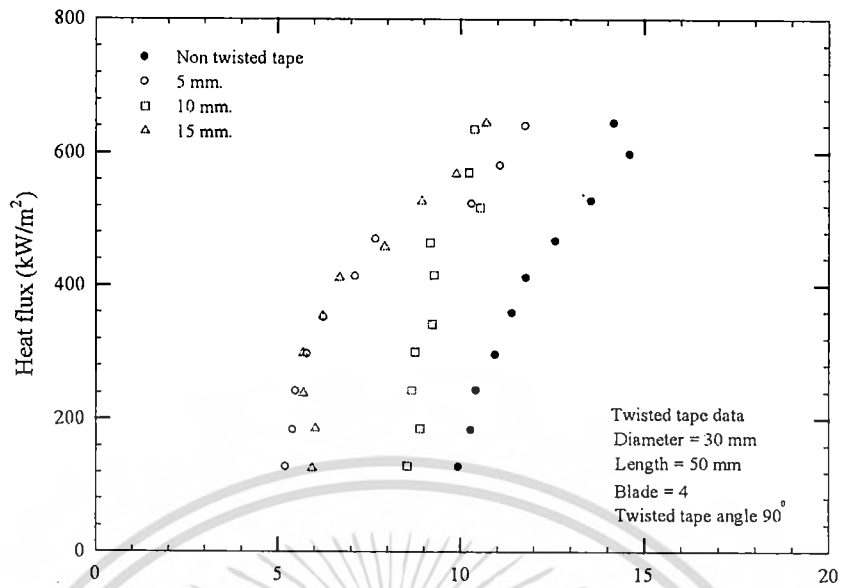
(ก) Pool boiling curve



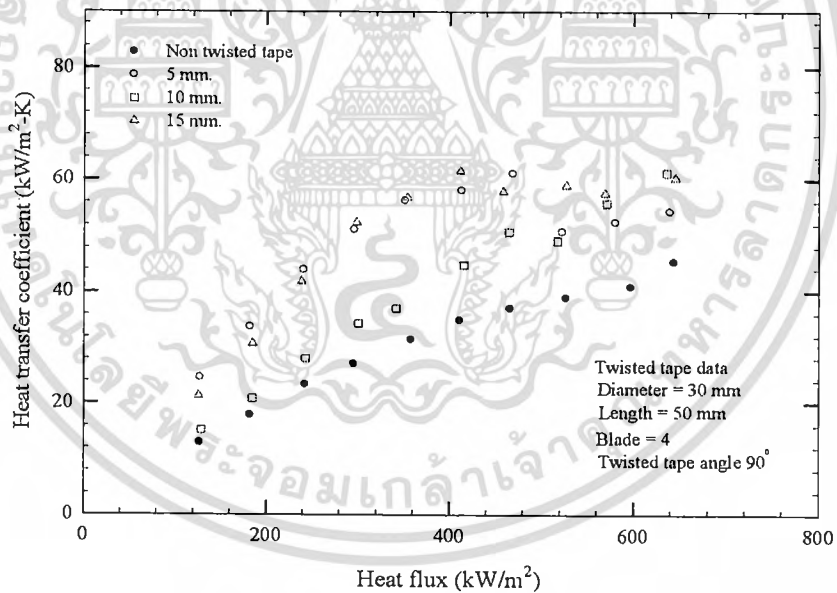
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

ภาพที่ 5.6 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape 3ใบ ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Pool boiling curve



(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

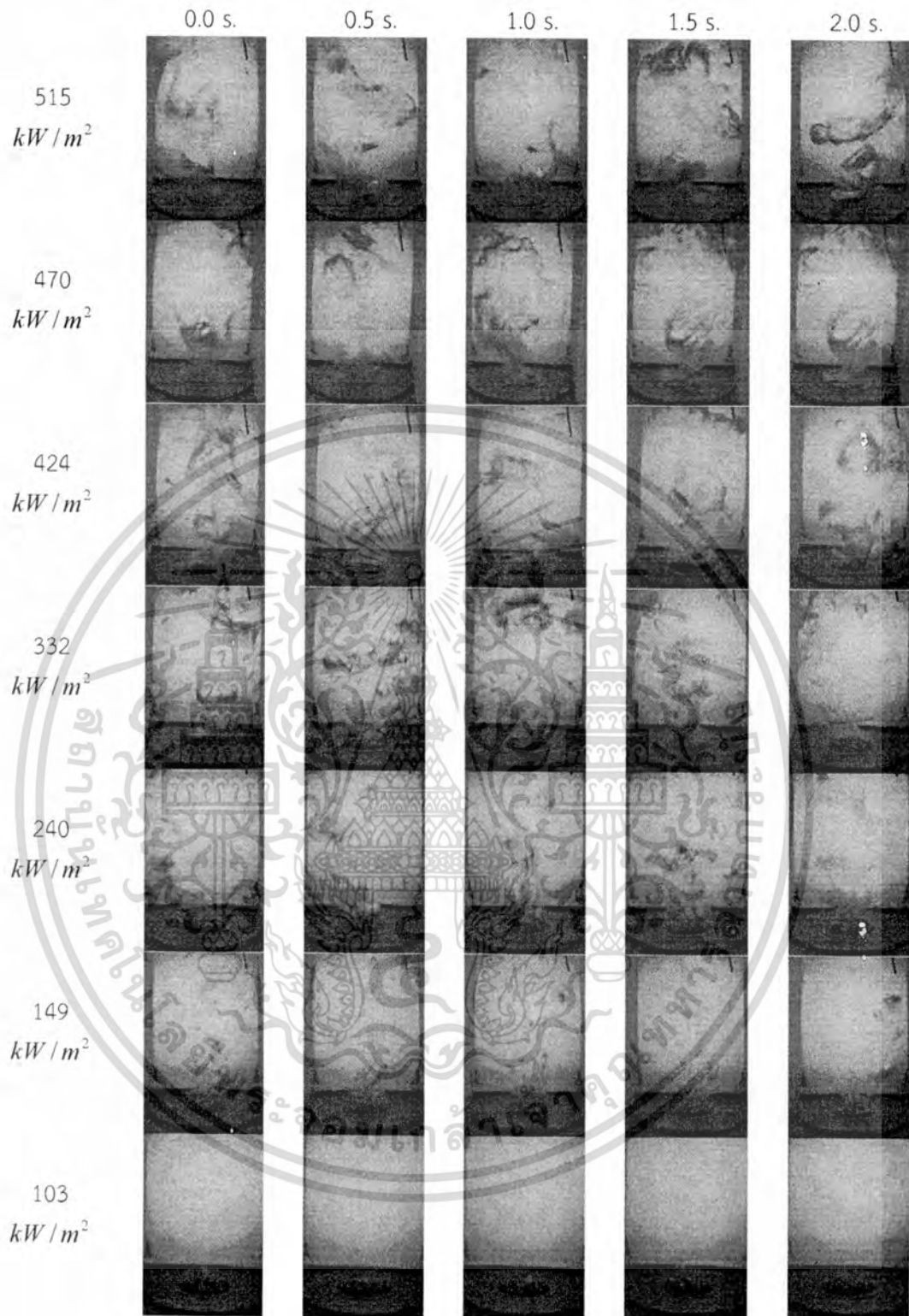
ภาพที่ 5.7 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำโดยติดตั้ง twisted tape 4 ใบ ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์

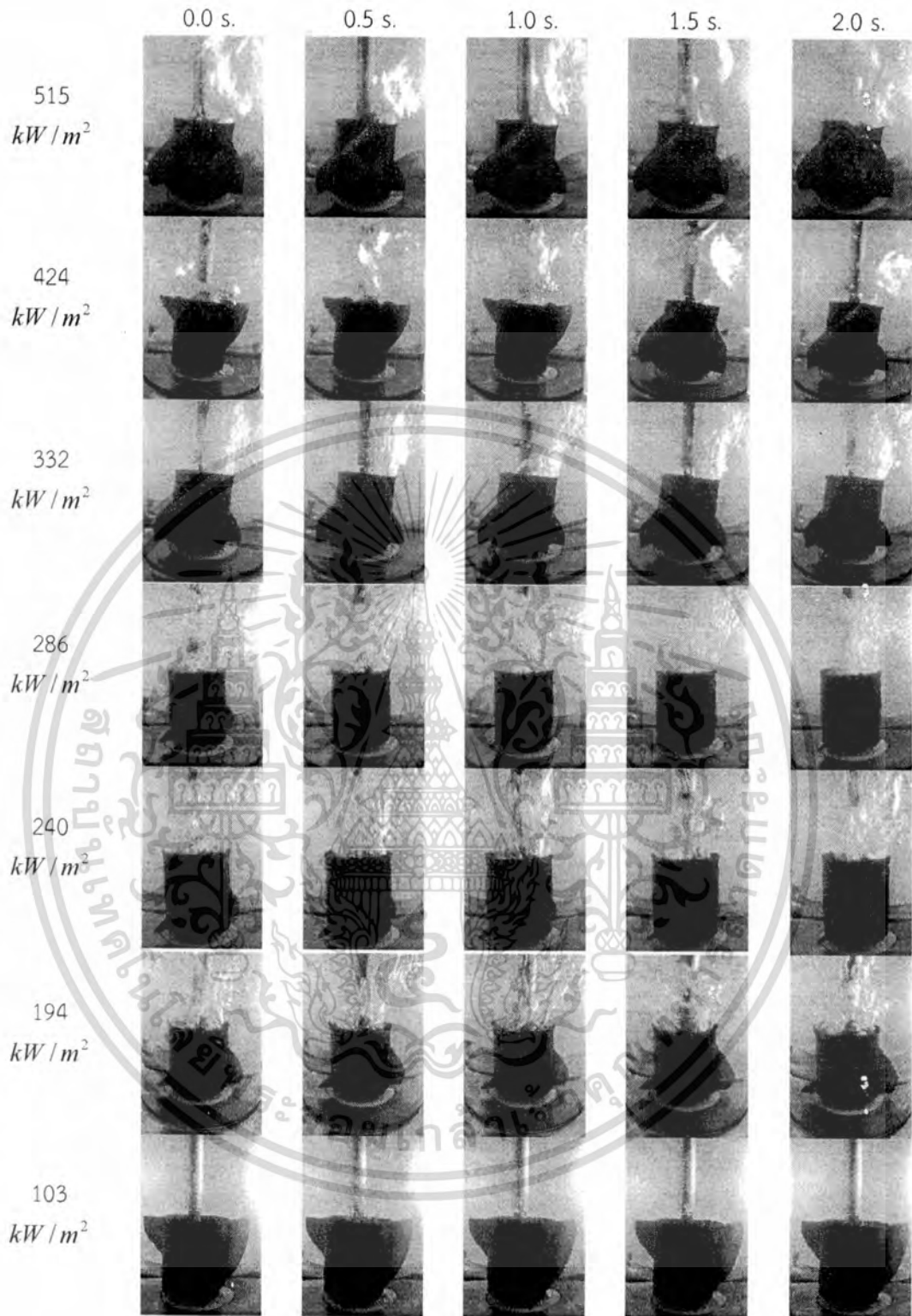
จากภาพที่ 5.8 ซึ่งแสดงปรากฏการณ์ของ nucleate pool boiling heat transfer ที่พื้นผิวให้ความร้อนทำจากทองแดงที่มีความขรุขระ $0.2 \mu\text{m}$ ซึ่งในภาพที่ 5.8 เป็นการทดลองเพื่อเทียบสอบอุปกรณ์ non twisted tape จากผลการทดลองพบว่าในช่วงที่ค่า heat flux ประมาณ $103 - 149 \text{ kW/m}^2$ ซึ่งเป็นช่วงของ low heat flux ที่เปลี่ยนแปลงเป็น high heat flux ซึ่งที่ 103 kW/m^2 bubble ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวให้ความร้อนจะมีขนาดเล็กหลุดลอยจากพื้นผิวให้ความร้อนสู่ผิวของ working fluid จากการทดลองยังพบอีกว่า ปรากฏการณ์ของการเดือดจะรุนแรงเพิ่มขึ้นเมื่อค่า heat flux เพิ่มขึ้น สังเกตได้ว่า bubble ที่เกิดขึ้นและมีลักษณะเป็นรูปสลักเมื่อ heat flux เพิ่มขึ้นจาก 149 kW/m^2 ไปเรื่อยๆจนถึง 515 kW/m^2 บริเวณผิวของ working fluid จะเกิดความปั่นป่วนที่รุนแรงทำให้ความร้อนที่ผิวสูงขึ้น จะส่งผลให้การเปลี่ยนเฟสจากของเหลวกลายเป็นไอ

จากภาพที่ 5.9 ถึง 5.17 แสดงปรากฏการณ์ของ nucleate pool boiling heat transfer โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ twisted tape เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน จากผลการทดลองพบว่า twisted tape ชนิด 3 ใบ สามารถรับแรงจาก bubble ได้ดีกว่า twisted tape ชนิด 4 และ 2 ใบ ตามลำดับ นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างพื้นผิวให้ความร้อนกับปลายของ twisted tape มีผลต่อการรับแรงจาก bubble จากการทดลองพบว่าการหมุนวนและสร้างความปั่นป่วนให้กับ working fluid ที่ระยะ 5 mm twisted tape สามารถรับแรงจาก bubble และสร้างความปั่นป่วนได้ดีกว่าที่ระยะ 10 และ 15 mm เนื่องจากที่ระยะ 5 mm การเคลื่อนที่ของ bubble ที่ออกจากพื้นผิวให้ความร้อนมาปะทะกับผิวด้านในของ twisted tape ที่ระยะ 5 mm bubble มีแรงดันมากกว่า 10 mm และ 15 mm เนื่องจากระยะห่างของพื้นผิวให้ความร้อนกับ twisted tape มีระยะใกล้กว่า ทำให้สร้างความปั่นป่วนได้ดีกว่าที่ระยะ 10 และ 15 mm



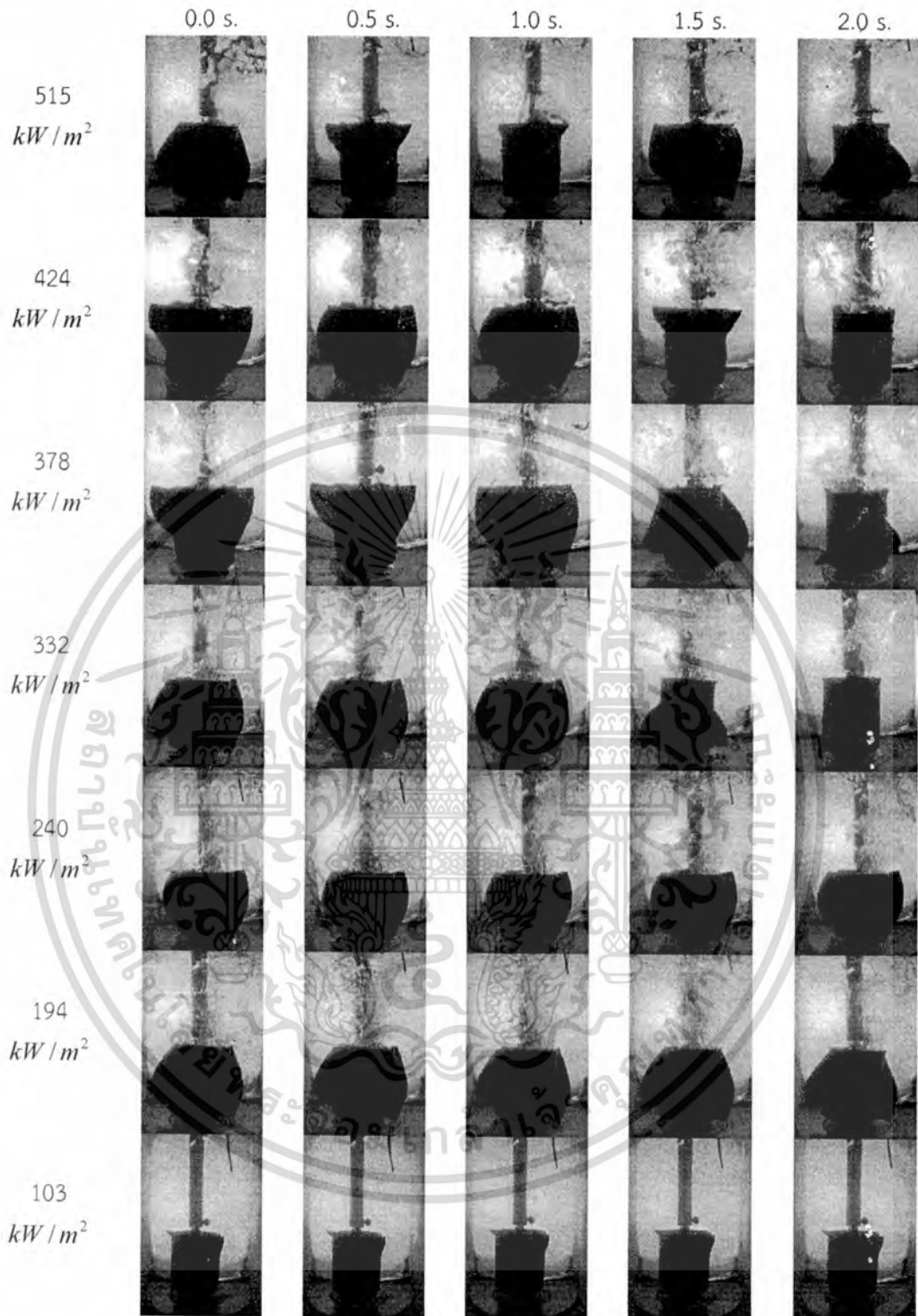
ภาพที่ 5.8 แสดงปรากฏการณ์ของการเกิดของน้ำกลั่นบนพื้นผิวทองแดงเพื่อทำการเทียบอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



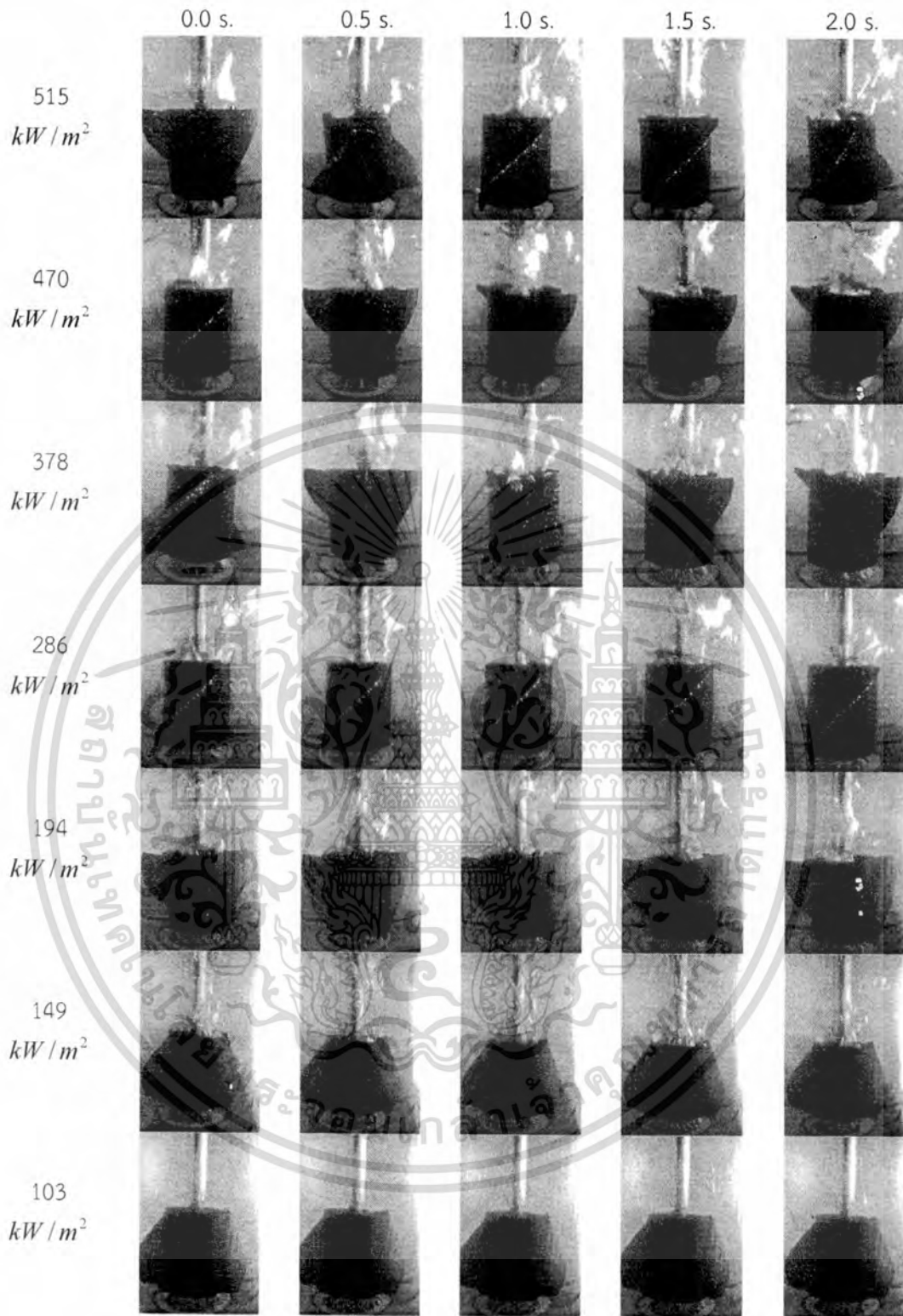
ภาพที่ 5.9 แสดงปรากฏการณ์ของการติดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ และระยะห่าง 5 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



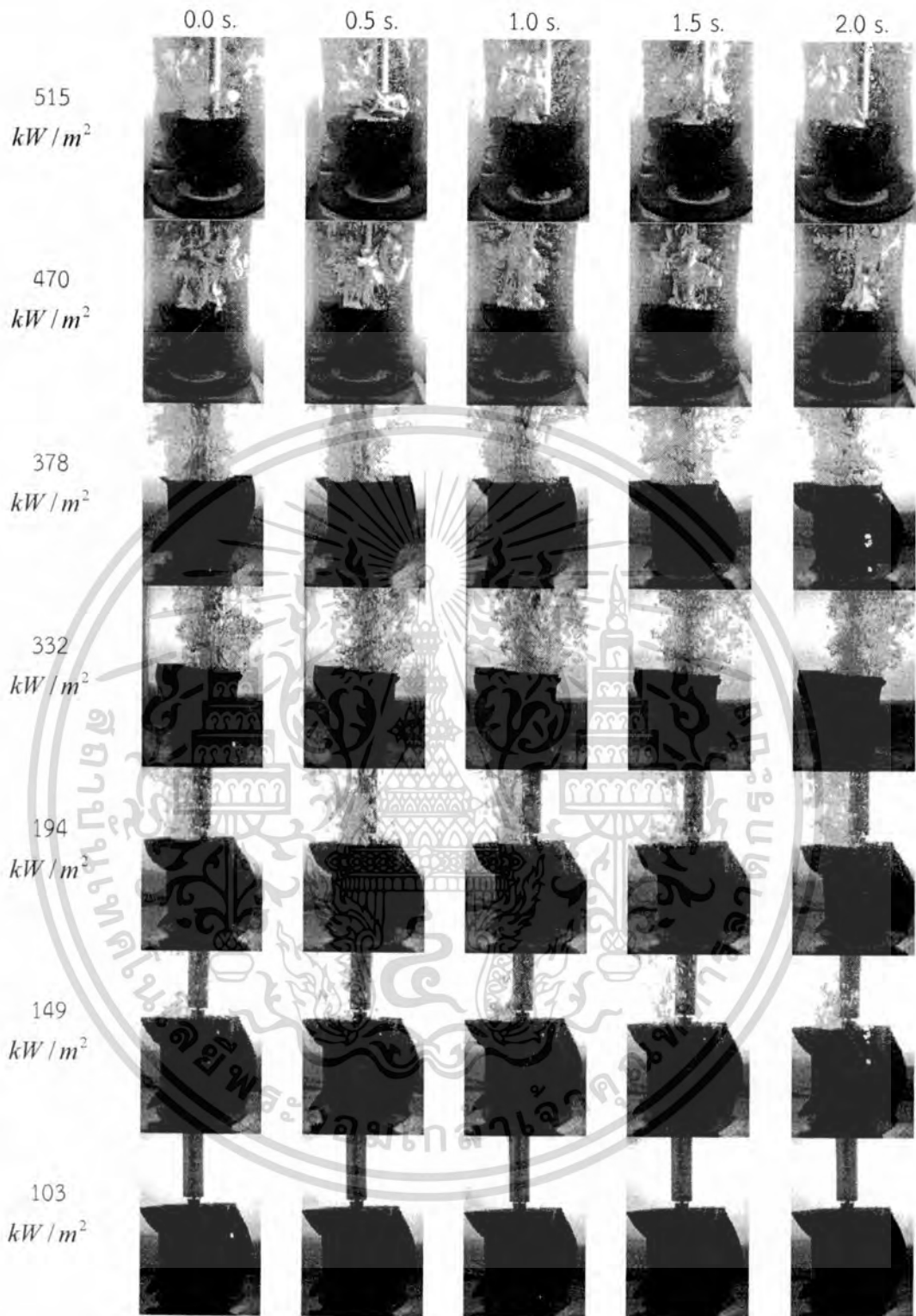
ภาพที่ 5.10 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ และระยะห่าง 10 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



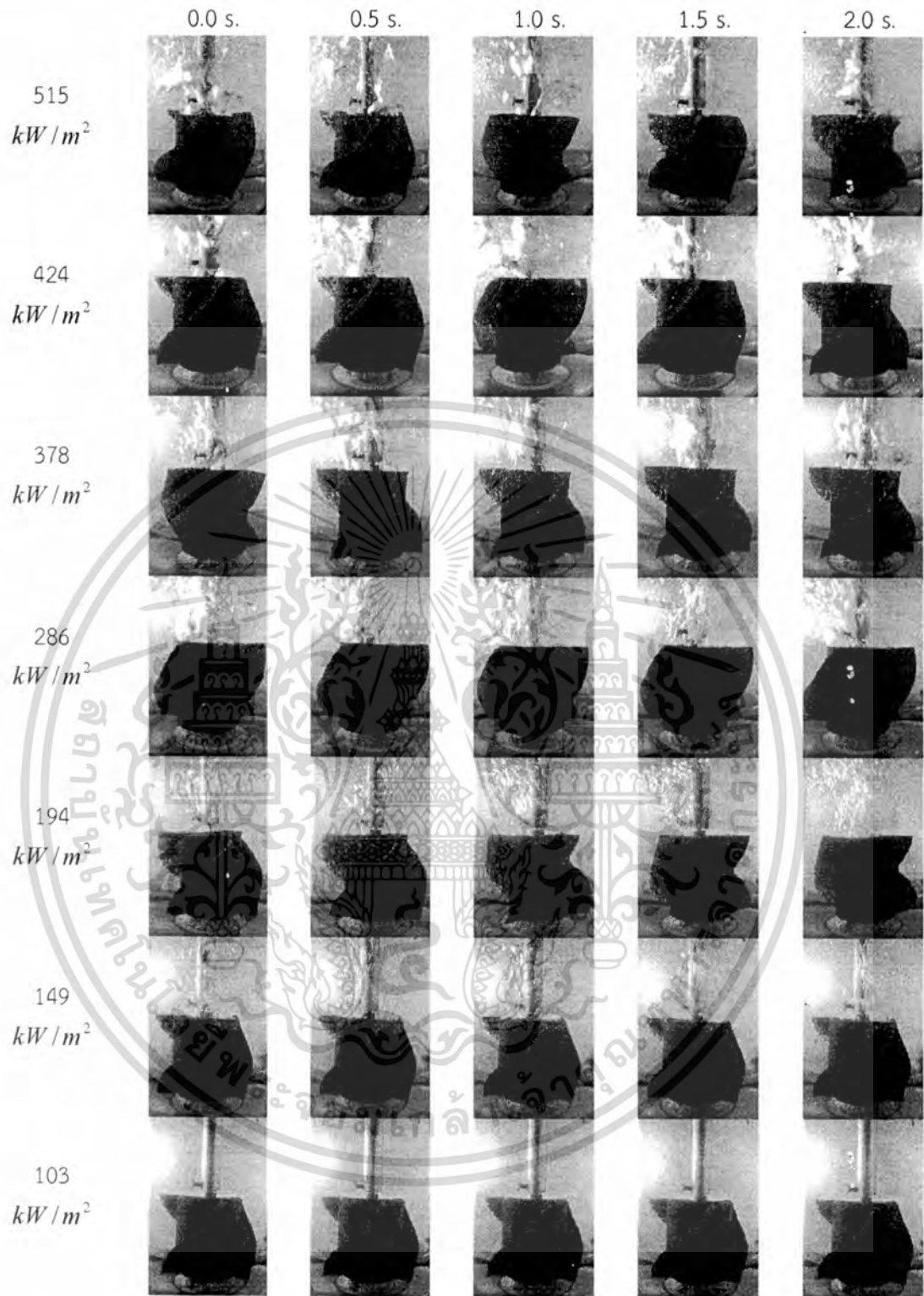
ภาพที่ 5.11 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ และระยะห่าง 15 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



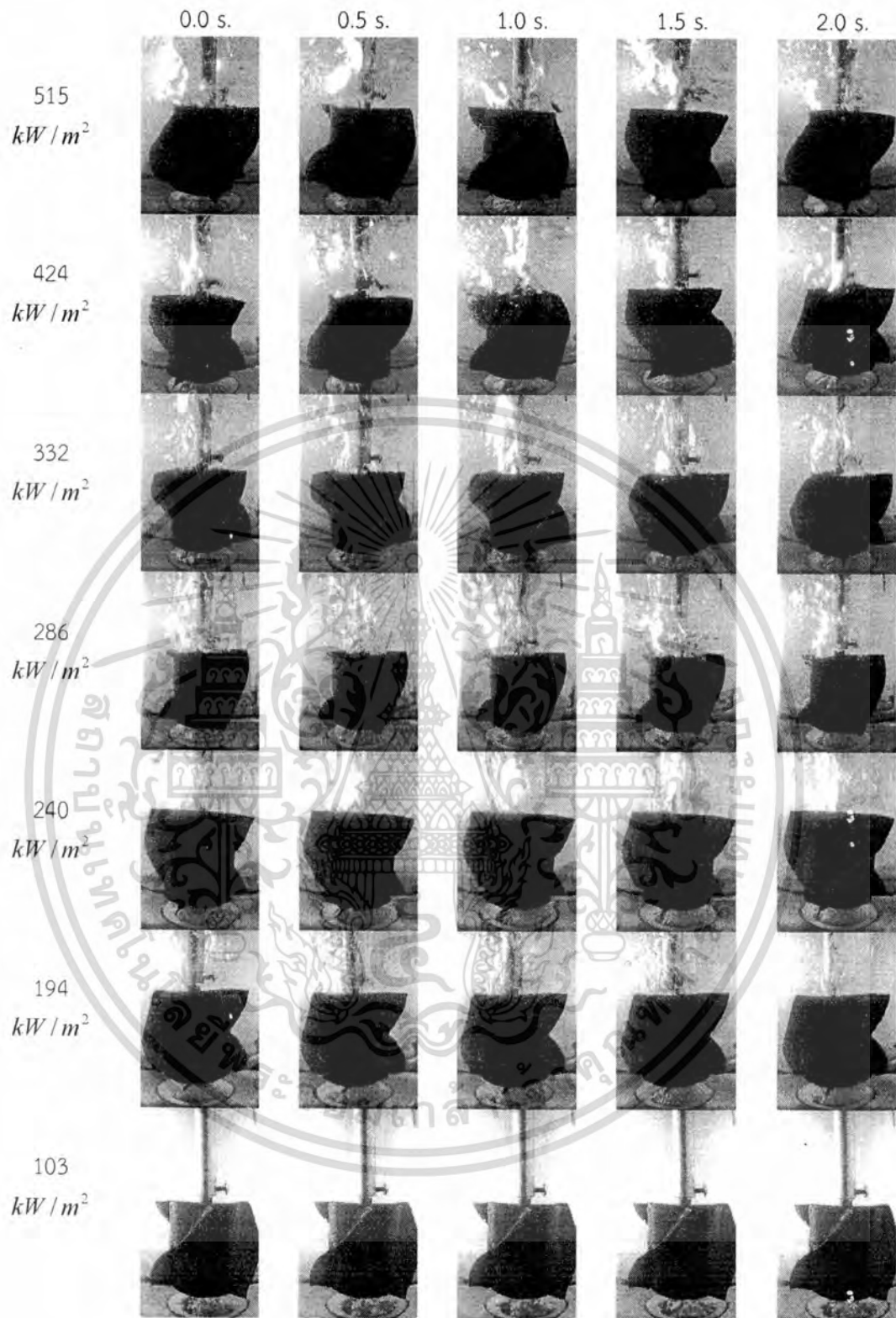
ภาพที่ 5.12 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ และระยะห่าง 5 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



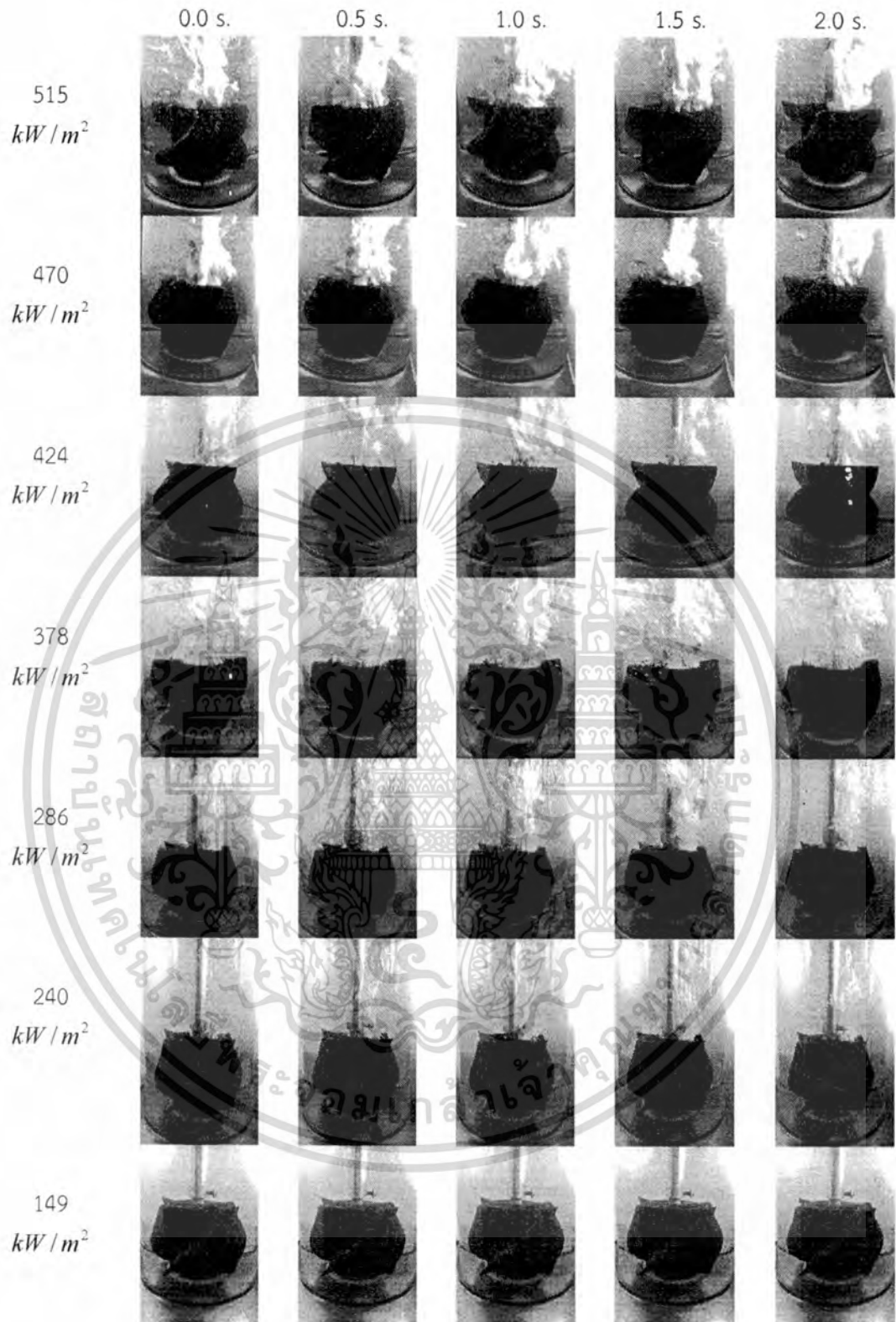
ภาพที่ 5.13 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ และระยะห่าง 10 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



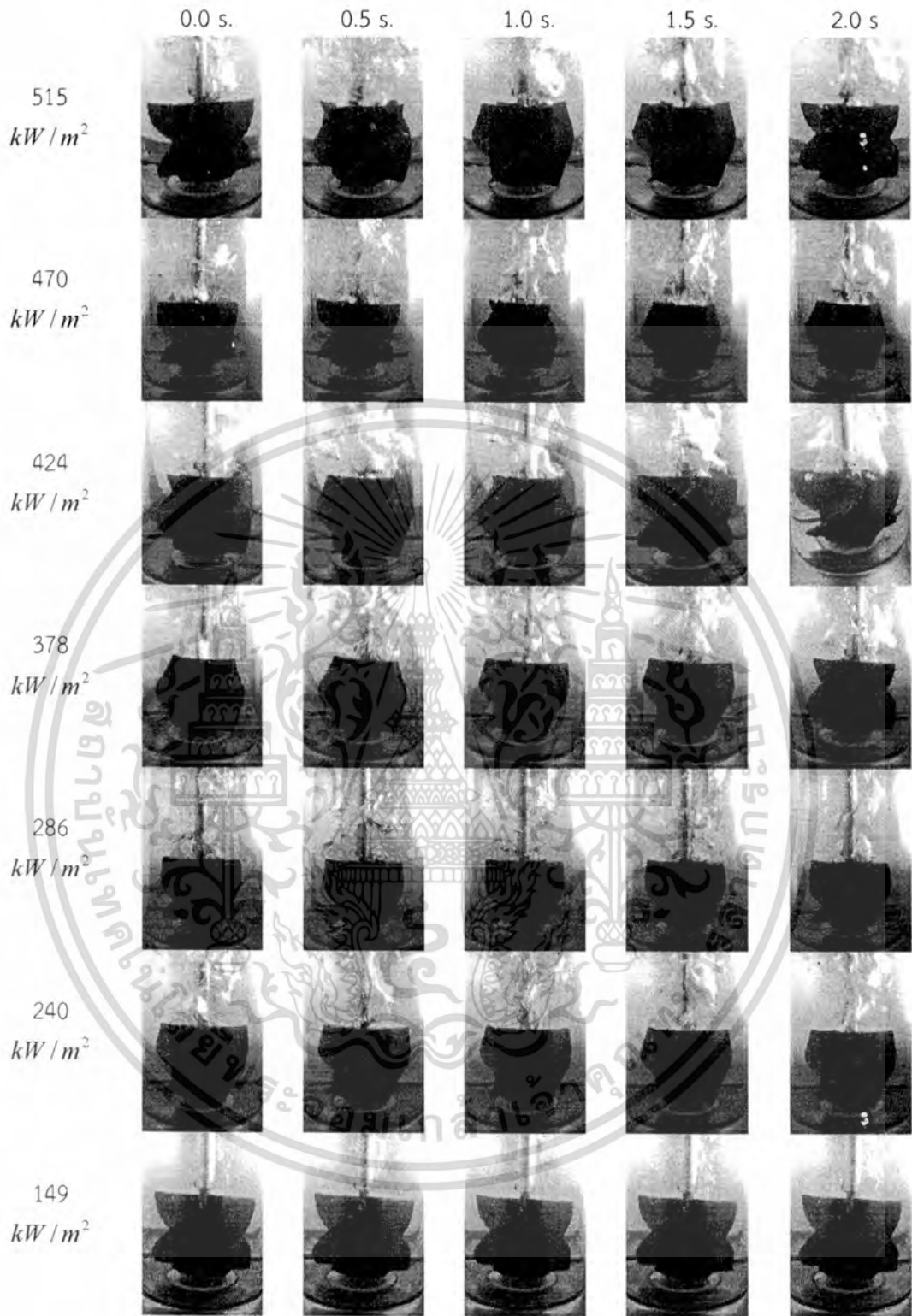
ภาพที่ 5.14 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ และระยะห่าง 15 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



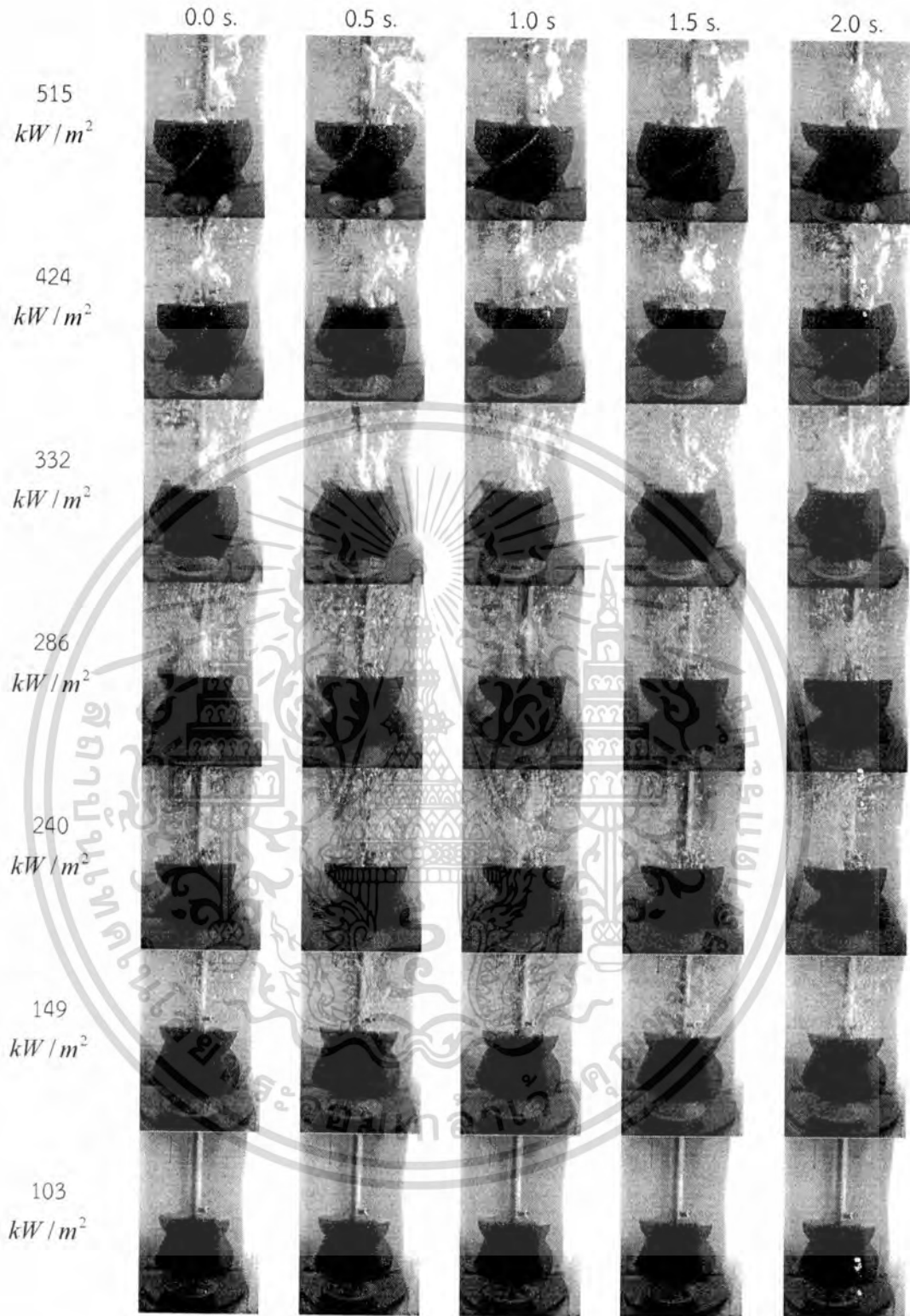
ภาพที่ 5.15 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ไ้ และระยะห่าง 5 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.16 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ และระยะห่าง 10 mm ไวเหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.17 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ และระยะห่าง 15 mm ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

จากการศึกษาการทดลองเกี่ยวกับคุณลักษณะของการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ที่ความดันบรรยากาศของน้ำกลั่น ซึ่งได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนโดยมีข้อมูลของ twisted tape ดังนี้ ความหนาของใบ 0.2 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง twisted tape 30 mm ความยาวของใบ 50 mm และมีมุมบิด เท่ากับ 90° ในการศึกษาทดลองครั้งนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนใบของ twisted tape เป็น 2 3 และ 4 ใบ ส่วนค่าระยะห่างระหว่างส่วนปลายของ twisted tape กับพื้นผิวให้ความร้อนเปลี่ยนแปลงเป็น 15 10 และ 5 mm ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

ในการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ เมื่อเทียบกับ Non twisted tape ซึ่ง twisted tape ชนิด 2 ใบ มีระยะห่าง 15 10 และ 5 mm เพิ่มขึ้นเป็น 0% 77% และ 57% ตามลำดับ ชนิด 3 ใบ ที่ระยะห่าง 15 10 และ 5 mm เพิ่มขึ้นเป็น 51% 59% และ 83% ตามลำดับ และชนิด 4 ใบ ที่ระยะห่าง 15 10 และ 5 mm เพิ่มขึ้นเป็น 68% 26% และ 66% ตามลำดับ

สำหรับการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของปลาย twisted tape กับพื้นผิวให้ความร้อนที่ 15 10 และ 5 mm พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ Non twisted tape ที่ระยะห่าง 15 mm ของชนิด 2 3 และ 4 ใบ เพิ่มขึ้นเป็น 0% 51% และ 68% ตามลำดับ ที่ระยะห่าง 10 mm ของ twisted tape ของชนิด 2 3 และ 4 ใบ เพิ่มขึ้นเป็น 77% 59% และ 26% ตามลำดับ และที่ระยะ 5 mm ของ twisted tape ของชนิด 2 3 และ 4 ใบ เพิ่มขึ้นเป็น 57% 83% และ 66% ตามลำดับ

6.2 ข้อควรระวังในงานวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับความร้อน ควรจะระมัดระวังไม่สัมผัสกับอุปกรณ์โดยตรงเพราะอาจเกิดอันตรายกับผิวหนัง สิ่งที่สำคัญในการทดลองไม่ควรทิ้งอุปกรณ์การทดลองไว้โดยลำพังในขณะที่ทำการทดลอง เนื่องจากอาจเกิดช่วงของ film boiling หากเกิดช่วงนี้ก็จะได้ทำการควบคุมได้ทันเวลาที่

6.3 ข้อเสนอแนะ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีความร้อนสูงเช่น หลอดแก้วทนความร้อน ก่อนที่จะทำการถอดควรปล่อยให้เย็นก่อนแล้วค่อยทำการดูน้ำกลั่นออก จากนั้นทำการขันอย่างระมัดระวังแล้วนำหลอดแก้วทนความร้อนมาทำความสะอาดโดยผสมน้ำยาล้างห้องน้ำ 1 ส่วน น้ำ 5 ส่วน ใช้ฟองน้ำทำความสะอาดทั้งด้านในและด้านนอก ล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วนำไปเป่าลม และที่สำคัญที่สุดในการติดตั้งหลอดแก้วทนความร้อน ควรขันอย่างระมัดระวังเพราะอาจทำให้หลอดแก้วทนความดันแตกได้

บรรณานุกรม

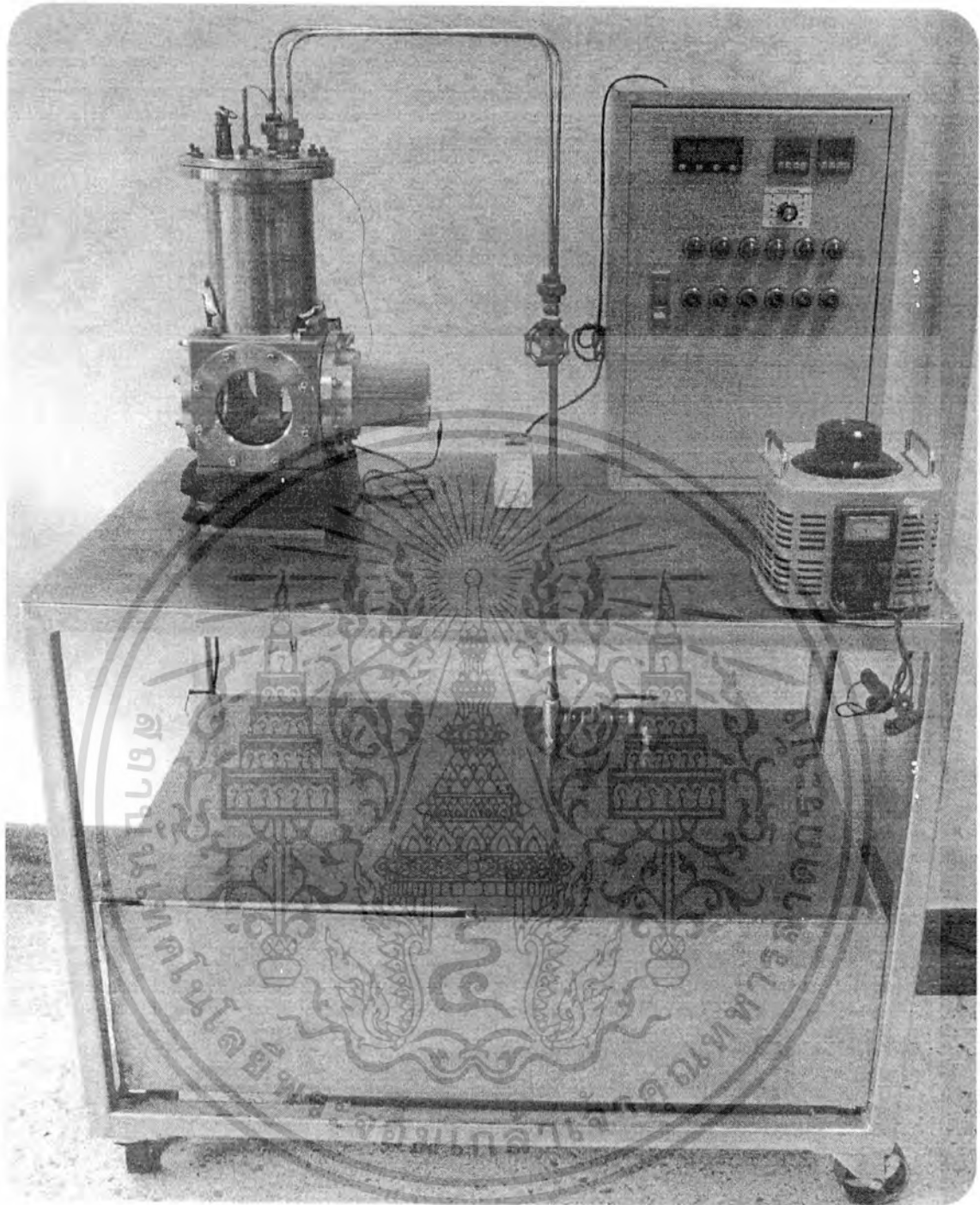
- [1] Cheng-kang Guan, James F. Klausner, Renwei Mei., 2011, "A new mechanistic model for pool horizontal surfaces". International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (2011) 3960–3969.
- [2] Dwight Cooke, Satish G. Kandlikar., 2011, "Effect of open microchannel geometry on pool boiling enhancement". International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 1004–1013.
- [3] C.M. Rops a, R. Lindken, J.F.M. Velthuis, J. Westerweel., 2009, "Enhanced heat transfer in confined pool boiling". International Journal of Heat and Fluid Flow 30 (2009) 751–760.
- [4] Robert Pastuszko.,2012, "Pool boiling for extended surfaces with narrow tunnels – Visualization and a simplified model Experimental Thermal and Fluid Science 38 (2012) 149–164.
- [5] Renkun Chen, Ming-Chang Lu, Vinod Srinivasan, Zhijie Wang, Hyung Hee Cho, and Arun Majumdar., 2008, "Nanowires for Enhanced Boiling Heat Transfer".
- [6] N. Singh, V. Sathyamurthy, W. Peterson, J. Arendt, D. Banerjee., 2010, "Flow boiling enhancement on a horizontal heater using carbon nanotube coatings". International Journal of Heat and Fluid Flow 31 (2010) 201–207.
- [7] Cengel, Y.A., Boles M.A., 2008, Thermodynamics, The McGraw-Hill companies, Inc, pp. 111-699.
- [8] Collier, J.G., Thome, J.R., 1994, "Convective boiling and condensation", Oxford university press, Inc, pp. 131-168.
- [9] Incropra, 2007, "Introduction to Heat Transfer Sixth Edition", John Wiley & Sons, Inc, pp. 622-630.
- [10] Cengel, Y.A., 2003, Heat transfer, The McGraw-Hill companies, Inc, pp. 459-500.
- [11] S.J. Kim, I.C.Banga, J. Buongiorno, International Journal of Heat and Mass Transfer (2007) 4105-4116.
- [12] www.enggyd.blogspot.com
- [13] www.heat.uta.edu.com
- [14]. Sarit K. Das, Nandy Putra, Wilfried Roetzel.,2002, "Pool boiling characteristics of nano-fluids", International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 851–862.
- [15]. Peter Vassallo, Ranganathan Kumar, Stephen D’Amico 2003, "Pool boiling heat transfer experiments in silica–water nano-fluids", International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 407–411.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [16]. In Cheol Bang, Soon Heung Chang, 2005, "Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nano-fluids from a plain surface in a pool", International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 2407-2419.
- [17]. Zhen-hua Liu, Liang Liao, 2008, "Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling", International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 2593-2602.
- [18]. Visinee Trisaksri, Somchai Wongwises, 2009, "Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 1582-1588.
- [19]. Visinee Trisaksri, Somchai Wongwises, 2009, "Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂-R141b nanofluids", International Journal of Heat and mass Transfer 52 (2009) 1582-1588.
- [20]. Robert Pastuszko* Pool boiling on micro - fin array with wire mesh structures, International Journal of Thermal Sciences (2010) 25-314.

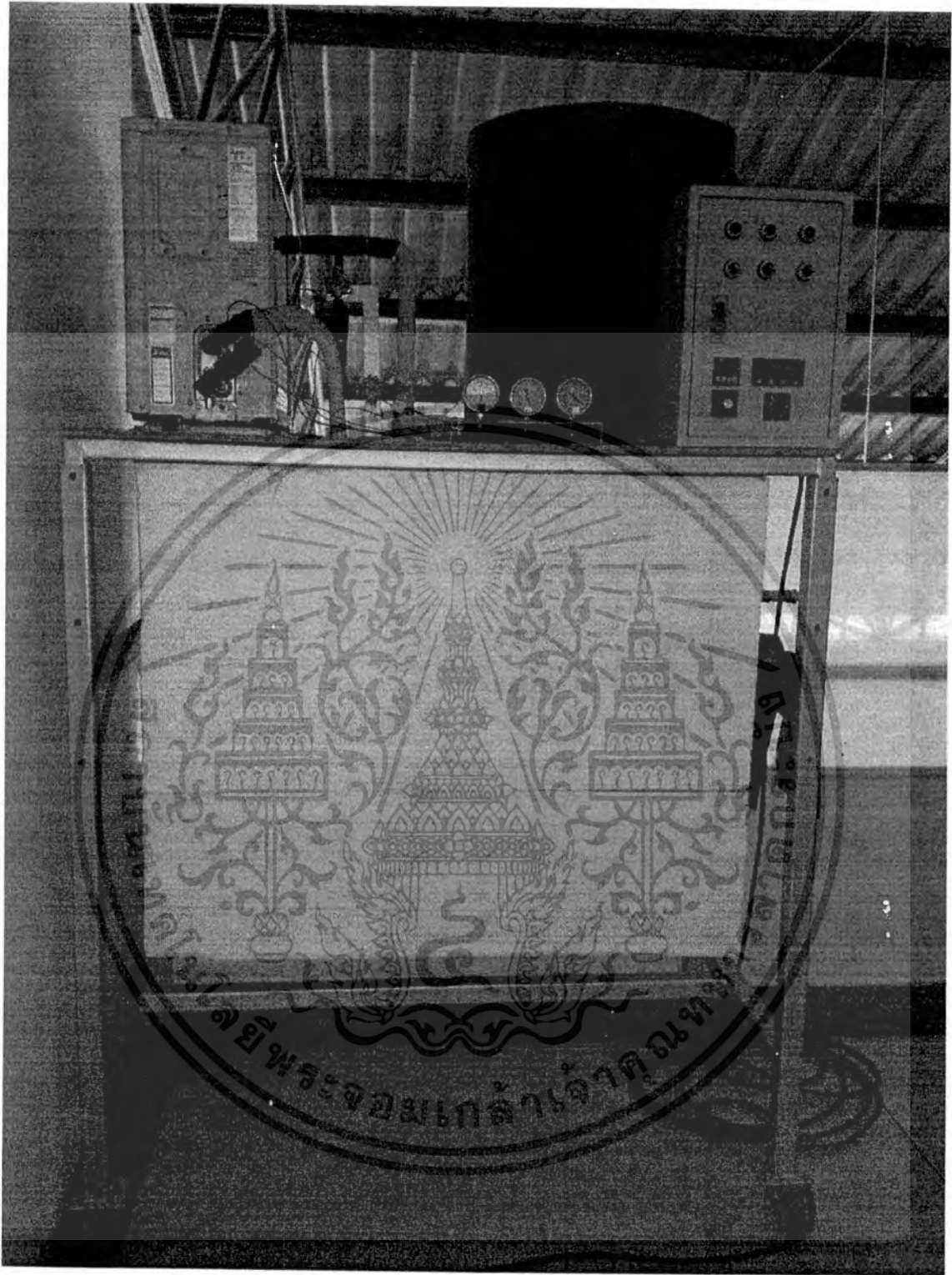


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 แสดงชุดอุปกรณ์ทดลอง Boiling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 แสดงชุดอุปกรณ์ทำความเย็นให้กับการทดสอบ Pool boiling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

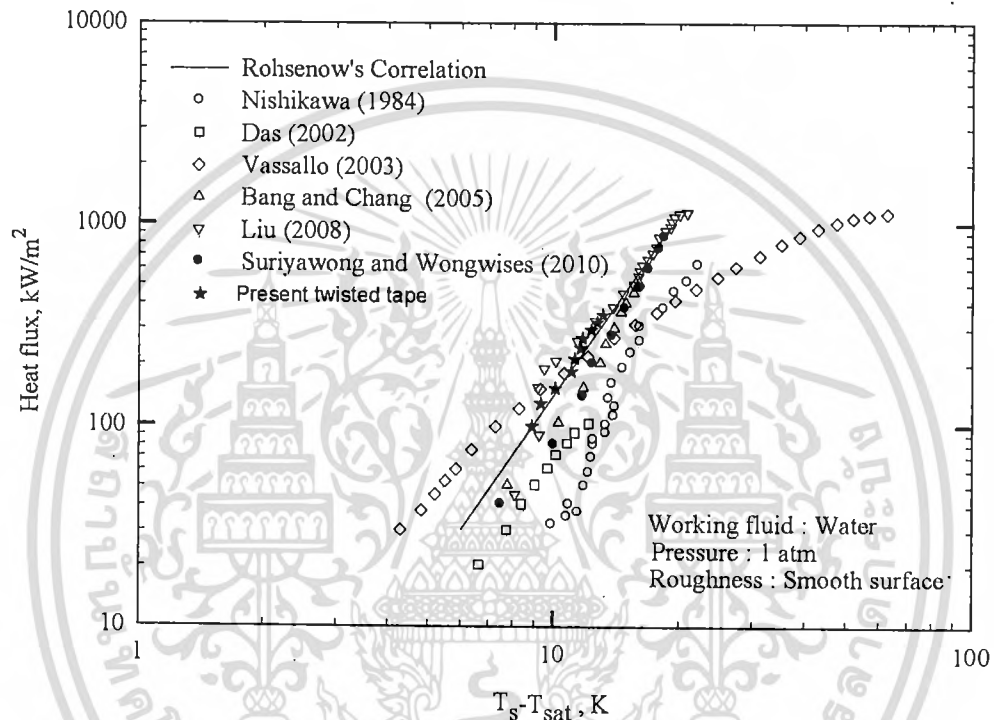


ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 การเทียบสอบอุปกรณ์การทดลอง

การเทียบสอบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำนายคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ซึ่งใช้น้ำกลั่นเป็น working fluids ในการทดสอบ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ สหพันธ์ของ Rohsenow's นอกจากนี้ยังได้นำข้อมูลการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ มาทำการเปรียบเทียบด้วยดังแสดงในรูปที่ ข.1 ซึ่งเป็นกราฟ pool boiling curve ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $T_s - T_{sat}$ กับ heat flux จากผลการเทียบ พบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปในทางทิศเดียวกันกับสหพันธ์ของ Rohsenow's และอยู่ในกลุ่มข้อมูลการทดลองของ นักวิจัยท่านอื่นๆ



รูปที่ ข.1 การเปรียบเทียบค่า heat flux ที่ได้จากการทดลองสหพันธ์ของ Rohsenow's และการทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ

ข.2 ผลการทดลองของเส้นผ่านศูนย์กลาง twisted tape ที่เพิ่มขึ้น

จากการทดลองเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ที่มีผลต่อคุณลักษณะ pool boiling curve และ heat transfer coefficient ซึ่งทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ข้อมูลของ twisted tape มีดังนี้ ความหนาของใบ 0.2 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ขนาด 30 35 และ 40 mm. ความยาวของใบ twisted tape 30 mm. และระยะ pitch 120 mm. นอกจากนี้ ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลง จำนวนใบของ twisted tape เป็น 2 3 และ 4 ใบ ส่วนค่าระยะห่างระหว่างพื้นผิวให้ความร้อนกับปลายของ twisted tape ทำการเปลี่ยนแปลงเป็น 5 10 และ 15 mm. และทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ขนาด 30 35 และ 40 mm. ผลของการทดลองแสดงในรูปที่ 5.2 ถึง 5.10 มีรายละเอียดดังนี้

พิจารณาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบของทองแดงที่ทำการแปลงเปลี่ยนจำนวนใบของ twisted tape เป็น 2 3 และ 4 ใบ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ขนาด 30 35 และ 40 mm. ดังแสดงในรูปที่ ข.2 ถึง ข.10 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นที่ติดตั้งอุปกรณ์ twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนเป็นระยะ 5 10 และ 15 mm. ตามลำดับ

รูปที่ ข.2(ก) – ข.10(ก) เป็นกราฟ boiling curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $T_s - T_{sat}$ กับค่า heat flux จากกราฟผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลการทดลองอยู่ในช่วง $T_s - T_{sat}$ ที่ประมาณ 7 – 15 K จากกราฟที่ $T_s - T_{sat}$ เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าของ heat flux เพิ่มขึ้นด้วยใน ทุก ๆ การทดลอง นอกจากนี้ twisted tape ชนิด 3 ใบ และ twisted tape ชนิด 4 ใบ จะมีคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ในข้อมูลการทดลองของ twisted tape ชนิด 2 ใบพบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm มีค่าคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ลดลงเมื่อเทียบกับ non twisted tape เพราะเมื่อเพิ่มค่าการให้ความร้อนมากขึ้นใบบิดมีการหมุนไม่คงที่จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 และ 40 mm. ค่าคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับ non twisted tape เพราะ ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. แรงแลยตัวจาก bubble ที่เกิดขึ้น เมื่อลอยสูงขึ้นแรงแลยตัวก็จะลดลงจึงไม่สามารถทำให้ twisted tape หมุนได้อย่างต่อเนื่อง

รูปที่ ข.2(ข) – ข.10(ข) แสดงกราฟ pool boiling heat transfer coefficient ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง heat flux กับค่า heat transfer coefficient จากกราฟผลการทดลองพบว่าเมื่อเทียบที่ค่า heat flux เดียวกัน ค่า heat transfer coefficient ของ twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 และ 40 mm. twisted tape ชนิด 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 35 และ 40 mm. เพิ่มขึ้นมากกว่า non twisted tape ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่าเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง twisted tape พื้นที่ในการรับแรงดันจาก bubble จะไปดัน twisted tape ให้หมุนได้มากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความปั่นป่วนที่บริเวณพื้นผิวให้ความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย นั่นหมายความว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า heat transfer coefficient เพิ่มขึ้น ที่ twisted tape ชนิด 4 ใบ twisted tape ชนิด 3 ใบ และ twisted tape ชนิด 2 ใบ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดังต่อไปนี้

Twisted tape ชนิด 4 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 5 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 6% 8% และ 27% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 4 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 10 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 1% 1% และ 15% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 4 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 0% 0% และ 10% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 3 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 5 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 12% 15% และ 16% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 3 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 10 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 6% 7% และ 13% ตามลำดับ

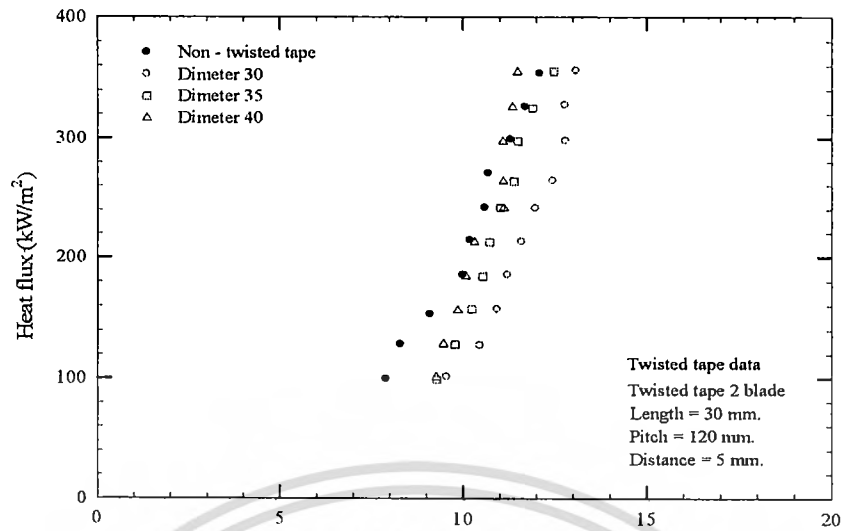
Twisted tape ชนิด 3 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 4% 5% และ 10% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 2 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. ลดลงเนื่องจากใบบิดมีการหมุนที่ไม่คงที่ในขณะที่ heat flux เพิ่มขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง

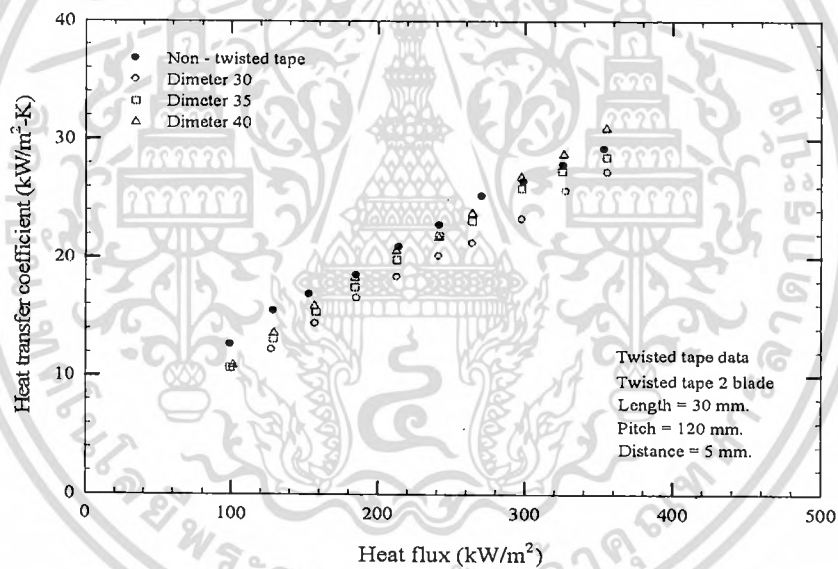
Twisted tape ชนิด 2 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 5 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 0% และ 15%

Twisted tape ชนิด 2 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 10 mm. ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับ non twisted tape

Twisted tape ชนิด 2 ใบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. และ 40 mm. ที่ระยะ 15 mm. ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับ non twisted tape



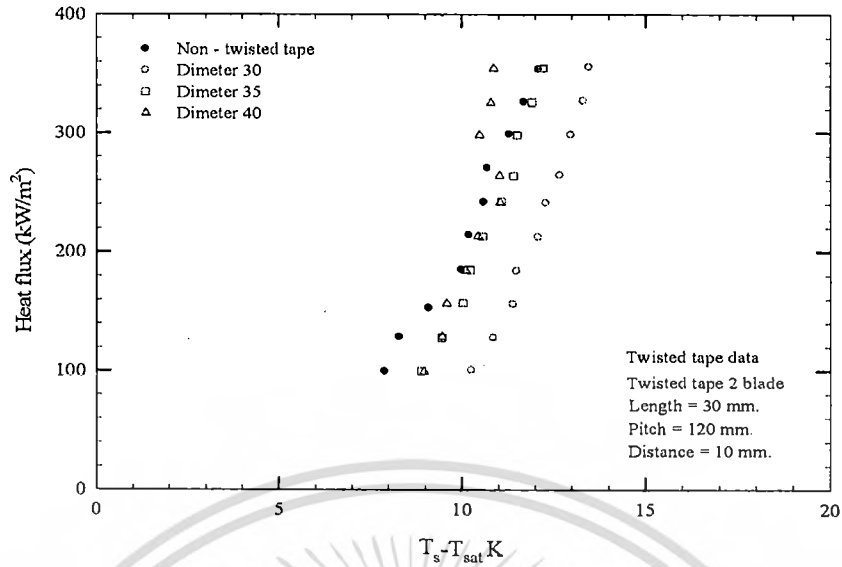
(ก) Pool boiling curve



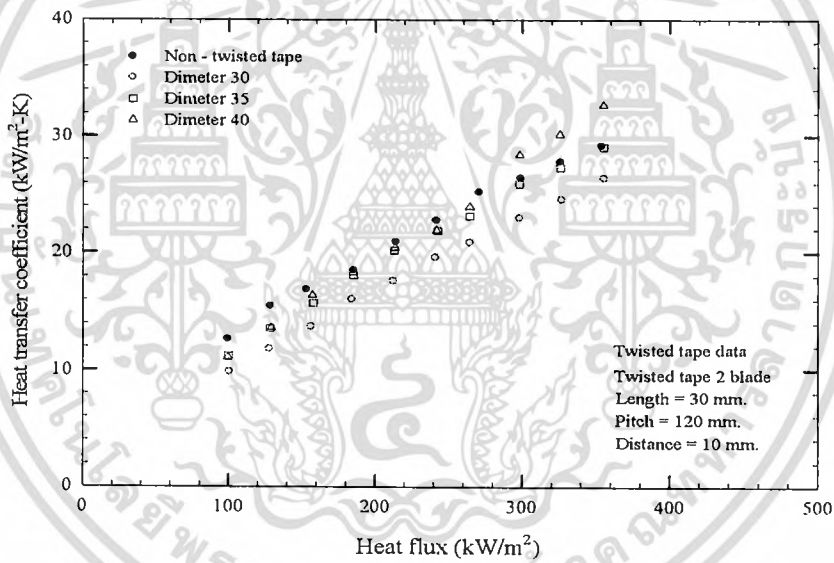
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.2 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

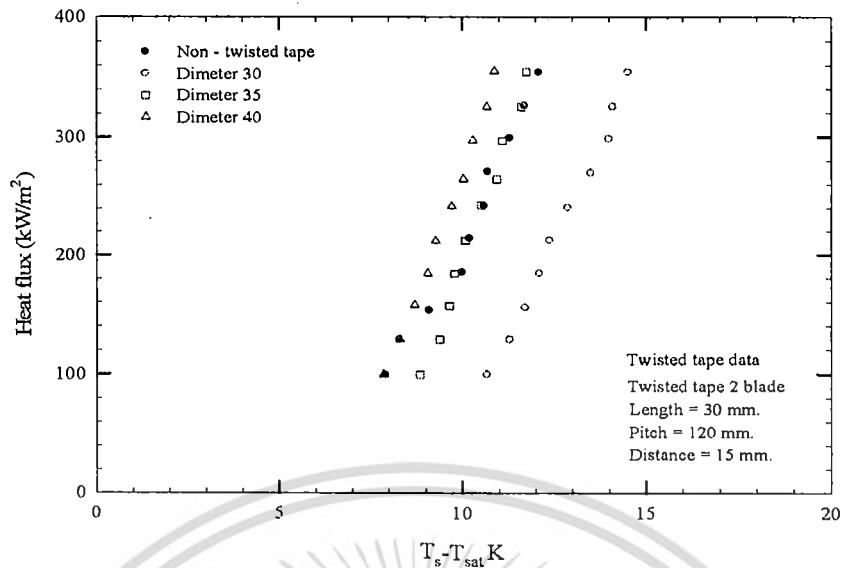


(ก) Pool boiling curve

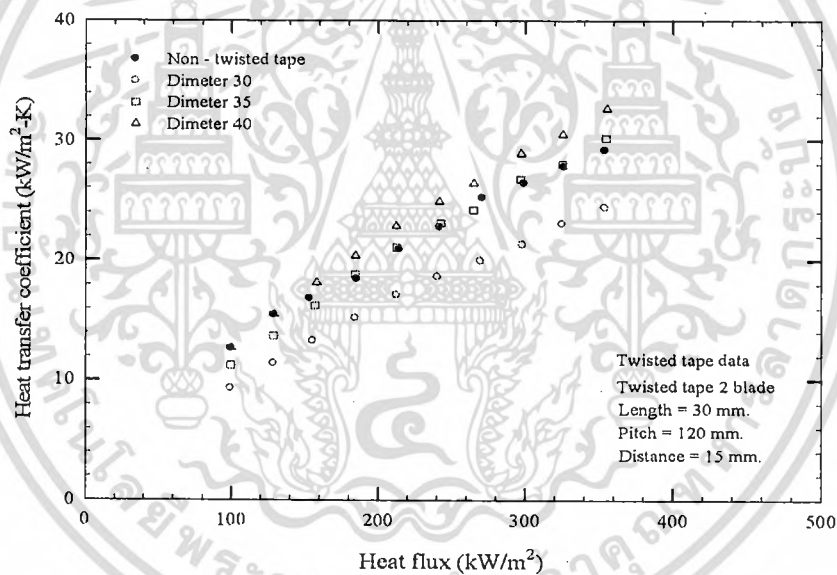


(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.3 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 10 mm.



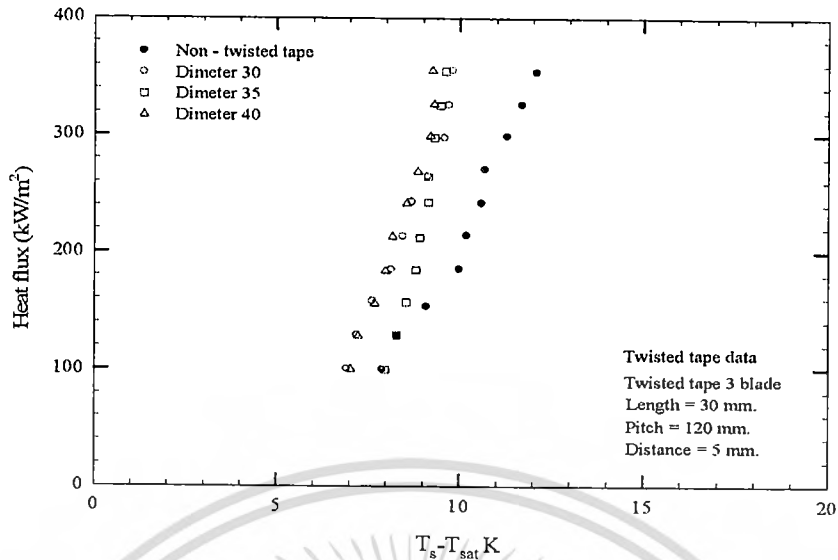
(ก) Pool boiling curve



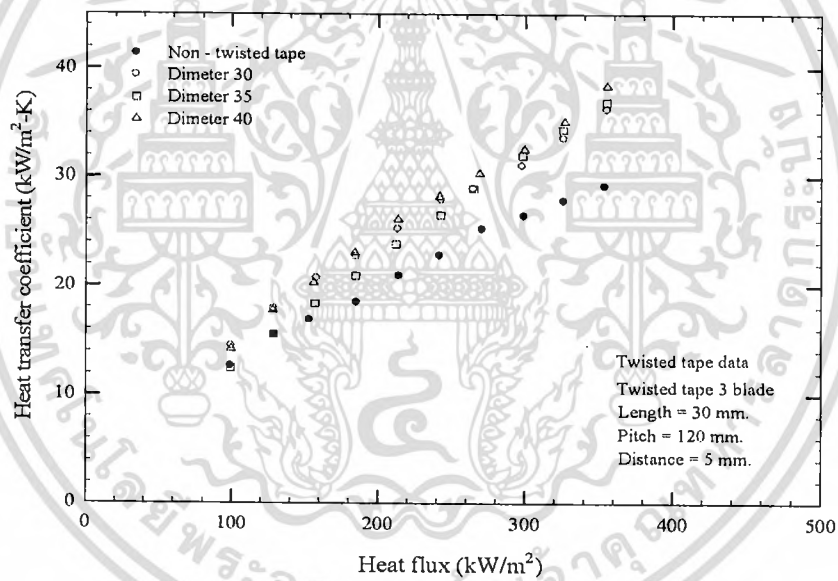
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.4 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 15 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

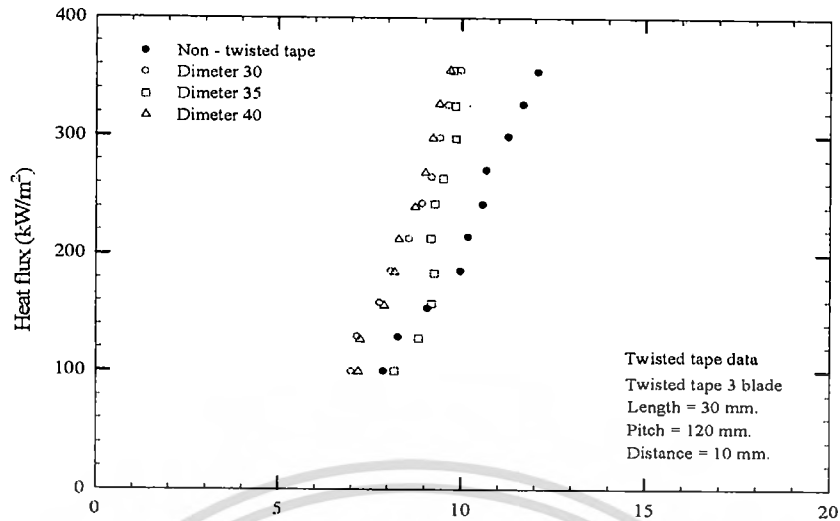


(n) Pool boiling curve

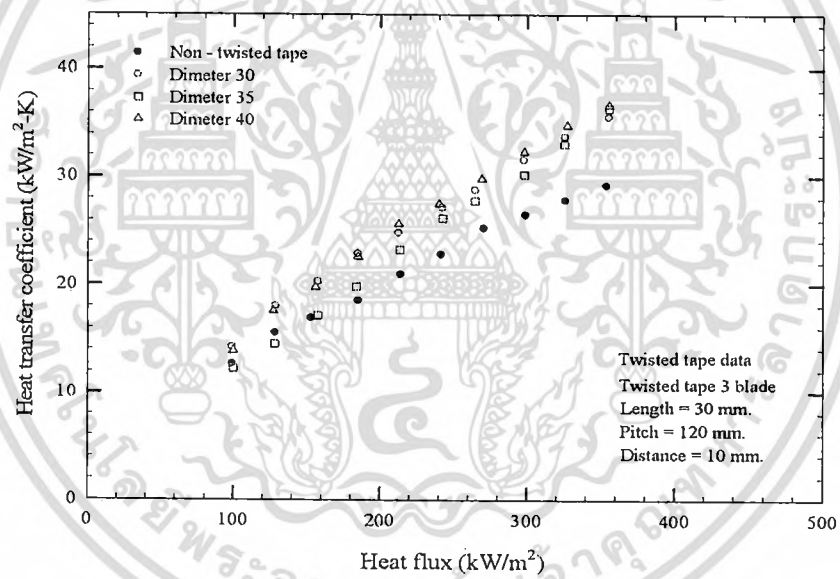


(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.5 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 5 mm.



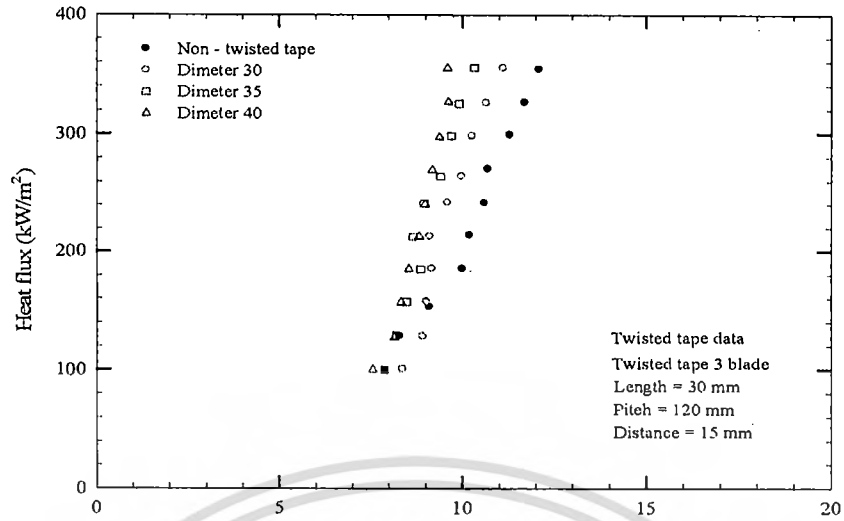
(ก) Pool boiling curve



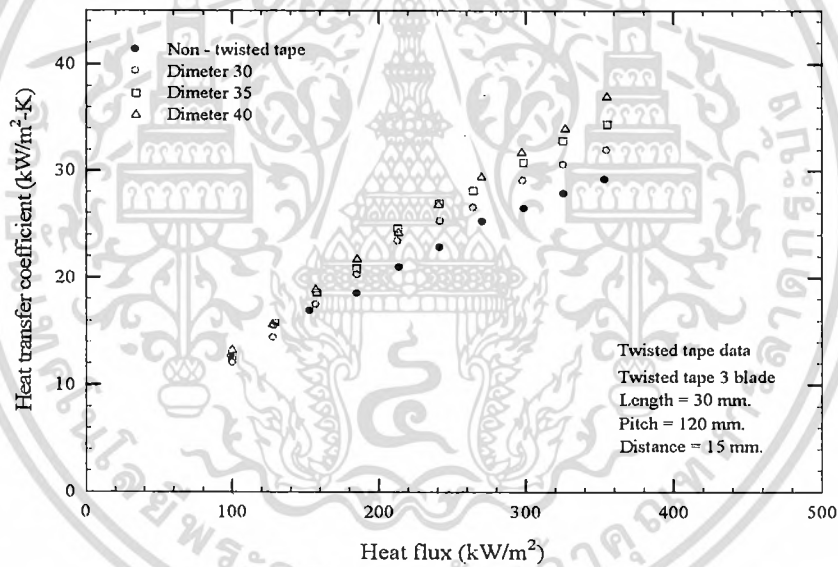
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.6 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 10 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



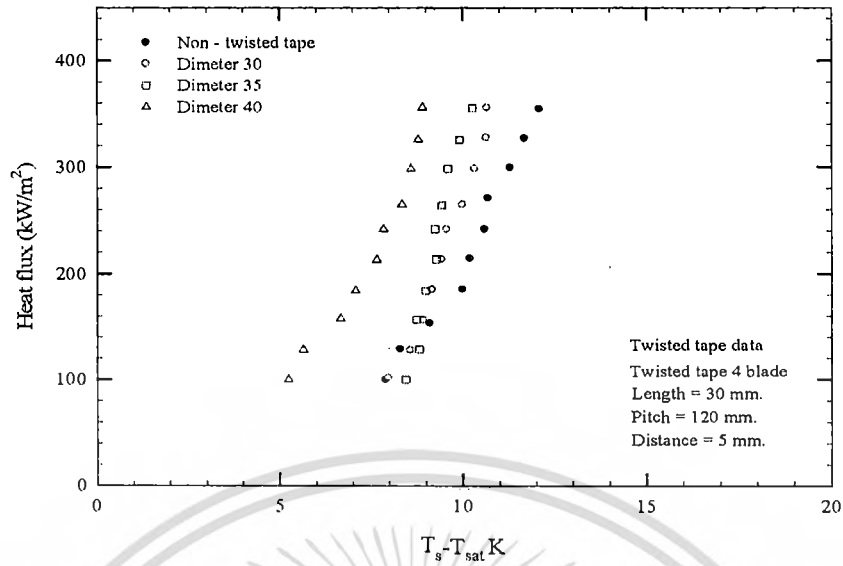
(ก) Pool boiling curve



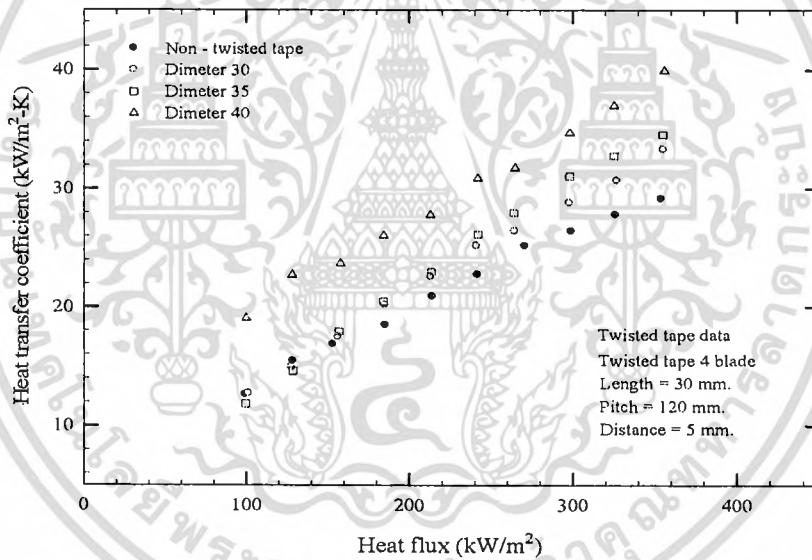
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.7 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 15 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



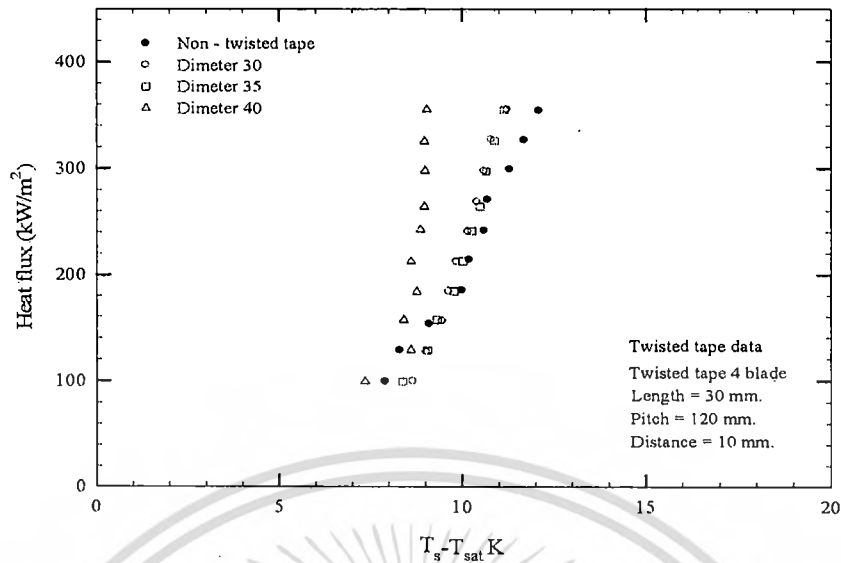
(ก) Pool boiling curve



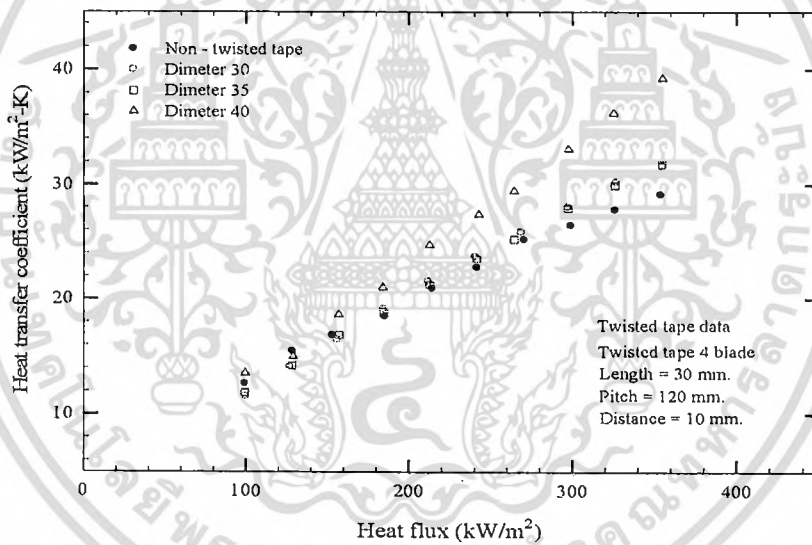
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.8 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



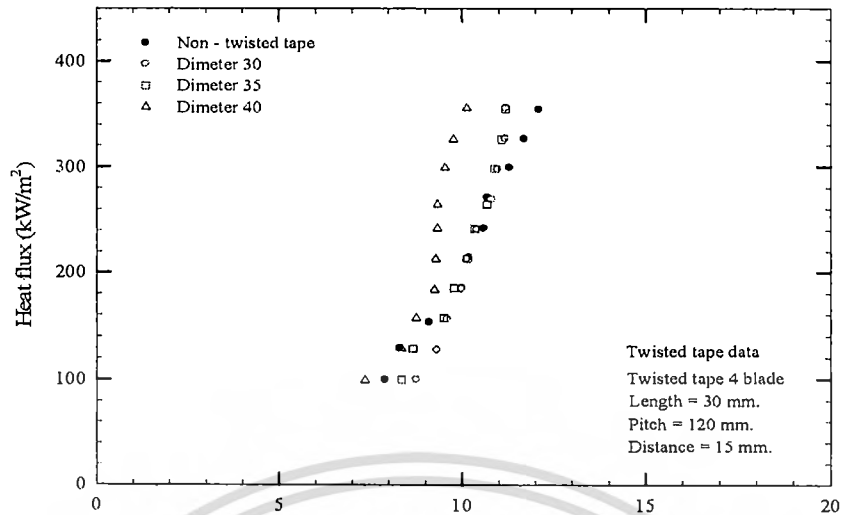
(ก) Pool boiling curve



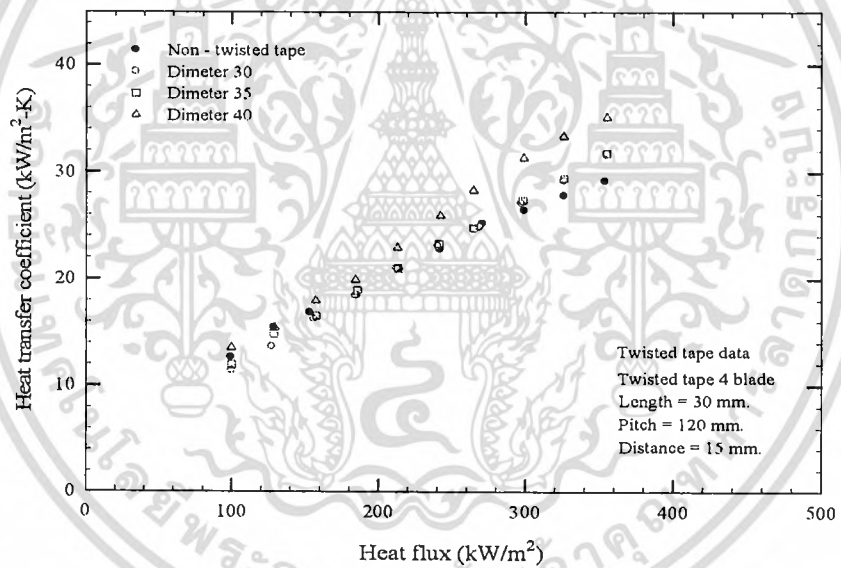
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.9 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 10 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Pool boiling curve



(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.10 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ที่ระยะห่าง 15 mm.

ข.3 ผลการทดลองจำนวนใบของ twisted tape

จากการทดลองเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองของจำนวนใบ twisted tape ที่มีผลต่อคุณลักษณะ pool boiling curve และ heat transfer coefficient ซึ่งทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ ข้อมูลของ twisted tape มีดังนี้ ความหนาของใบ 0.2 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ขนาด 30 35 mm. และ 40 mm. ความยาวของใบ twisted tape 30 mm. และระยะ pitch 120 mm. นอกจากนี้ ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลง จำนวนใบของ twisted tape เป็น 2 3 และ 4 ใบ ส่วนค่าระยะห่างระหว่างพื้นผิวให้ความร้อนกับปลายของ twisted tape ทำการเปลี่ยนแปลงเป็น 5 10 และ 15 mm. และได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ขนาด 30 35 และ 40 mm. ผลของการทดลอง แสดงในรูปที่ ข.11 ถึง ข.19 มีรายละเอียดดังนี้

พิจารณาคคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวเรียบของทองแดงที่ทำการแปลงเปลี่ยนจำนวนใบของ twisted tape เป็น 2 3 และ 4 ใบ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape 30 35 และ 40 mm. ดังแสดงในรูปที่ ข.11 ถึง ข.19 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นที่ติดตั้งอุปกรณ์ twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อนเป็นระยะ 5 10 และ 15 mm. ตามลำดับ

รูปที่ ข.11(ก) – ข.19(ก) เป็นกราฟ boiling curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $T_s - T_{sat}$ กับค่า heat flux จากกราฟผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลการทดลองอยู่ในช่วง $T_s - T_{sat}$ ที่ประมาณ 7 – 15 K จากกราฟที่ $T_s - T_{sat}$ เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าของ heat flux เพิ่มขึ้นด้วยใน ทุก ๆ การทดลอง นอกจากนี้ที่ twisted tape ชนิด 3 ใบ และ twisted tape ชนิด 4 ใบ จะมีคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ในข้อมูลการทดลองของ twisted tape ชนิด 2 ใบพบว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. มีค่าคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ลดลงเมื่อเทียบกับ non twisted tape เพราะเมื่อเพิ่มค่าการให้ความร้อนมากขึ้นใบบิดมีการหมุนไม่คงที่จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 และ 40 mm. ค่าคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับ non twisted tape เพราะ ที่ระยะ 10 และ 15 mm. แแรงลอยตัวจาก bubble ที่เกิดขึ้น เมื่อลอยสูงขึ้นแรงลอยตัวก็จะลดลงจึงไม่สามารถทำให้ twisted tape หมุนได้อย่างต่อเนื่อง

รูปที่ ข.11(ข) – ข.19(ข) แสดงกราฟ pool boiling heat transfer coefficient ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง heat flux กับค่า heat transfer coefficient จากกราฟผลการทดลองพบว่าเมื่อเทียบที่ค่า heat flux เดียวกัน ค่า heat transfer coefficient ของ twisted tape เพิ่มขึ้นมากกว่า non twisted tape ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่าเมื่อติด twisted tape แรงแดันจาก bubble จะไปดัน twisted tape ให้หมุนเสมือนเป็นใบกวน working fluids ส่งผลทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นที่บริเวณพื้นผิวให้ความร้อน นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนใบของ twisted tape เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดความปั่นป่วนที่บริเวณพื้นผิวให้ความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย นั่นหมายความว่าผลการทดลองของ twisted tape ชนิด 3 ใบ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 35 mm. เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า twisted tape ชนิด 2 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 35 mm. และผลการทดลองของ Twisted tape ชนิด 4 ใบ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. เพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า twisted tape ชนิด 3 และ 2 ใบ ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 35 และ 40 mm. ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดังต่อไปนี้

Twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 6% 1% และ 0% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 8% 1% และ 0% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 27% 15% และ 10% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 12% 6% และ 4% ตามลำดับ

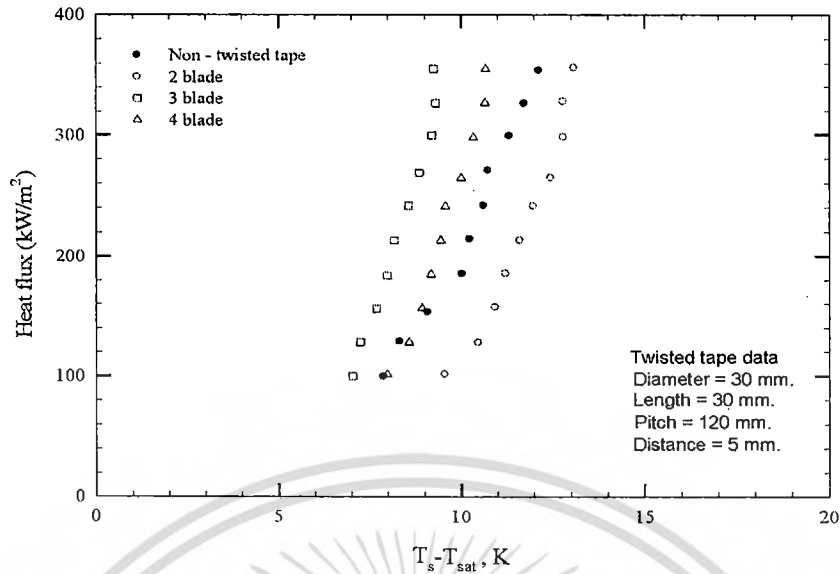
Twisted tape ชนิด 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 15% 7% และ 5% ตามลำดับ

Twisted tape ชนิด 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 16% 13% และ 10% ตามลำดับ

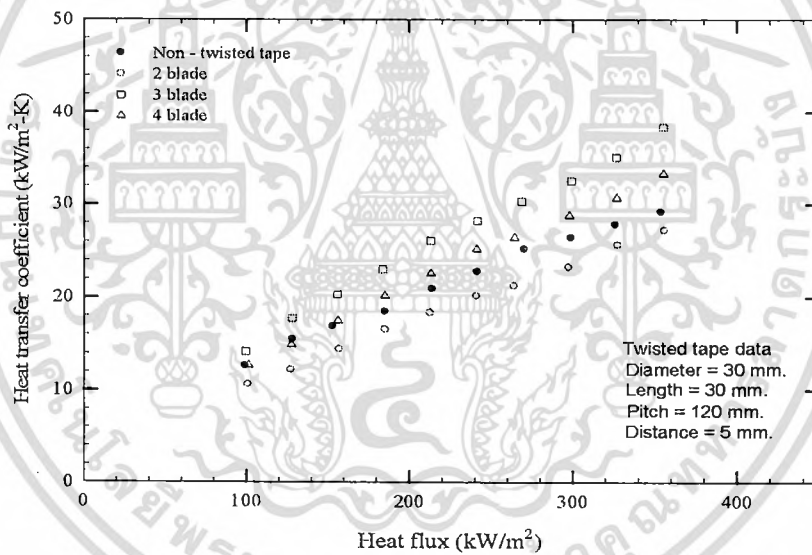
Twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. ลดลงเนื่องจากใบ บิดมีการหมุนที่ไม่คงที่ในขณะที่ heat flux เพิ่มขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง

Twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับ non twisted tape

Twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 15% 0% และ 0% ตามลำดับ



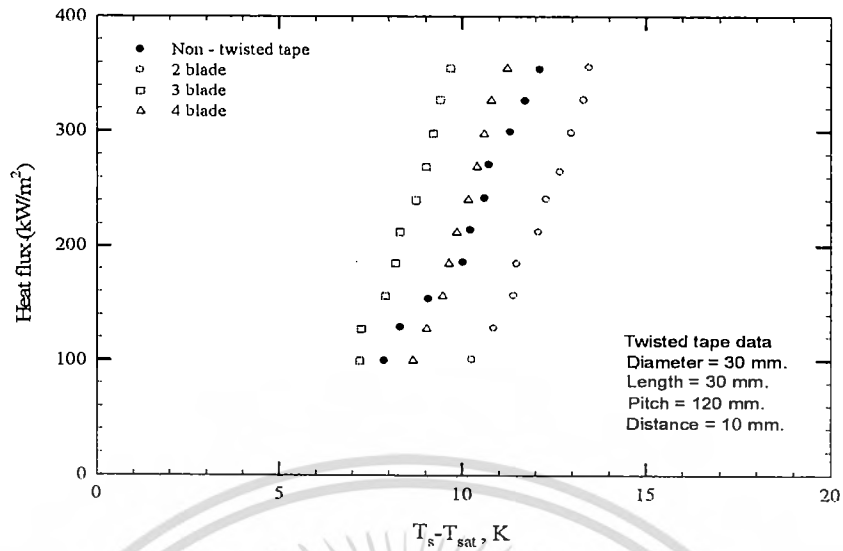
(ก) Pool boiling curve



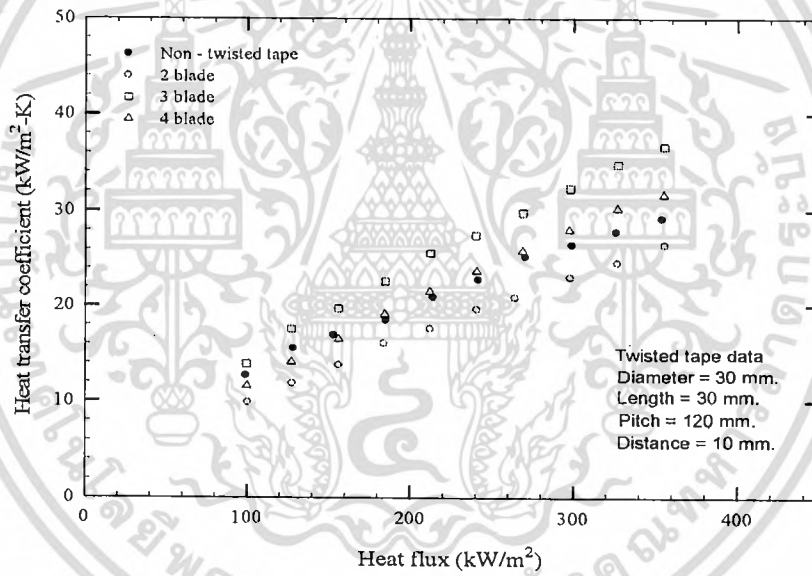
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.11 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะห่าง 5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



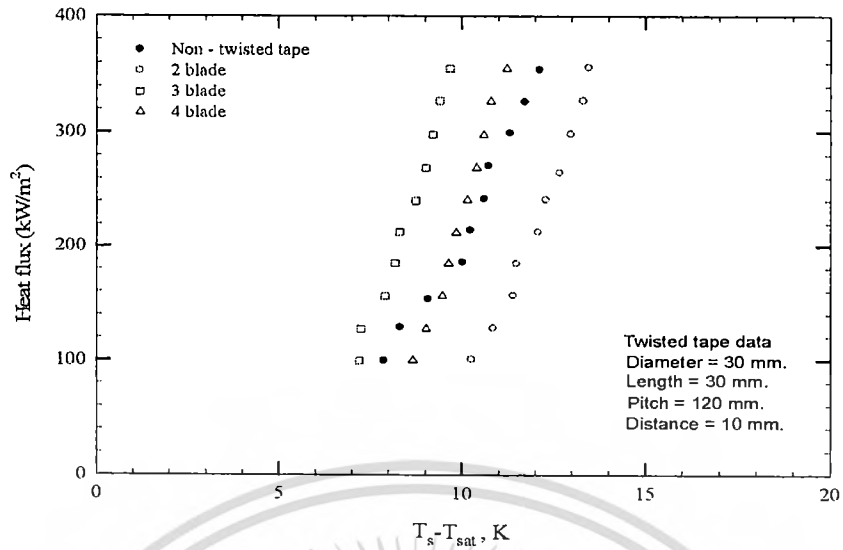
(ก) Pool boiling curve



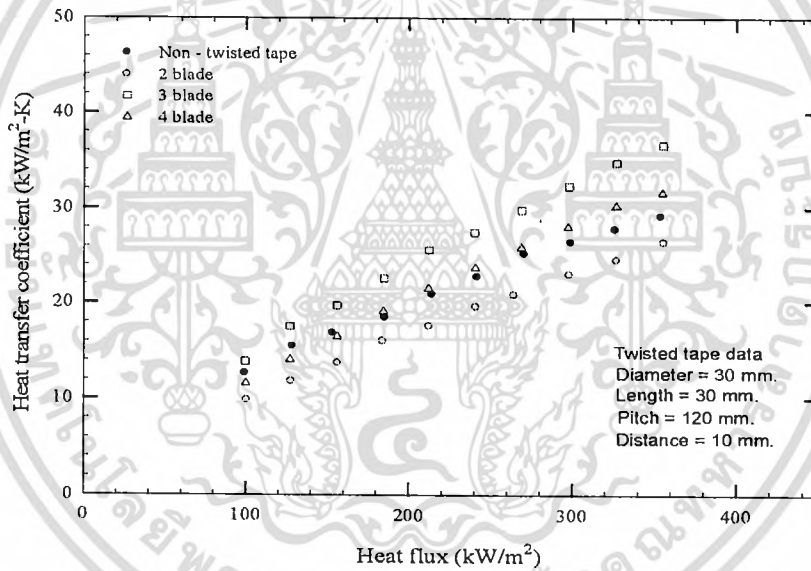
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.12 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะห่าง 10 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

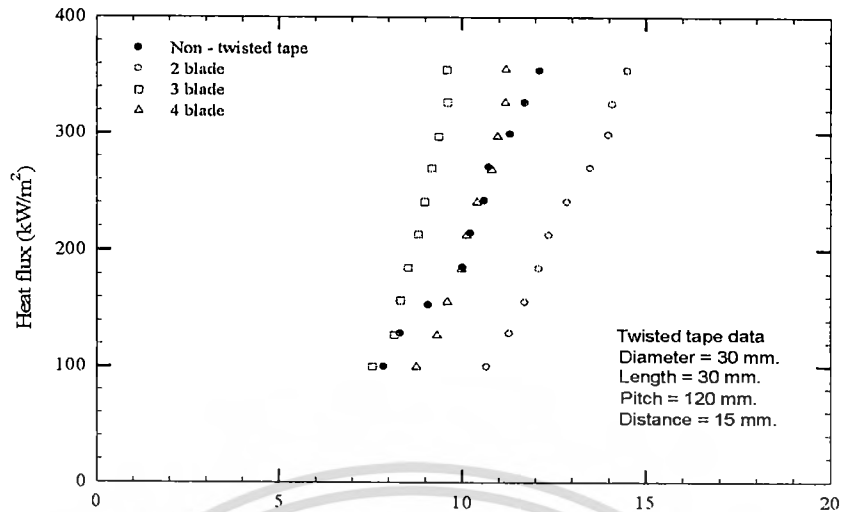


(น) Pool boiling curve

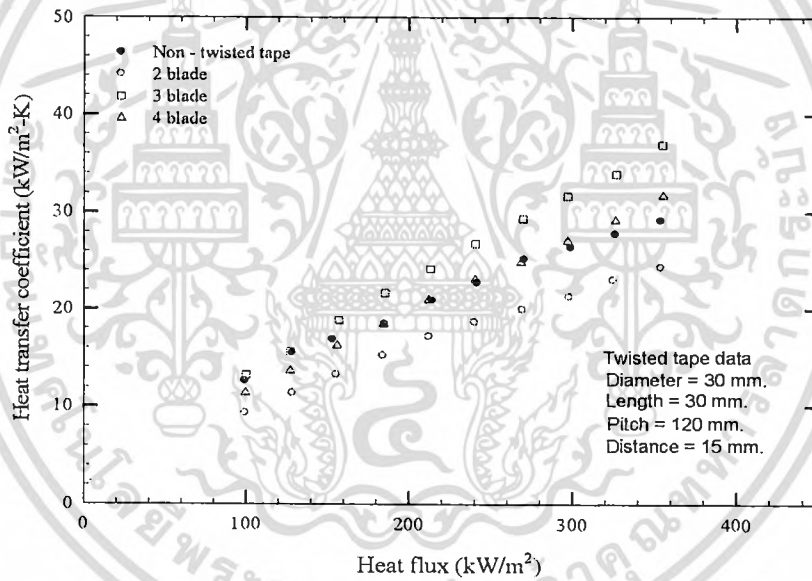


(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.12 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะห่าง 10 mm.

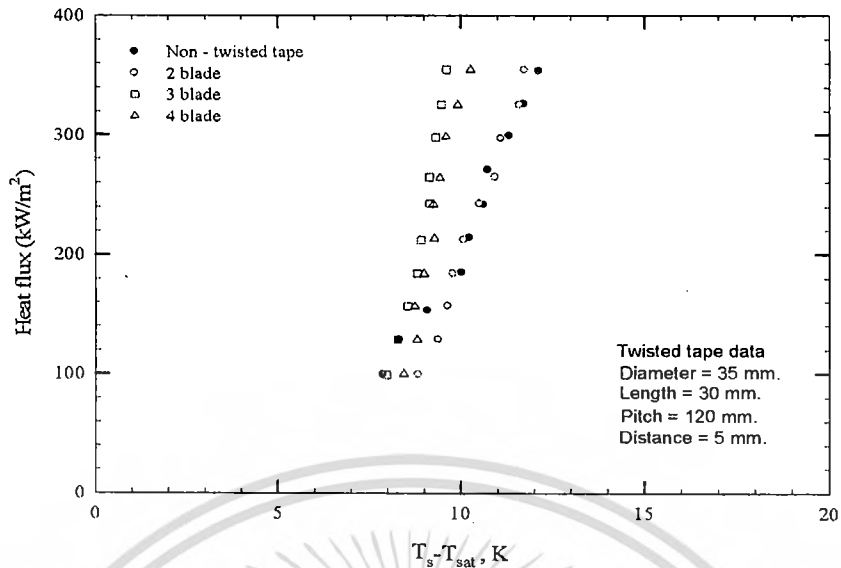


(ก) Pool boiling curve

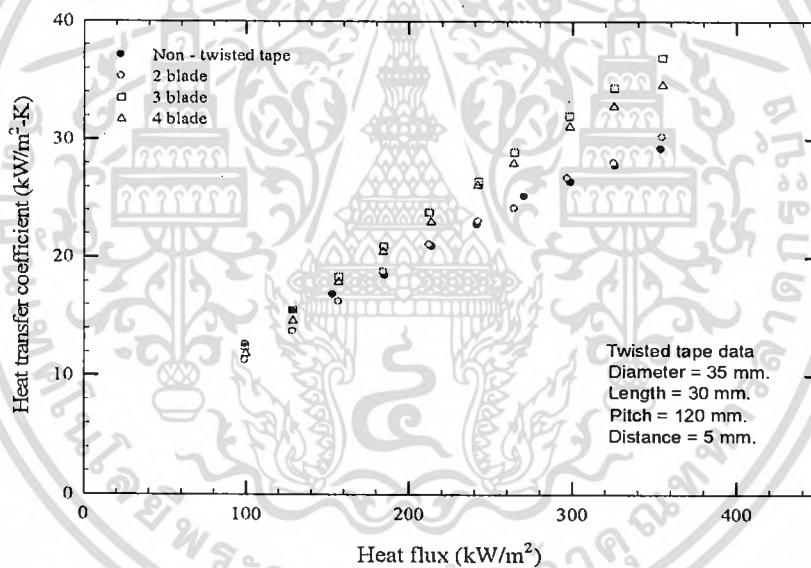


(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.13 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะห่าง 15 mm.

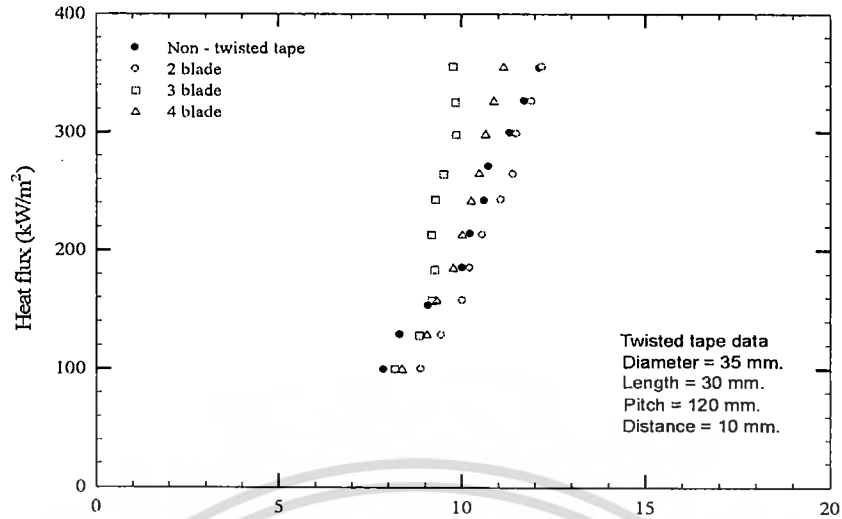


(ก) Pool boiling curve

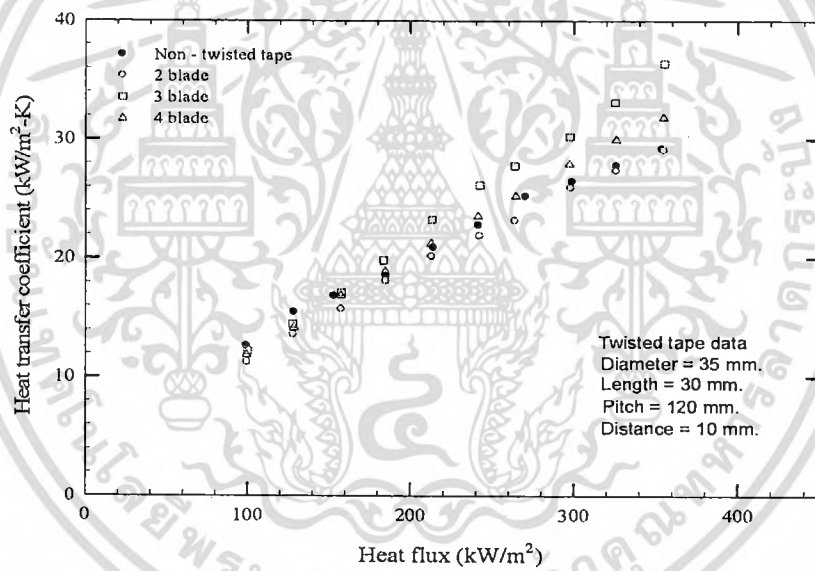


(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.14 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะห่าง 5 mm.



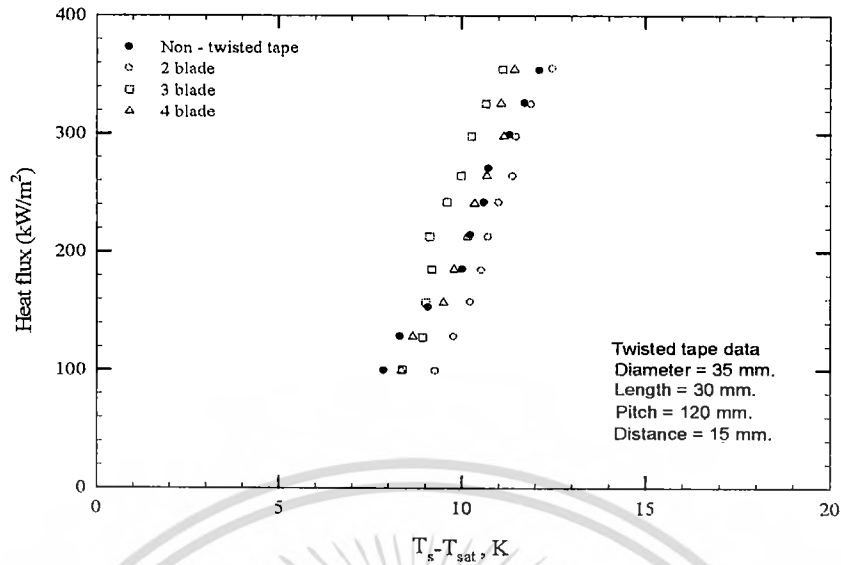
(n) Pool boiling curve



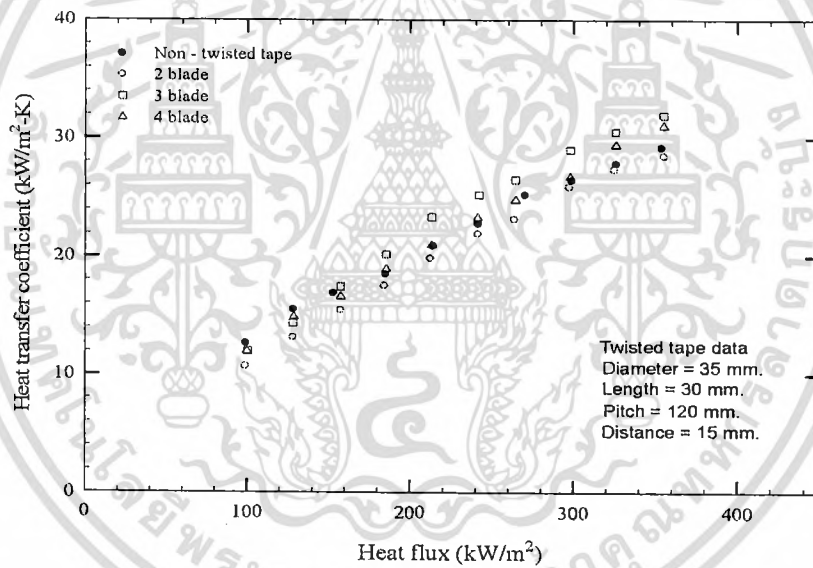
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.15 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะห่าง 10 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

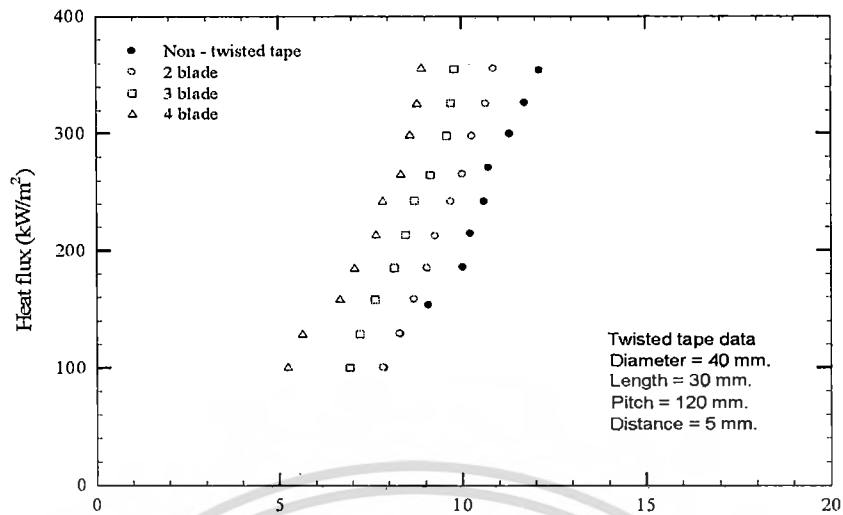


(ก) Pool boiling curve

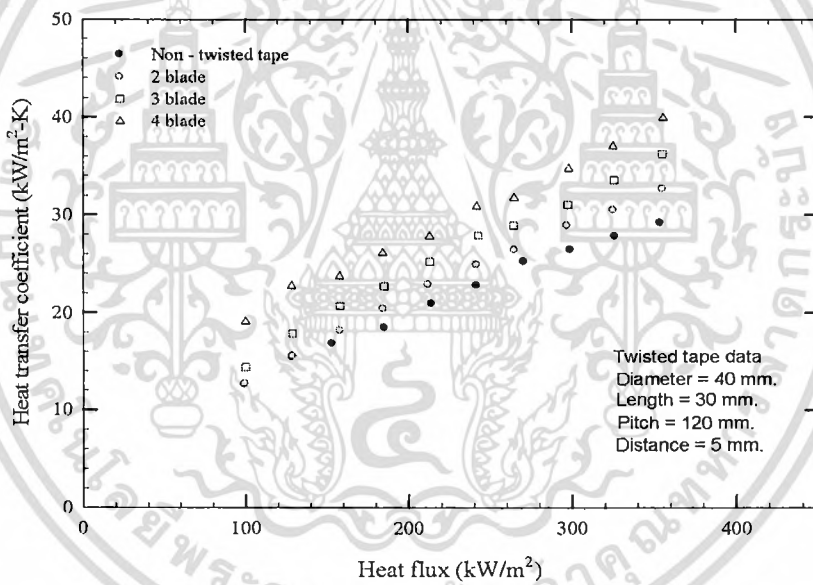


(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.16 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะห่าง 15 mm.



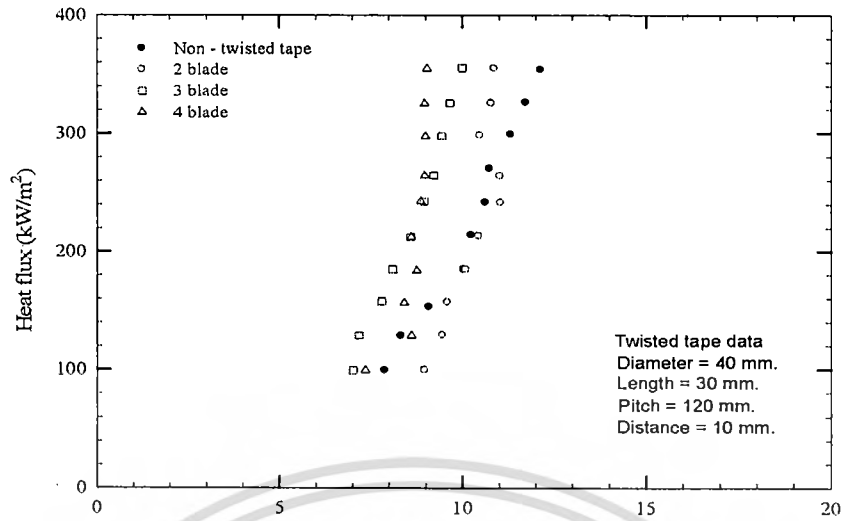
(n) Pool boiling curve



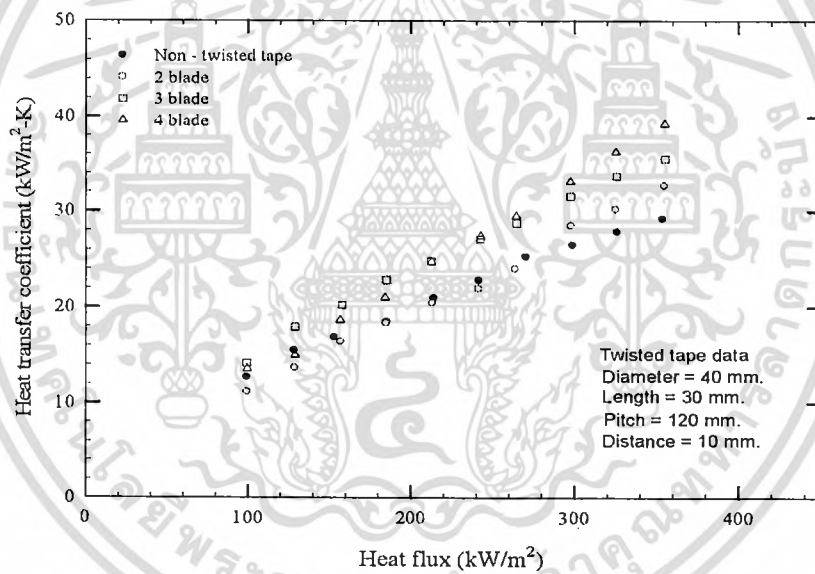
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.17 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะห่าง 5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



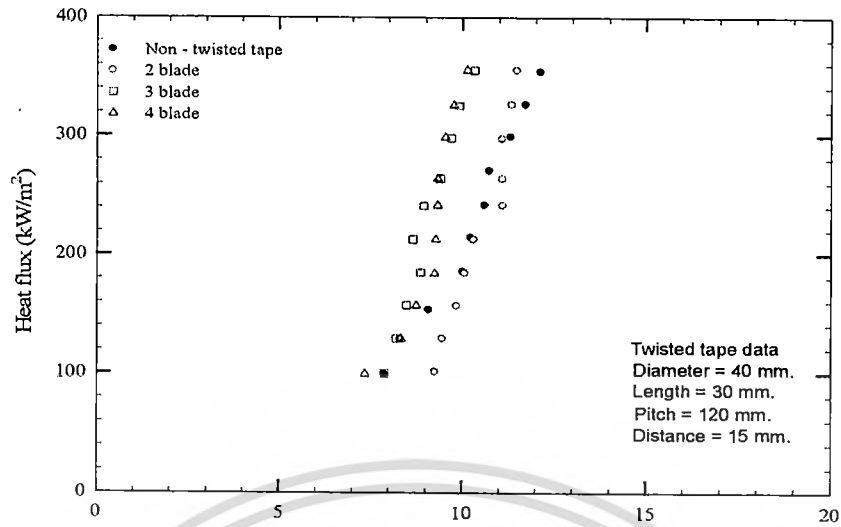
(ก) Pool boiling curve



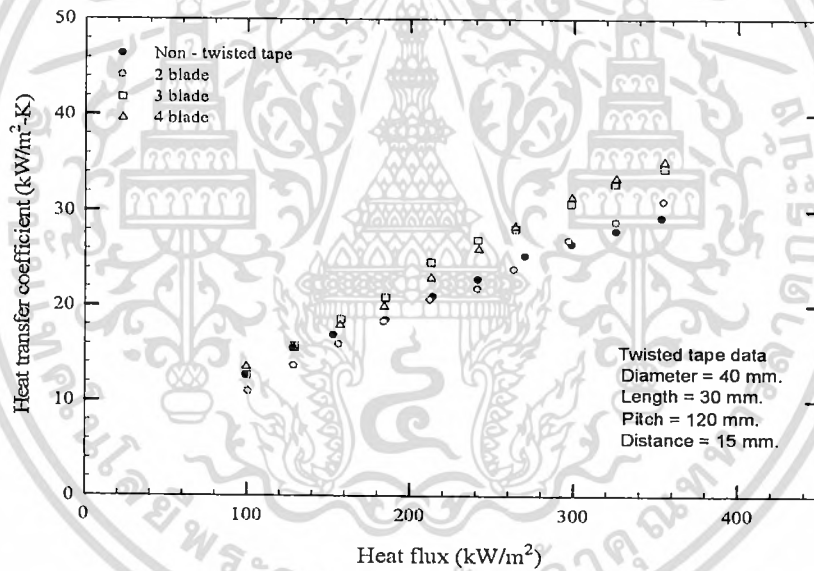
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.18 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะห่าง 10 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(n) Pool boiling curve



(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.19 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะห่าง 15 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 ผลการทดลองระยะห่างระหว่างปลายของ twisted tape กับพื้นผิวให้ความร้อน

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของระยะห่างระหว่างปลายของ twisted tape ที่มีผลต่อคุณลักษณะ pool boiling curve และ heat transfer coefficient ซึ่งทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ โดยมีข้อมูลของ twisted tape มีดังนี้ ใบของ twisted tape มีความหนาเท่ากับ 0.2 mm. เส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ขนาด 30 35 และ 40 mm. ความยาวของ twisted tape เท่ากับ 30 mm. และมีระยะ pitch เท่ากับ 120 mm. นอกจากนี้ ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนใบของ อุปกรณ์ twisted tape เป็น 2 3 และ 4 ใบ นอกจากนี้ยังมีค่าระยะห่างระหว่างพื้นผิวให้ความร้อนกับปลายของ อุปกรณ์ twisted tape ได้ทำการเปลี่ยนแปลงเป็น 5 10 และ 15 mm. และได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ twisted tape ขนาด 30 35 และ 40 mm. ผลการทดลองแสดงในรูปที่ ข.20 ถึง ข.28 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างพื้นผิวให้ความร้อนกับปลายของ อุปกรณ์ twisted tape เป็น 5 10 และ 15 mm. ตามลำดับ

รูปที่ ข.20(ก)-ข.28(ก) เป็นกราฟ boiling curve ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $T_s - T_{sat}$ กับค่า heat flux จากกราฟผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลการทดลองอยู่ในช่วง $T_s - T_{sat}$ ที่ประมาณ 7 -15 K จากกราฟเมื่อ $T_s - T_{sat}$ เพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าของ heat flux เพิ่มขึ้นด้วยในทุก ๆ การทดลอง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่าง twisted tape กับพื้นผิวให้ความร้อนเป็น 5 10 และ 15 mm. ที่ระยะ 5 mm. จะให้ค่า heat transfer coefficient สูงกว่าที่ระยะ 10 และ 15 mm. ตามลำดับ

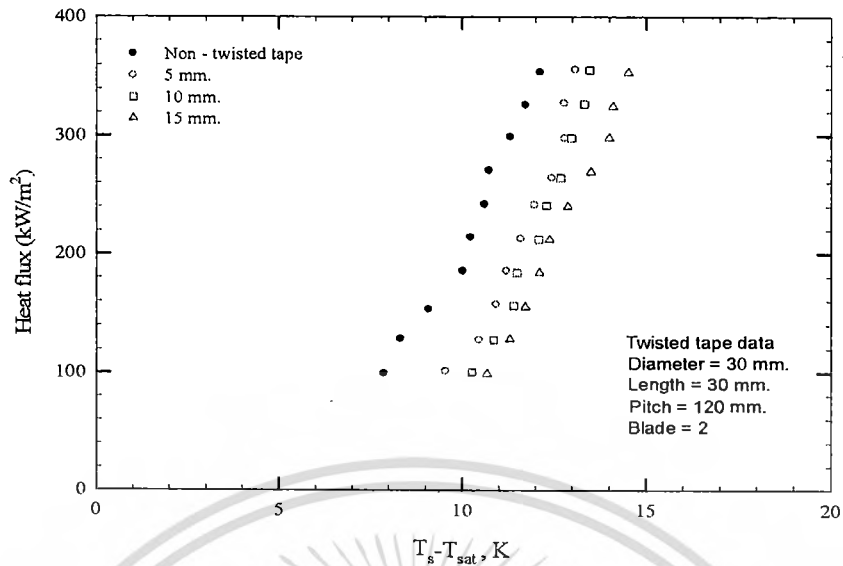
รูปที่ ข.20(ข)-ข.28(ข) แสดงกราฟ pool boiling heat transfer coefficient ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง heat flux กับค่า heat transfer coefficient จากกราฟผลการทดลองพบว่าเมื่อเทียบที่ค่า heat flux เดียวกัน ค่า heat transfer coefficient ของ twisted tape ที่ระยะ 5 10 และ 15 mm. เพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเทียบกับ non twisted ที่ twisted tape ชนิด 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะ 5 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 12% และ 6% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า twisted tape ชนิด 3 ใบ มีประสิทธิภาพดีกว่า twisted tape ชนิด 4 และ 2 ใบ แต่ twisted tape ชนิด 2 ใบลดลงเนื่องจากใบบิดมีการหมุนที่ไม่คงที่ ในขณะที่ heat flux เพิ่มขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะ 5 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 0% 15% และ 8% ชนิด 3 ใบ มีประสิทธิภาพดีกว่า twisted tape ชนิด 4 และ 2 ใบ แต่ twisted tape ชนิด 2 ใบ มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจาก non twisted tape เนื่องจาก twisted tape ชนิด 2 ใบ มีพื้นที่ในการรับ bubble น้อยกว่าชนิด 3 และ 4 ใบ จึงไม่สามารถสร้างความปั่นป่วนได้ twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะ 5 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 15% 16% และ 27% เนื่องจากระยะของ twisted tape ใกล้กับพื้นผิวให้ความร้อน จะสามารถรับแรงจาก bubble ได้มากกว่าที่ระยะของ twisted tape ไกล twisted tape ชนิด 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะ 10 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 6% และ 1% แต่ twisted tape 2 ใบลดลงเนื่องจากแรงลอยตัวจาก bubble ที่เกิดขึ้น เมื่อลอยสูงขึ้นแรงลอยตัวก็จะลดลงจึงไม่สามารถทำให้ twisted tape 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. หมุนได้อย่างต่อเนื่องจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลงตามไปด้วย twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะ 10 เพิ่มขึ้นเป็น 0% 7% และ 1% เนื่องจากแรงลอยตัวจาก bubble ที่เกิดขึ้น เมื่อลอยสูงขึ้นแรงลอยตัวก็จะลดลงจึงไม่สามารถทำให้ twisted tape หมุนได้อย่างต่อเนื่อง twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะ 10 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 0% 13% และ 15% เนื่องจากแรงลอยตัวจาก bubble ที่เกิดขึ้น เมื่อ

ลวยสูงขึ้นแรงลวยตัวก็จะลดลงจึงไม่สามารถทำให้ twisted tape หมุนได้อย่างต่อเนื่อง twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่ระยะ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 0% 4% และ 0% เนื่องจากแรงลวยตัวจาก bubble ที่เกิดขึ้น เมื่อลวยสูงขึ้นแรงลวยตัวก็จะลดลงจึงไม่สามารถทำให้ twisted tape หมุนได้อย่างต่อเนื่อง twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ที่ระยะ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 0% 5% และ 0% เนื่องจากแรงลวยตัวจาก bubble ที่เกิดขึ้น เมื่อลวยสูงขึ้นแรงลวยตัวก็จะลดลงจึงไม่สามารถทำให้ twisted tape หมุนได้อย่างต่อเนื่อง twisted tape ชนิด 2 3 และ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ที่ระยะ 15 mm. เพิ่มขึ้นเป็น 0% 10% และ 10% เนื่องจากแรงลวยตัวจาก bubble ที่เกิดขึ้น เมื่อลวยสูงขึ้นแรงลวยตัวก็จะลดลงจึงไม่สามารถทำให้ twisted tape หมุนได้อย่างต่อเนื่อง

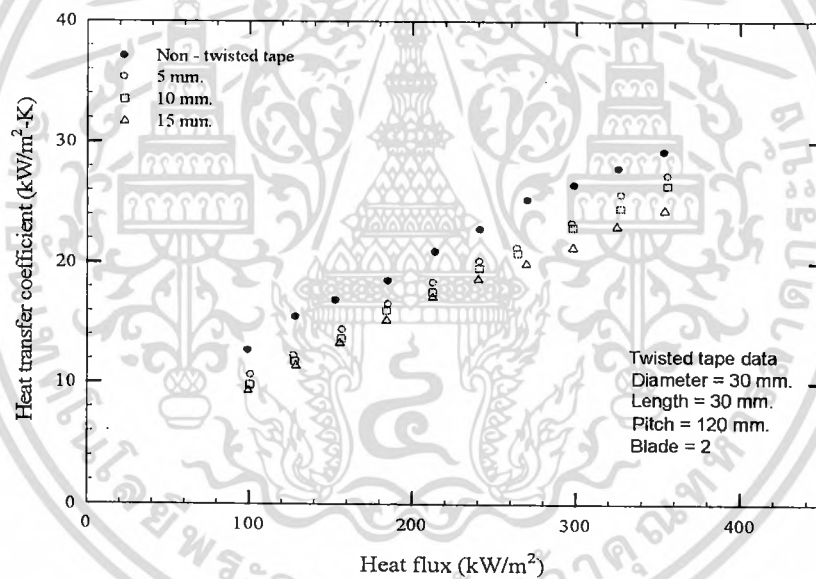
เนื่องจากที่ระยะของ twisted tape ใกล้กับพื้นผิวให้ความร้อน จะสามารถรับแรงจาก bubble ได้มากกว่าที่ระยะไกลของ twisted tape ซึ่งแรงจาก bubble สามารถดัน twisted tape ให้หมุนจนสารทำงานให้เกิดความปั่นป่วนที่บริเวณบนพื้นผิวให้ความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



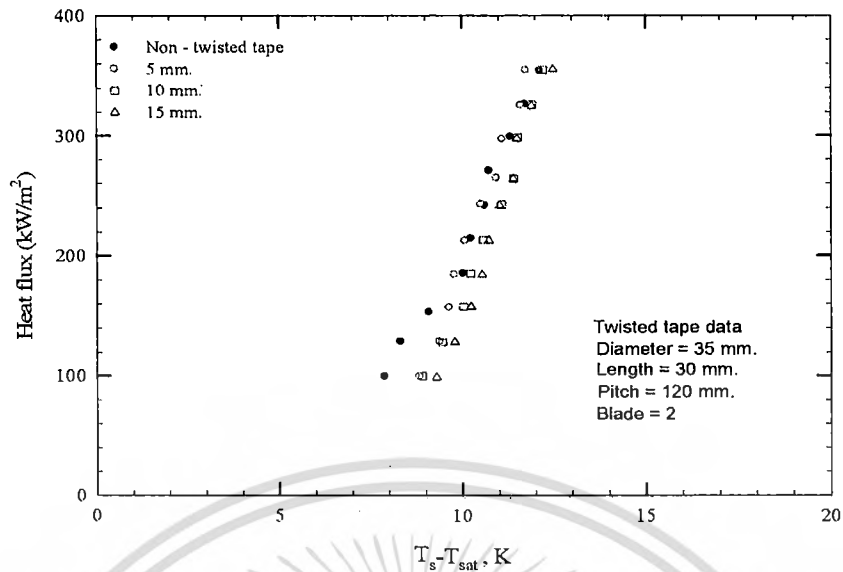
(ก) Pool boiling curve



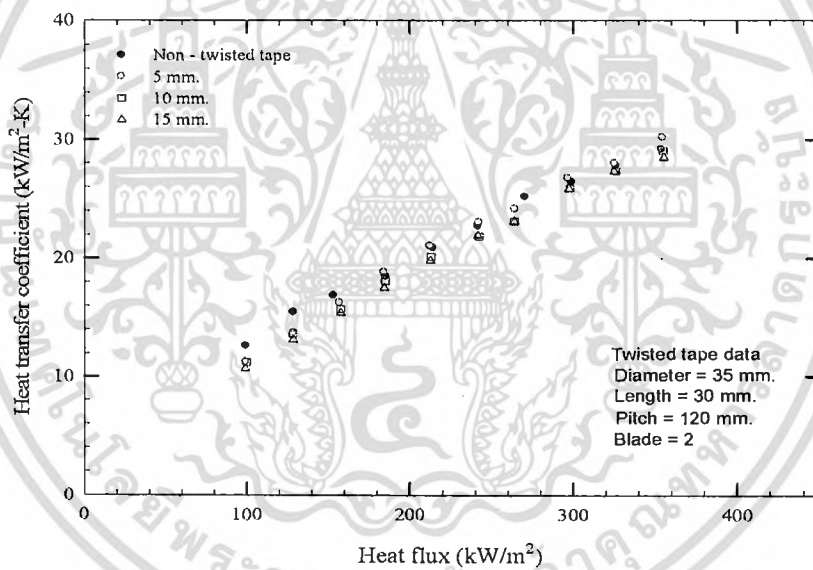
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.20 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. วั้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



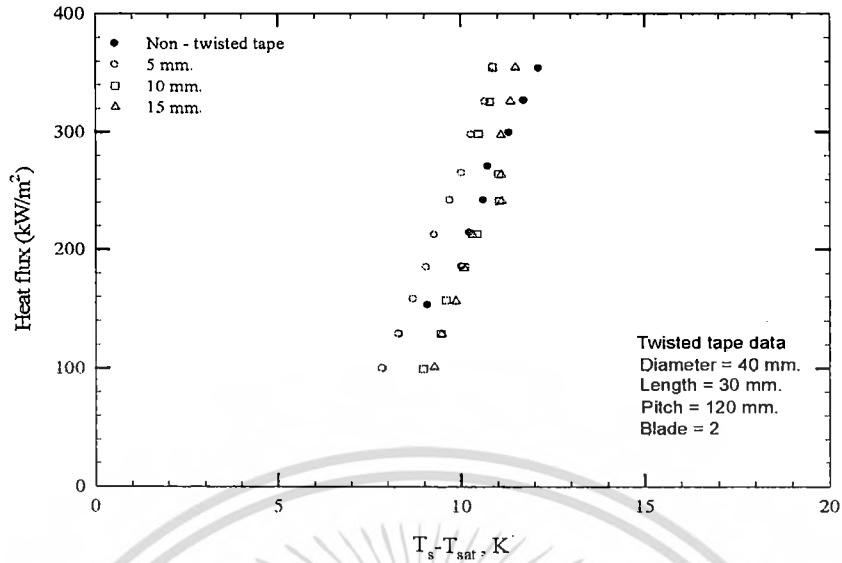
(ก) Pool boiling curve



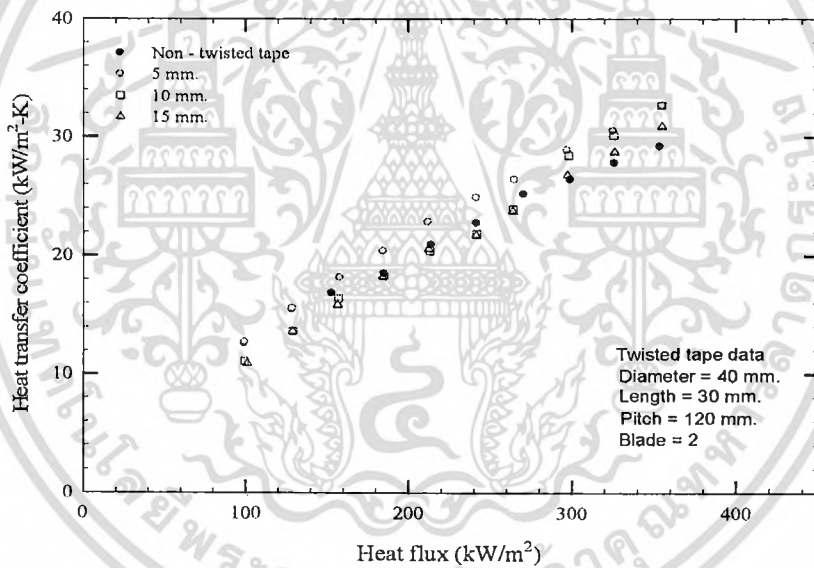
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.21 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

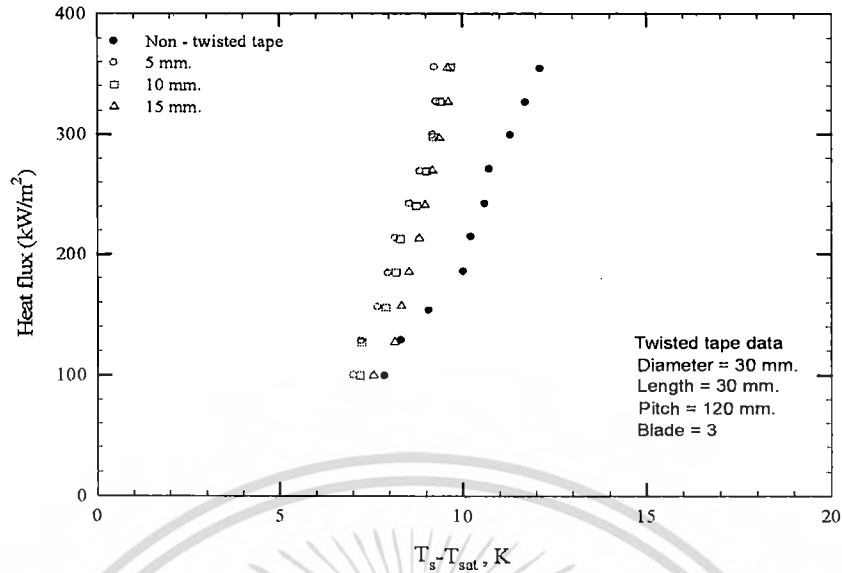


(ก) Pool boiling curve

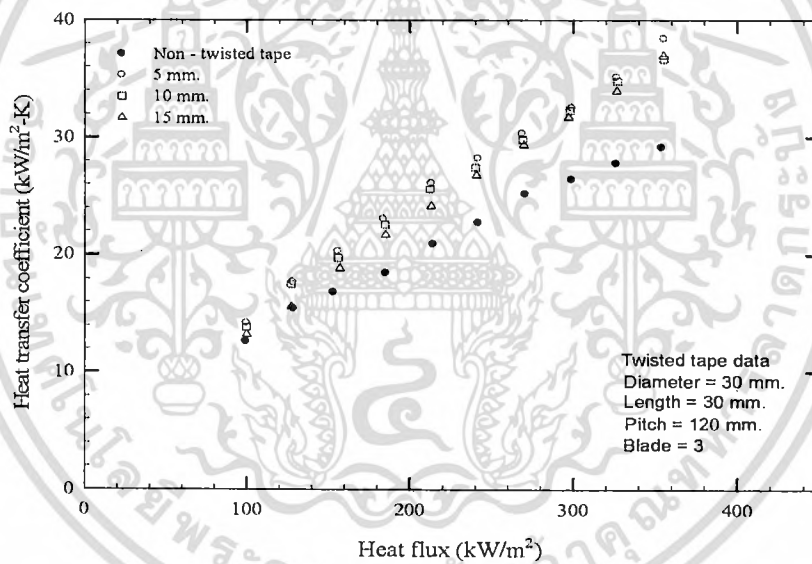


(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.22 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 2 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน



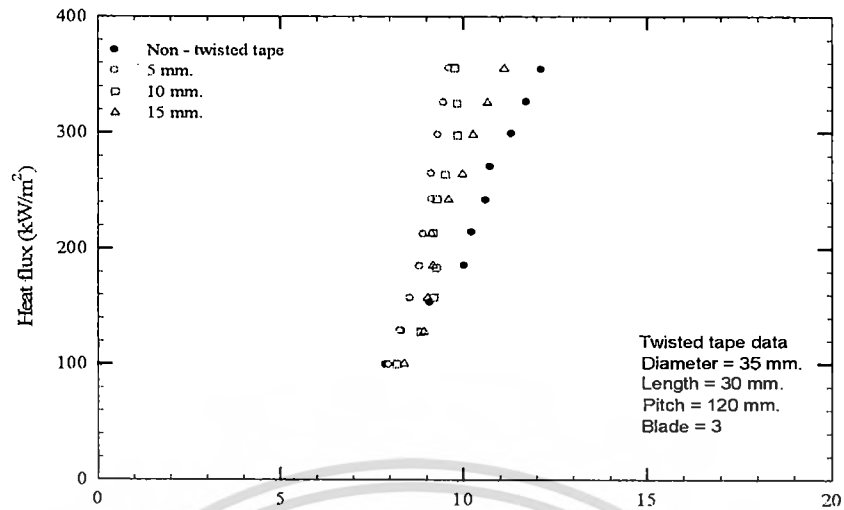
(ก) Pool boiling curve



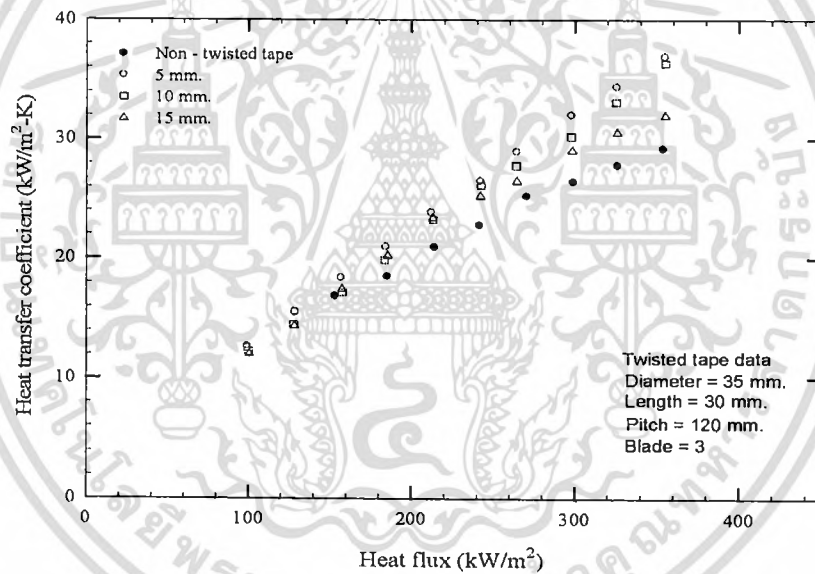
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.23 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



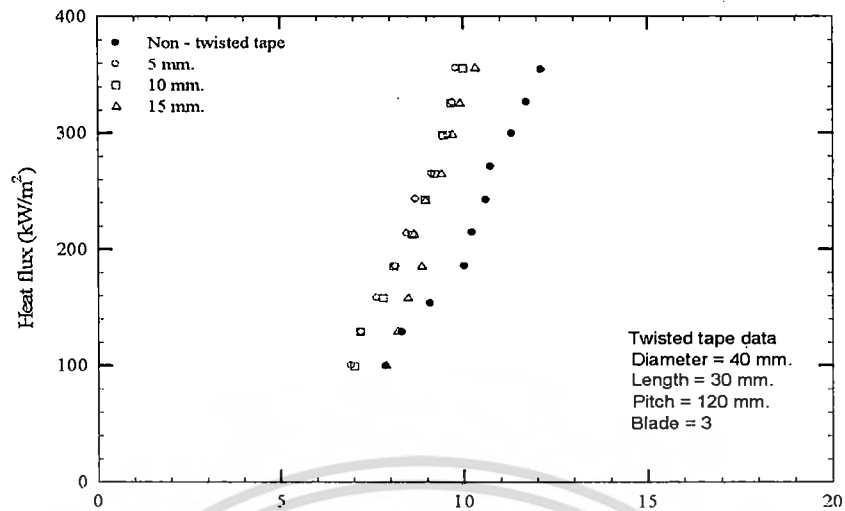
(ก) Pool boiling curve



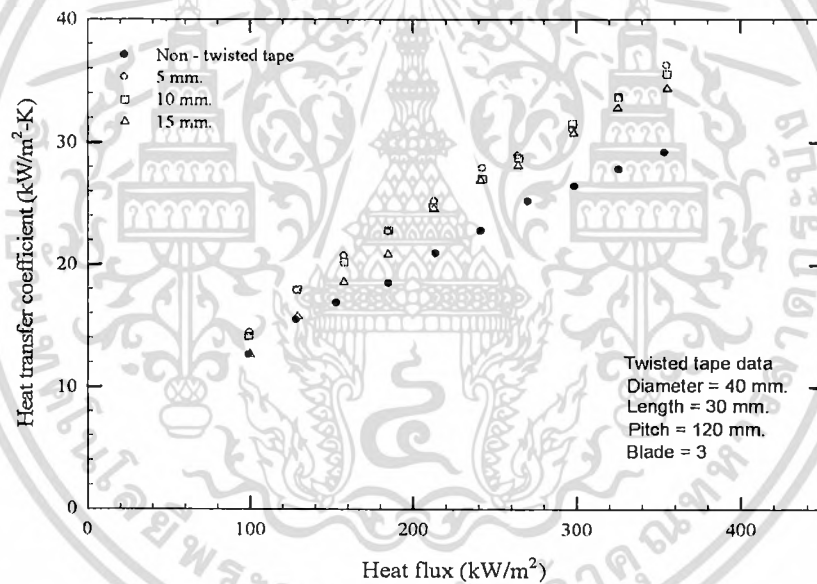
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.24 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



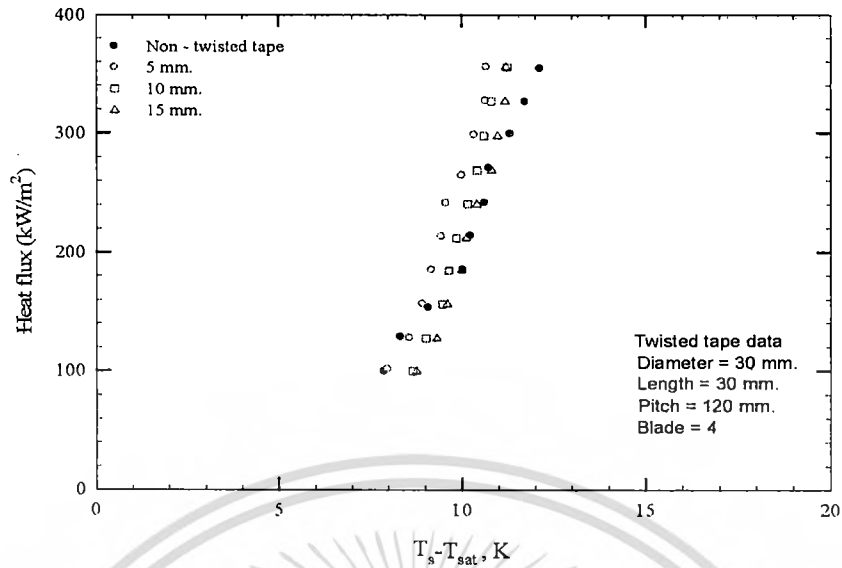
(n) Pool boiling curve



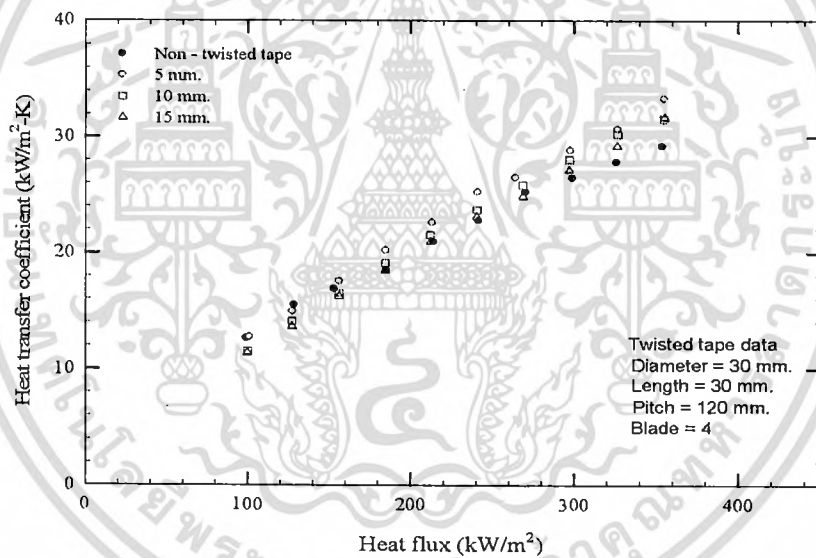
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.25 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 3 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. วัสดุผิวสัมผัสให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



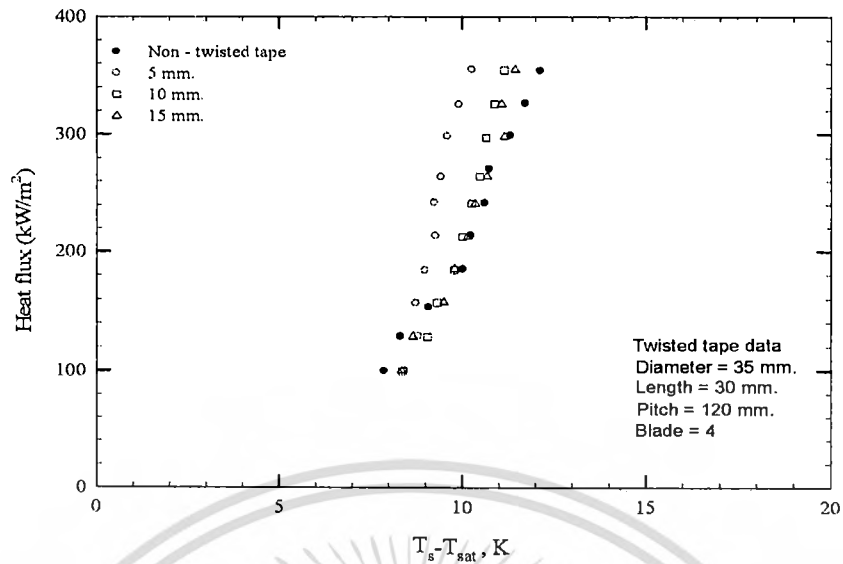
(ก) Pool boiling curve



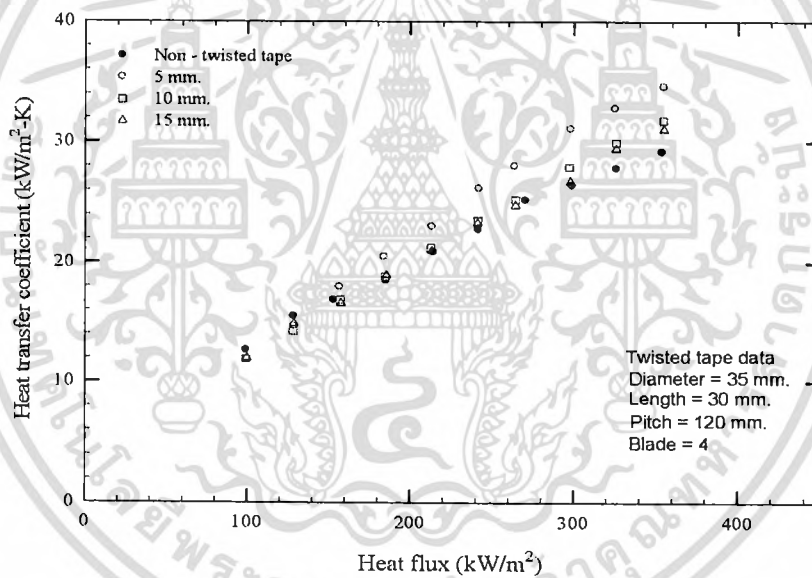
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.26 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



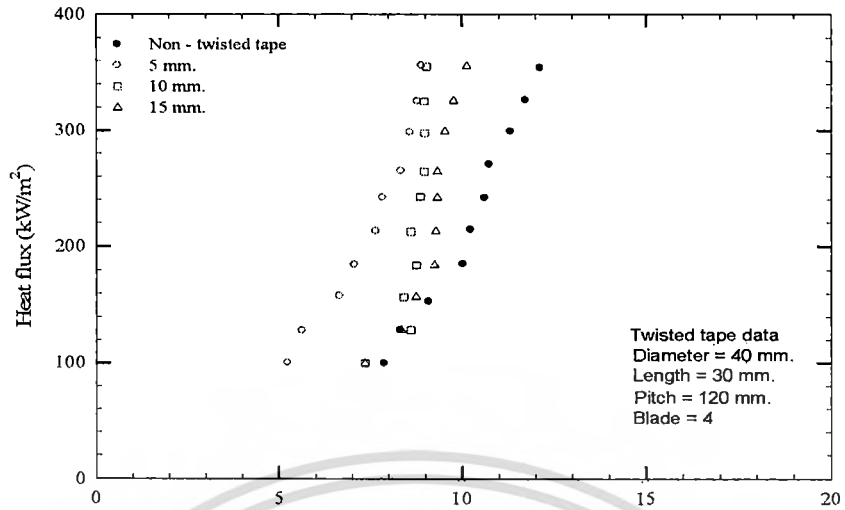
(ก) Pool boiling curve



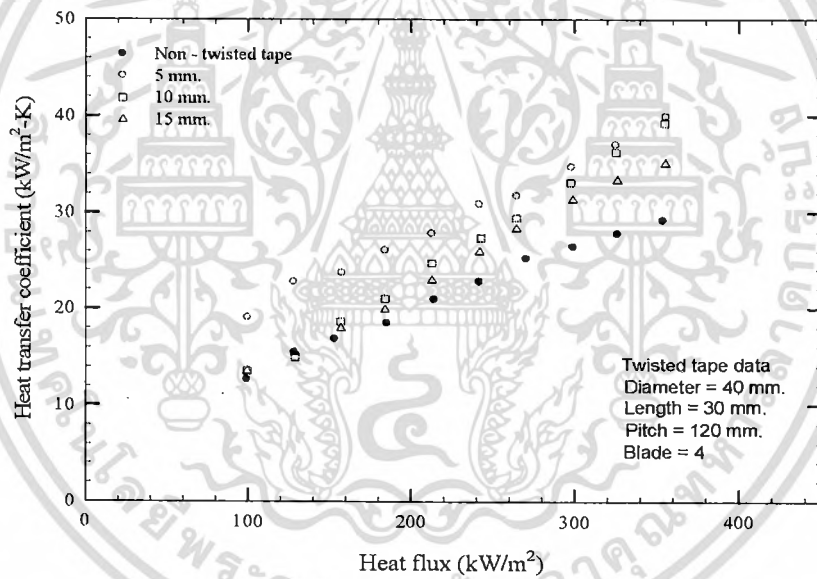
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.27 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm. ให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Pool boiling curve



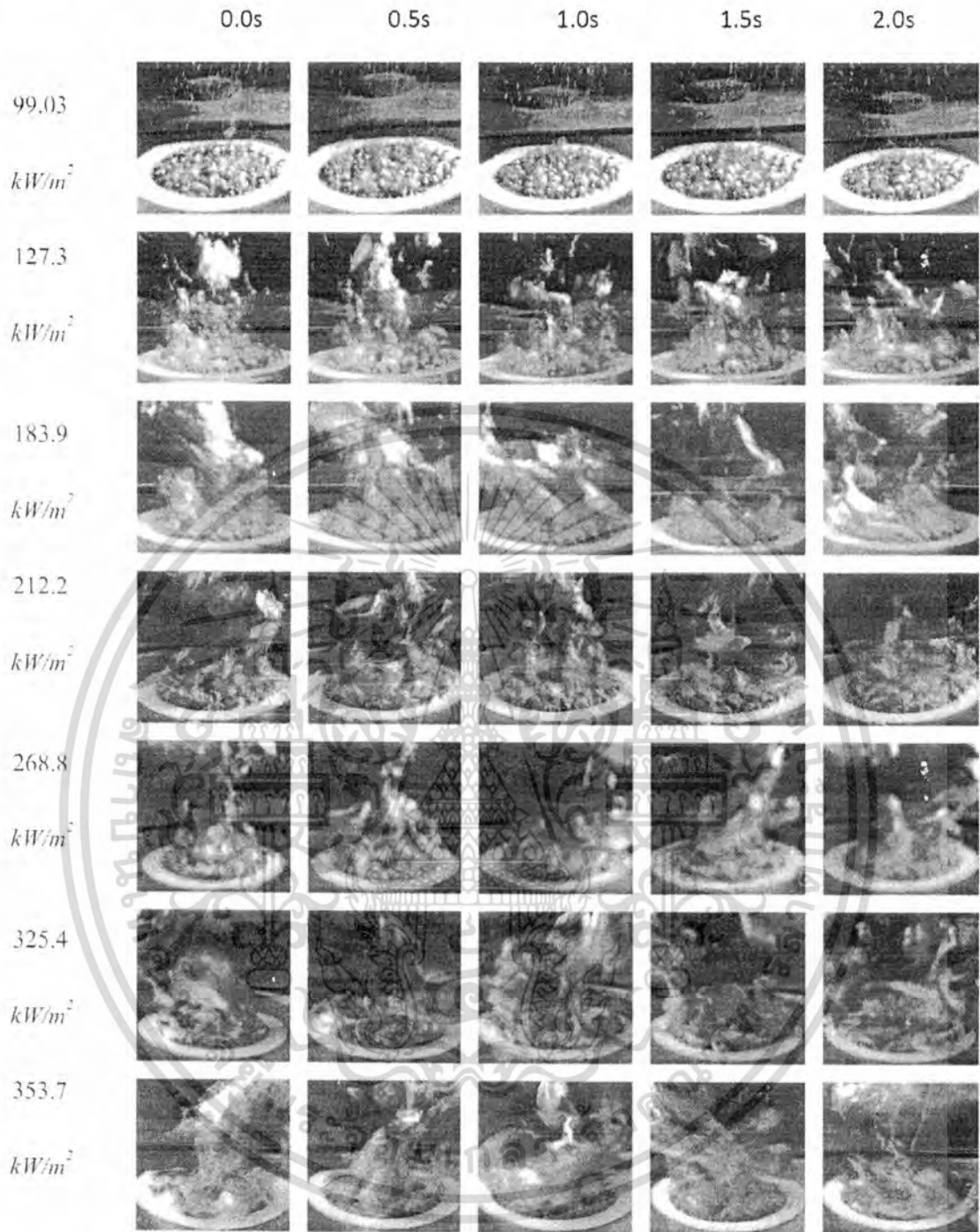
(ข) Pool boiling heat transfer coefficient

รูปที่ ข.28 แสดงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ nucleate pool boiling ของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm. ให้ความร้อน

ข.5 การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ pool boiling

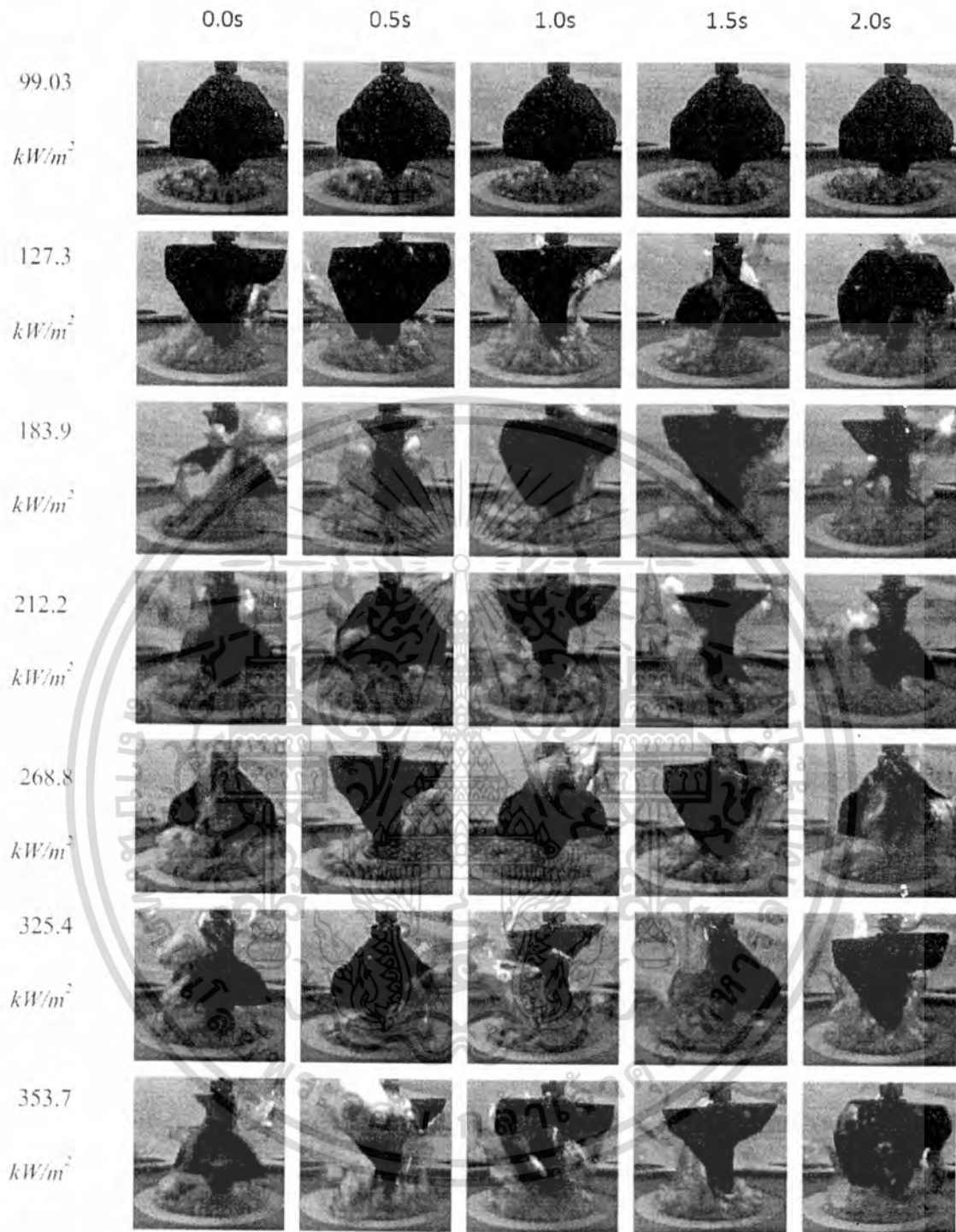
รูปที่ ข.29 แสดงปรากฏการณ์ของ nucleate pool boiling heat transfer ในช่วง high heat flux พื้นผิวให้ความร้อนทำมาจากทองแดงวงกลมวางในแนวราบมีค่าความขรุขระ $0.2 \mu\text{m}$ จากรูปที่ ข.29 เป็นการทดลองเพื่อเทียบสออบอุปกรณ์ซึ่งยังไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มความปั่นป่วน twisted tape จากผลการทดลองพบว่า ที่ค่า heat flux ประมาณ $99.03 - 353.7 \text{ kW/m}^2$ เป็นช่วงของ nucleate pool boiling จาก low heat flux ไปเป็น high heat flux ที่ 99.029 kW/m^2 ลักษณะของ bubble ที่เกิดขึ้นเป็นแบบทรงกลมมีขนาดประมาณ 4 mm หลุดลอยออกจากพื้นผิวให้ความร้อนขึ้นสู่ผิวของ working fluid ที่ 127.33 kW/m^2 ลักษณะของ bubble ที่เกิดขึ้น เป็นแบบสลักหลุดลอยออกจากพื้นผิวให้ความร้อนสู่ผิวของ working fluid นอกจากนี้ ข้อมูลการทดลองยังแสดงถึงปรากฏการณ์การเดือดที่รุนแรงเพิ่มขึ้น เมื่อ heat flux เพิ่มขึ้นมากกว่า 127.33 kW/m^2 ไปจนถึง 353.7 kW/m^2 จากปรากฏการณ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นเพราะเมื่อความร้อนที่พื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลทำให้การเปลี่ยนเฟสจากของเหลวกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น จึงเป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์การเดือดของ bubble ที่มีความรุนแรง

รูปที่ ข.29 ถึง ข.56 แสดงปรากฏการณ์ของ nucleate pool boiling heat transfer ในช่วง high heat flux โดยได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มความปั่นป่วน twisted tape ไว้บริเวณเหนือพื้นผิวให้ความร้อน จากผลการทดลองพบว่า twisted tape ชนิด 3 ใบ สามารถรับแรงจาก bubble ได้ดีกว่า twisted tape ชนิด 4 ใบ และ 2 ใบ เนื่องจากใบบิด twisted tape ชนิด 3 ใบ มี ชนิด 2 ใบ และ 4 ใบ จึงสามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับ working fluid มากกว่า เพราะฉะนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ที่ระยะห่างระหว่างพื้นผิวให้ความร้อนกับปลายของ twisted tape มีผลต่อการรับแรงจาก bubble และการหมุนวนเพื่อสร้างความปั่นป่วนให้กับ working fluid จากผลการทดลองพบว่า ที่ระยะห่าง 5 mm twisted tape สามารถรับแรงจาก bubble และสร้างความปั่นป่วนให้กับสารทำงาน ที่บริเวณเหนือพื้นผิวให้ความร้อนได้ดีกว่าที่ระยะ 10 และ 15 mm. ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก natural convection เกิดการเคลื่อนตัวของ working fluid ปะทะกับ bubble ส่งผลทำให้ bubble ไม่ลอยตัวขึ้นไปปะทะเต็มพื้นที่ของ twisted tape จึงทำให้ ระยะห่างของ twisted tape ใกล้กับพื้นผิวให้ความร้อนเกิดความปั่นป่วนได้มากกว่า ระยะห่างของ twisted tape ไกล จากพื้นผิวให้ความร้อน



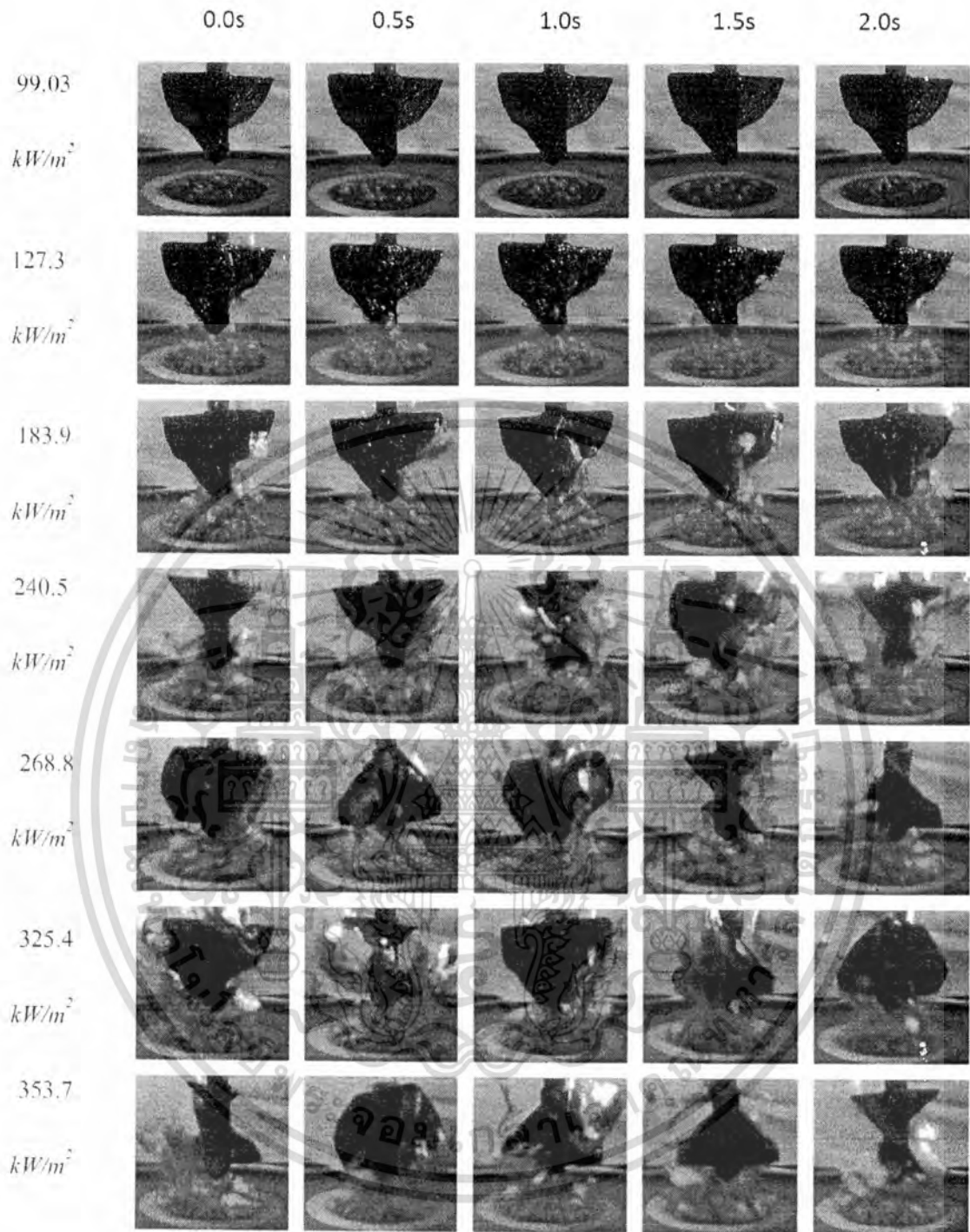
รูปที่ ข.29 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นบนพื้นผิวทองแดงเพื่อทำการเทียบ
อุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



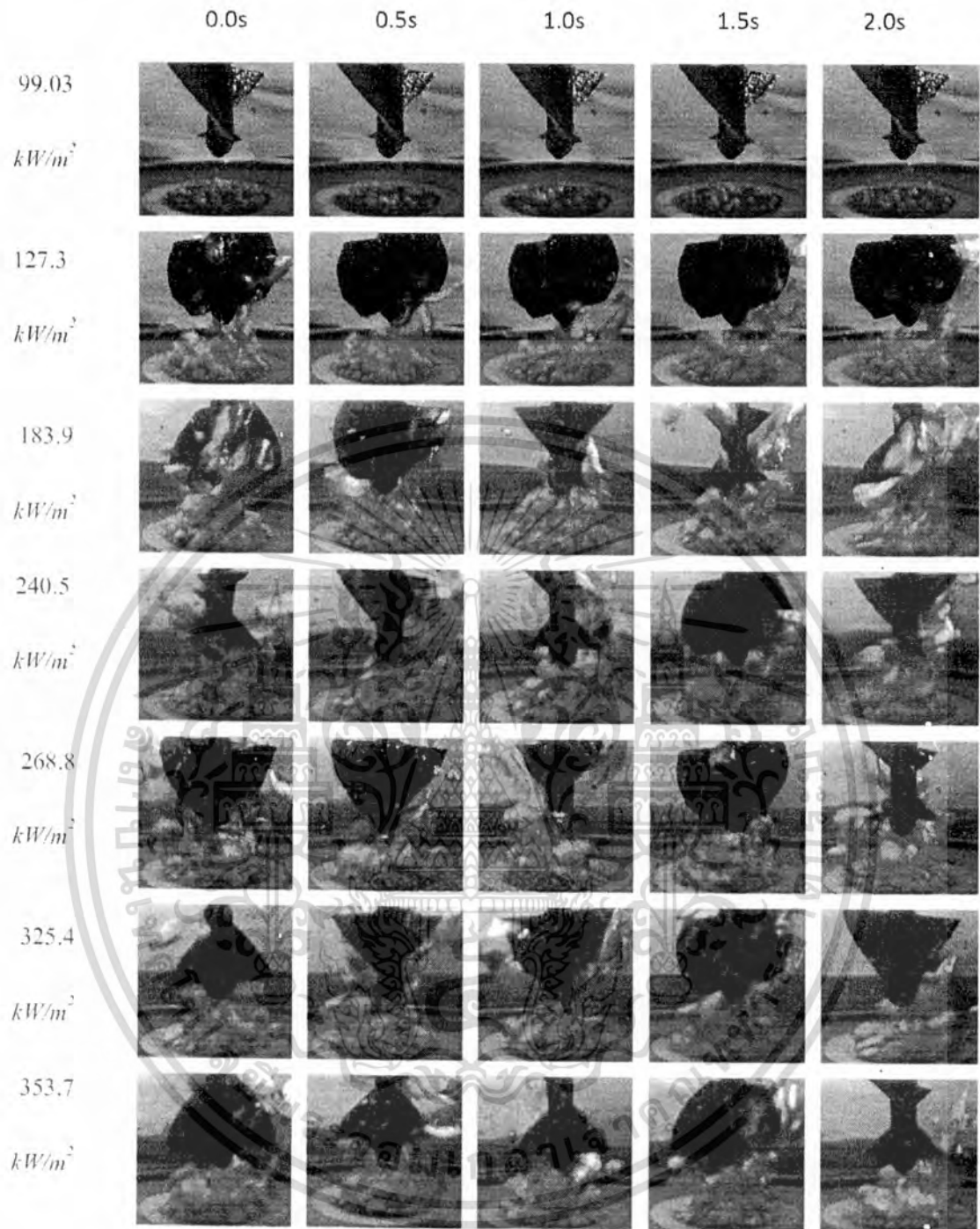
รูปที่ ข.30 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ
ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



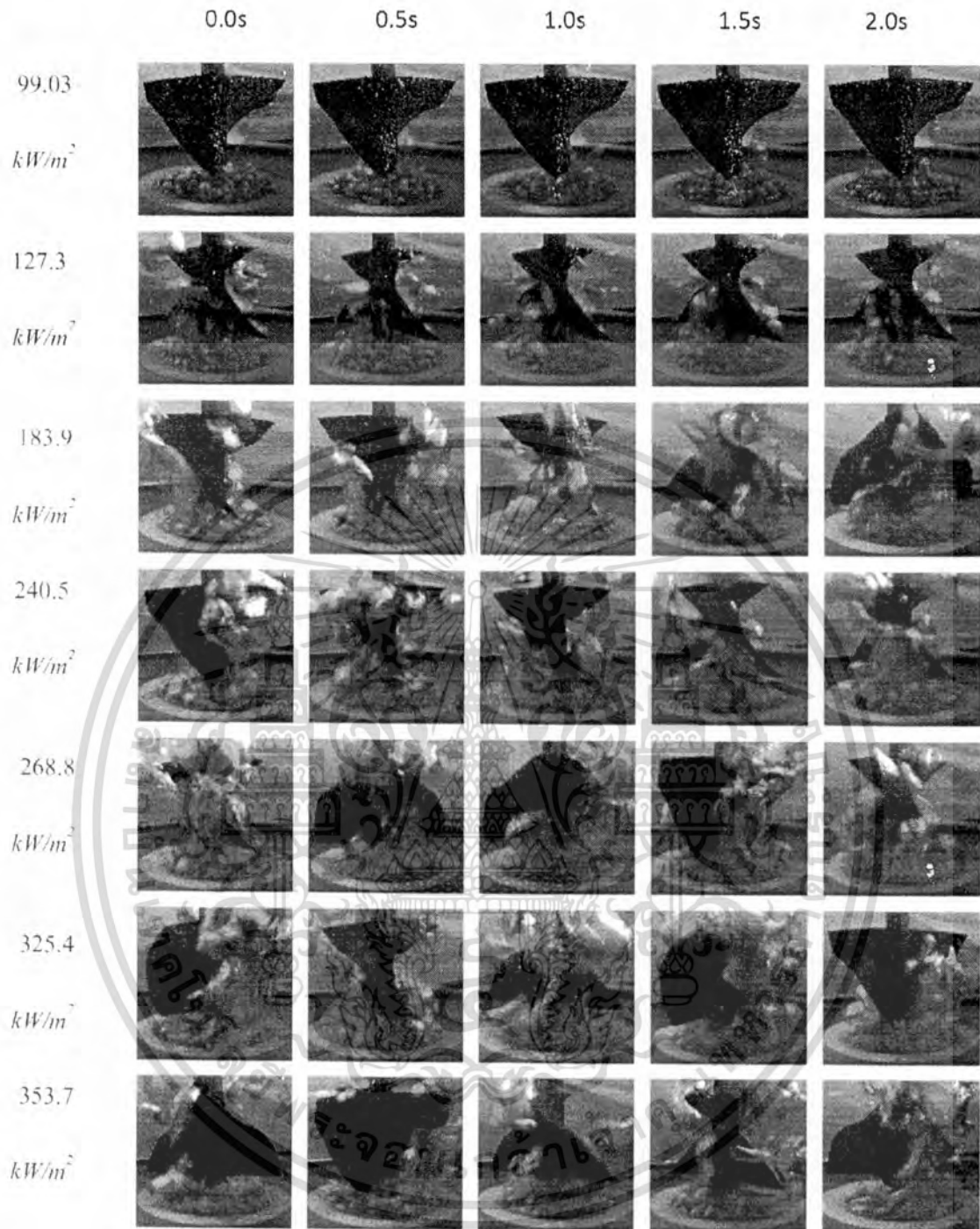
รูปที่ ข.31 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 10 mm. ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



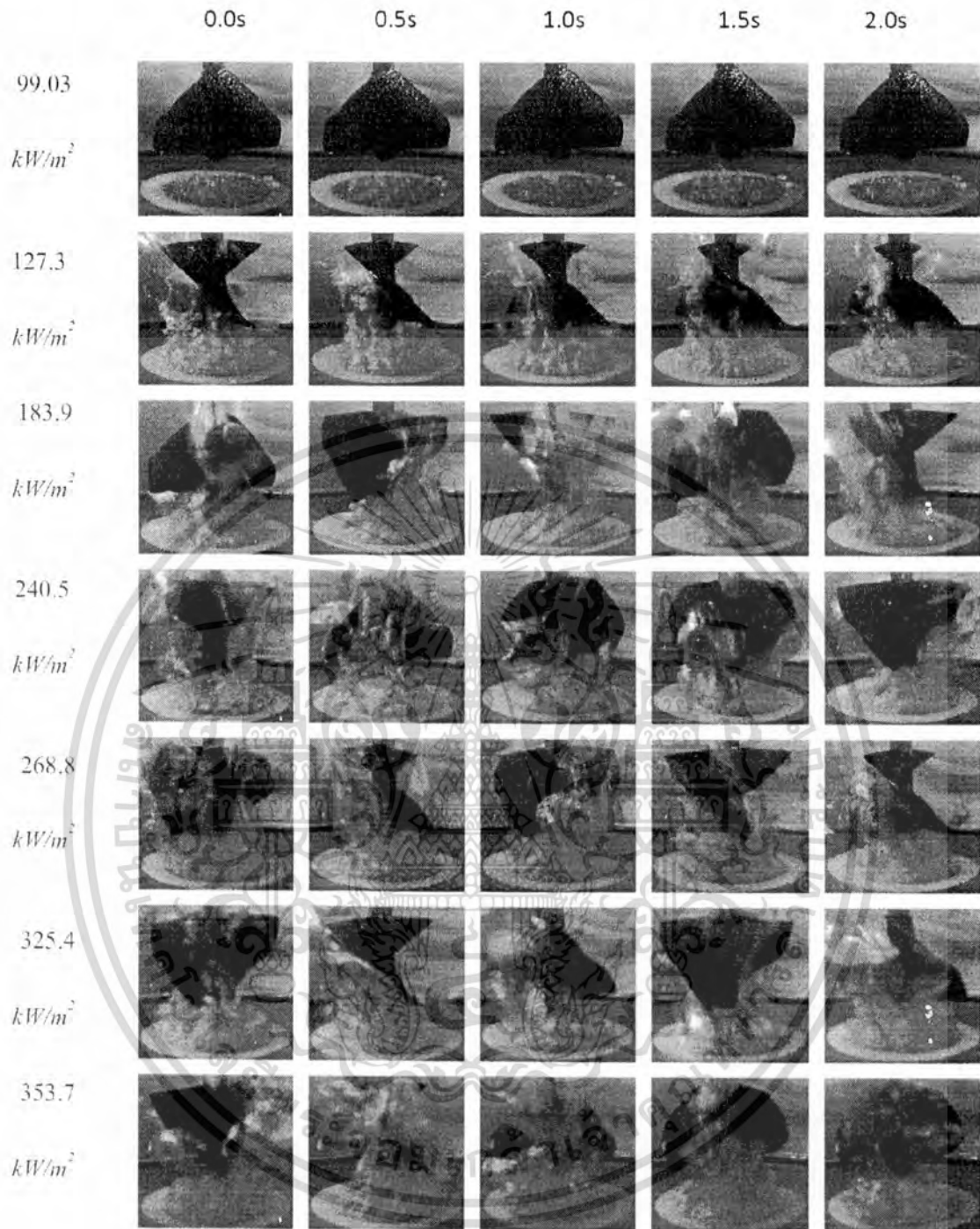
รูปที่ ข.32 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



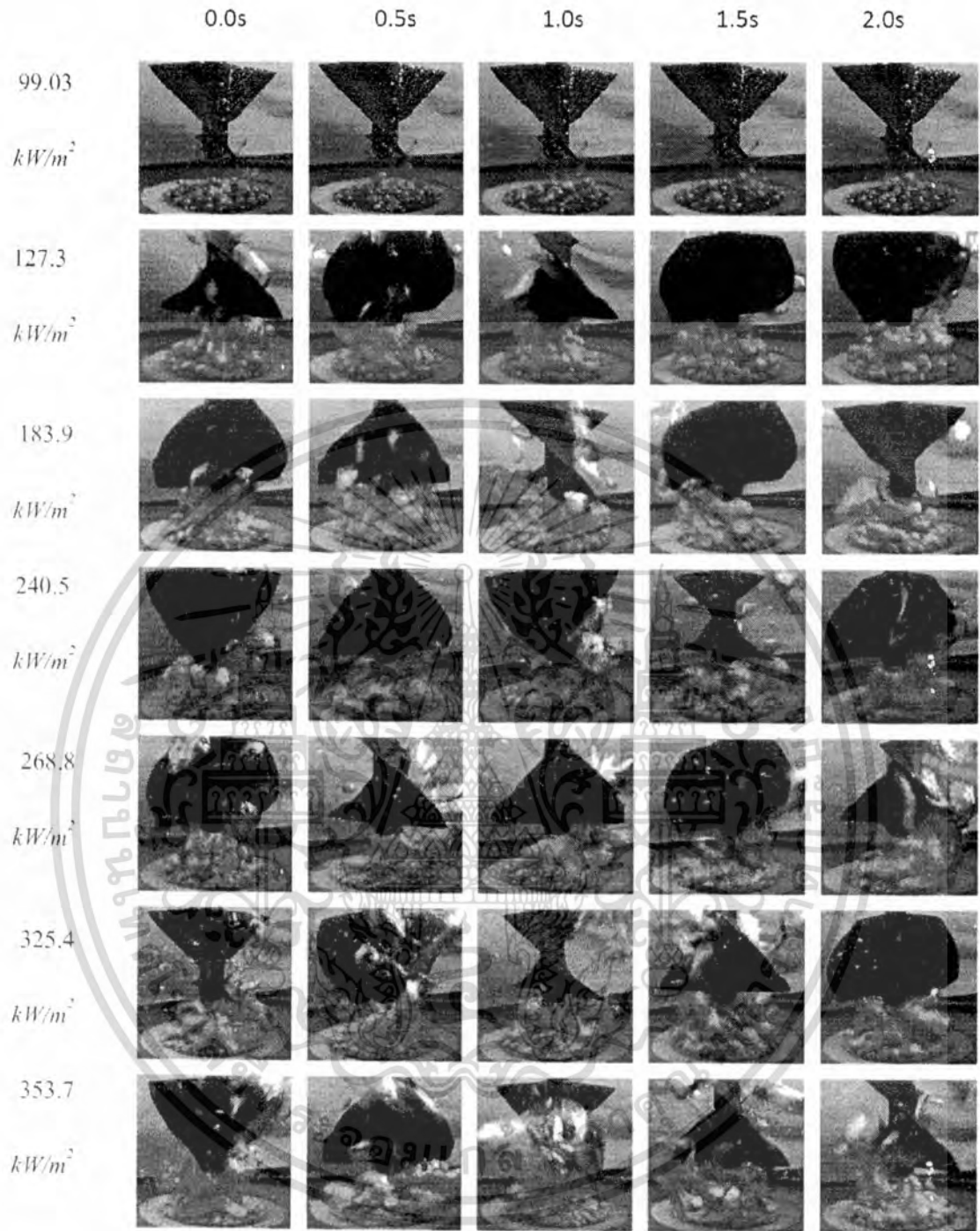
รูปที่ ข.33 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



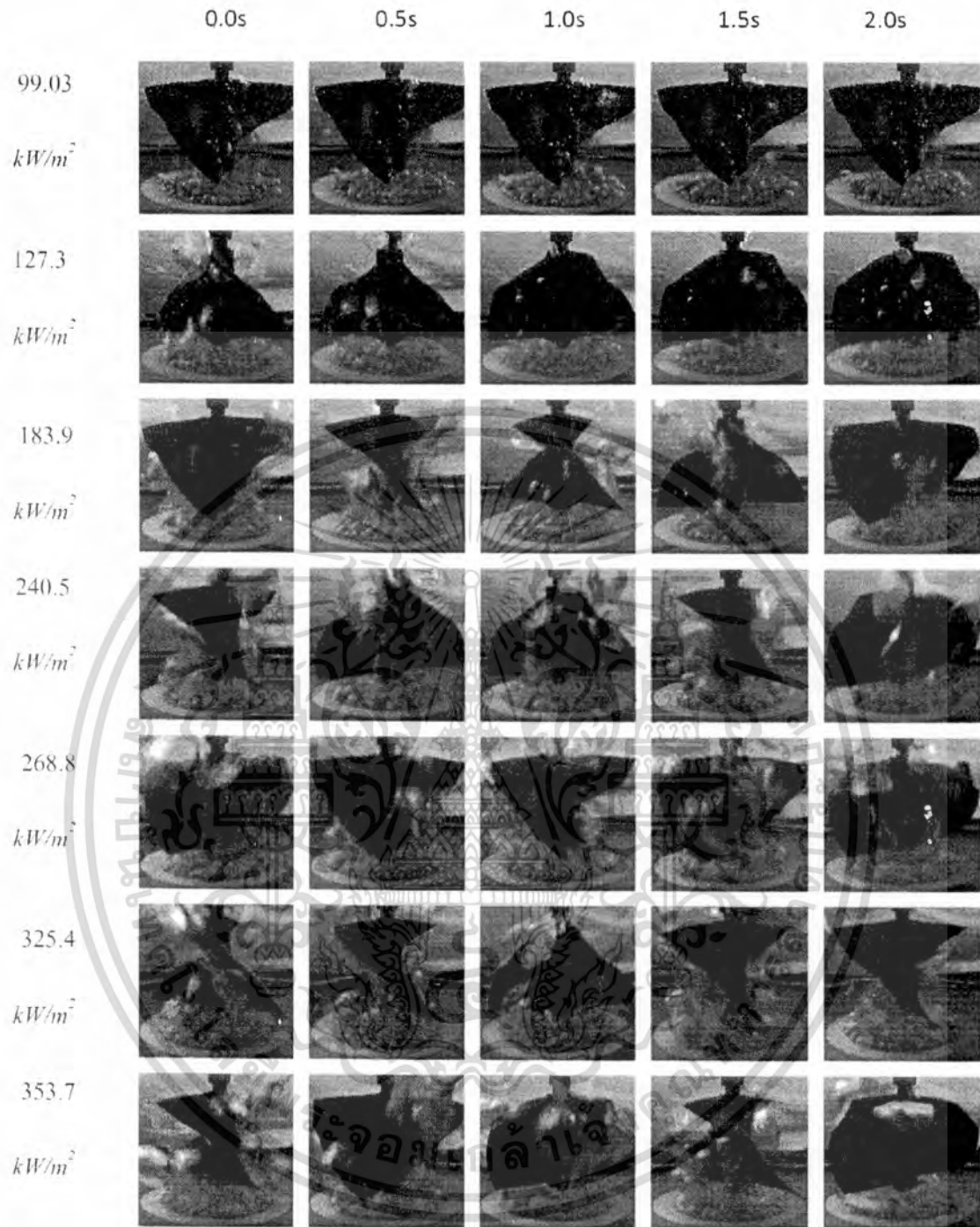
รูปที่ ข.34 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



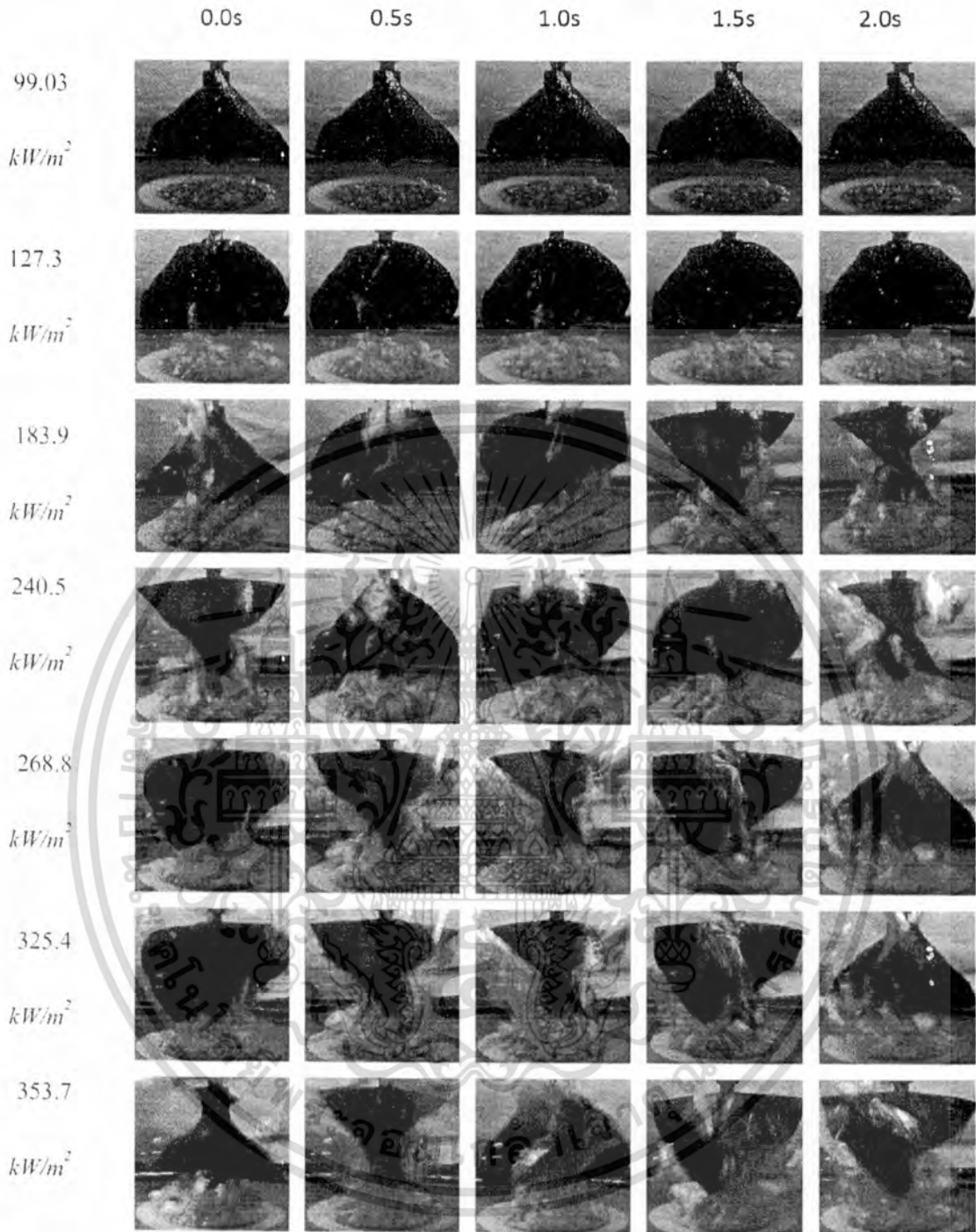
รูปที่ ข.35 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



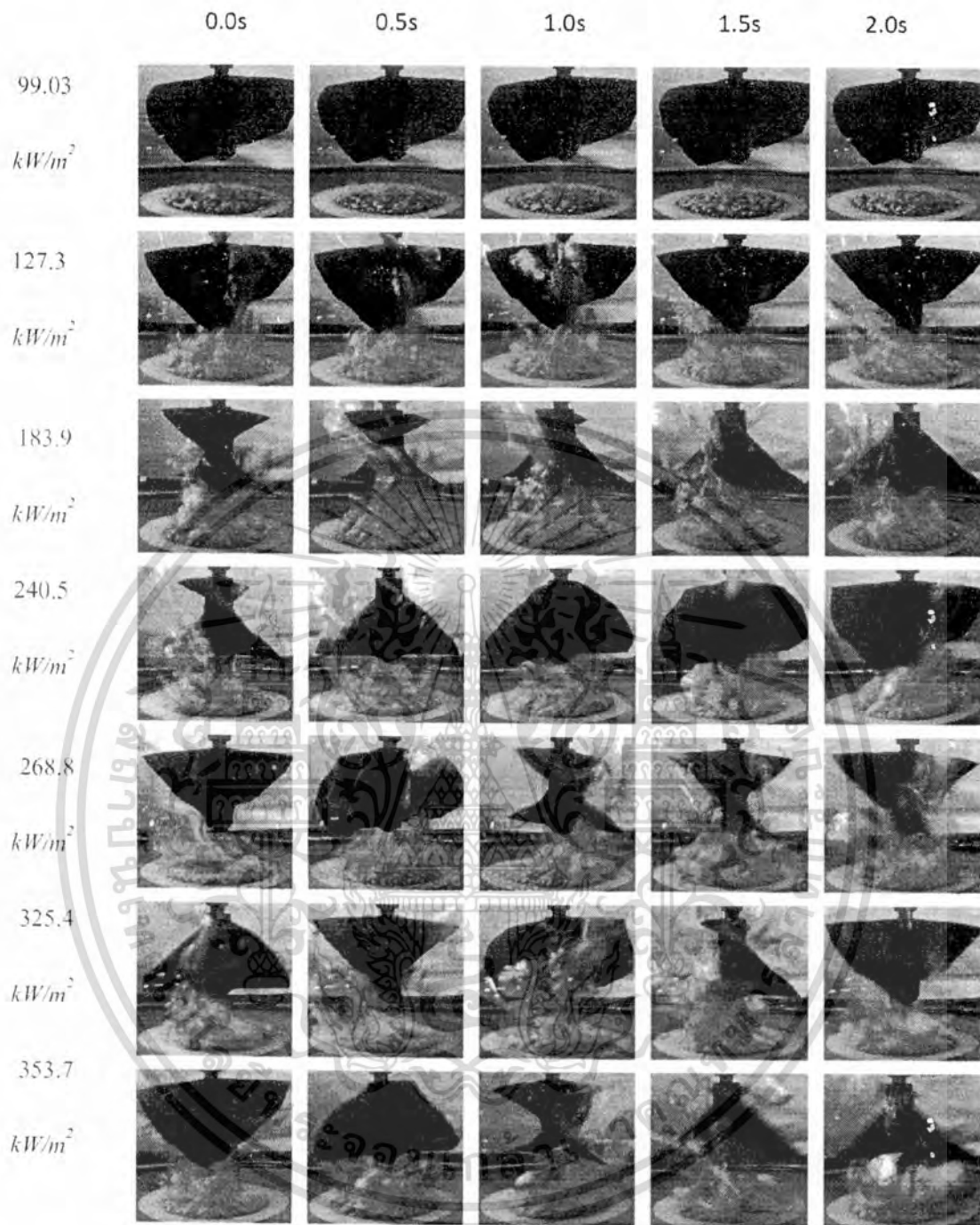
รูปที่ ข.36 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาด 40 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



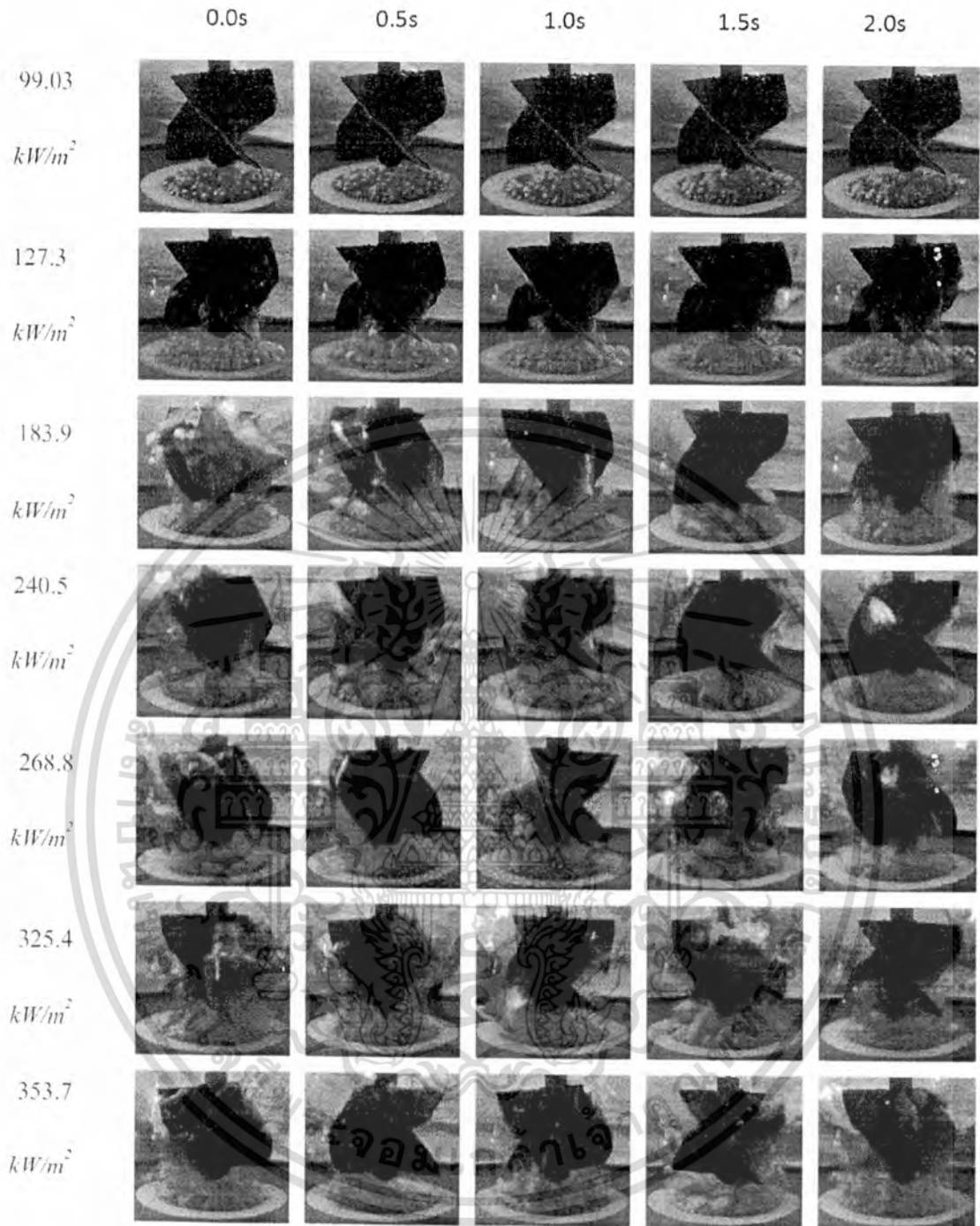
รูปที่ ข.37 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาด 40 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



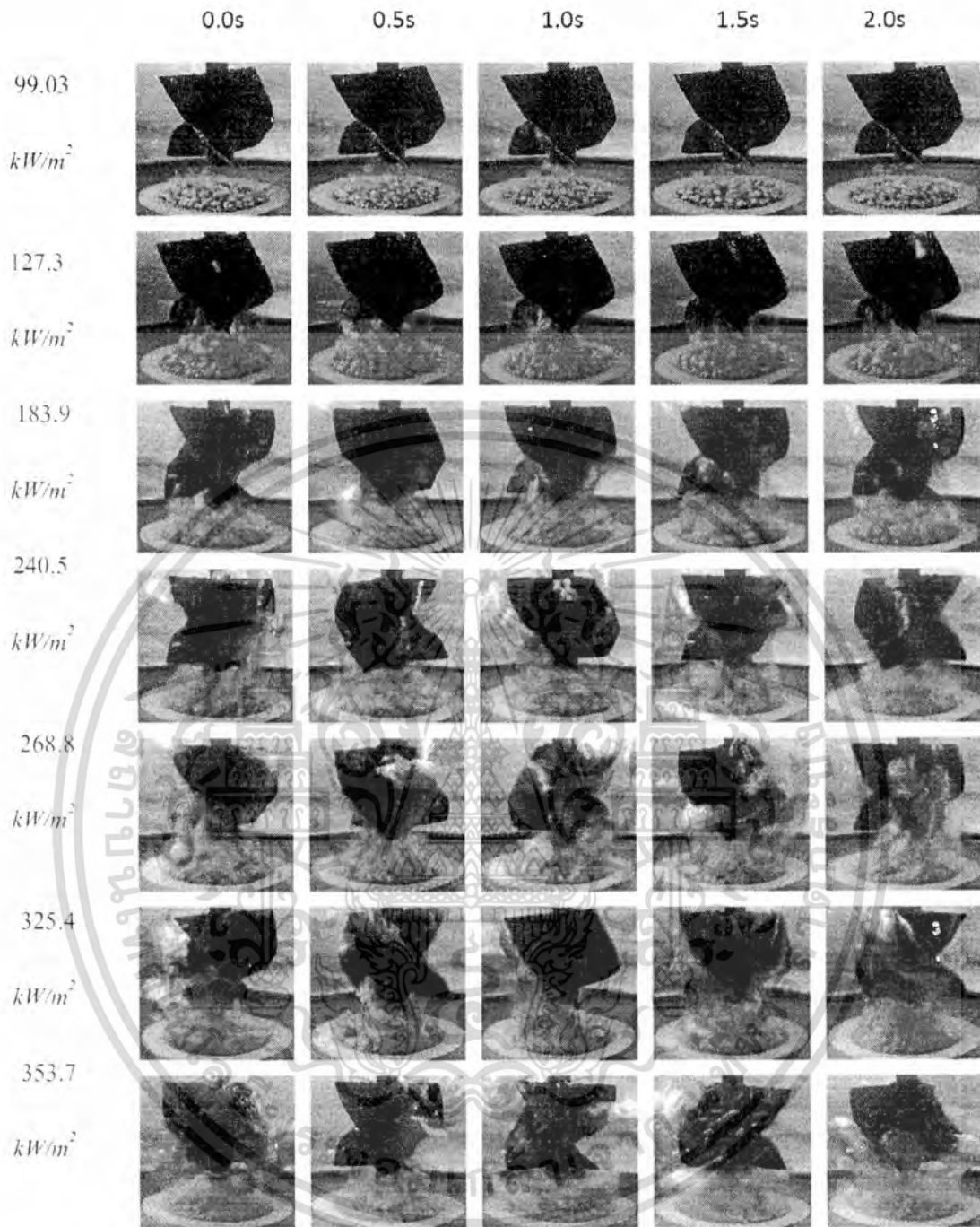
รูปที่ ข.38 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 2 ใบ ขนาด 40 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.39 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

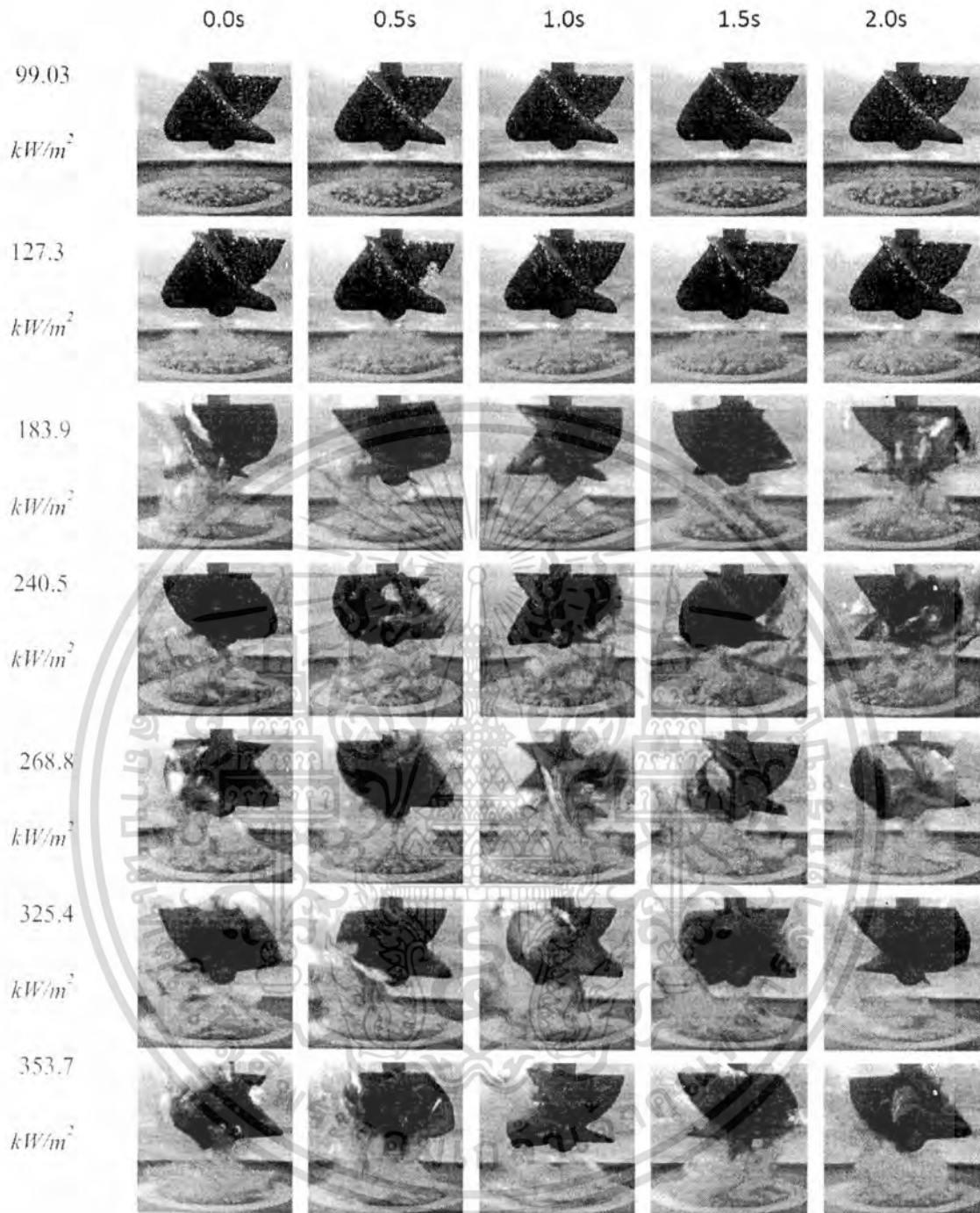
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.40 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ
ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

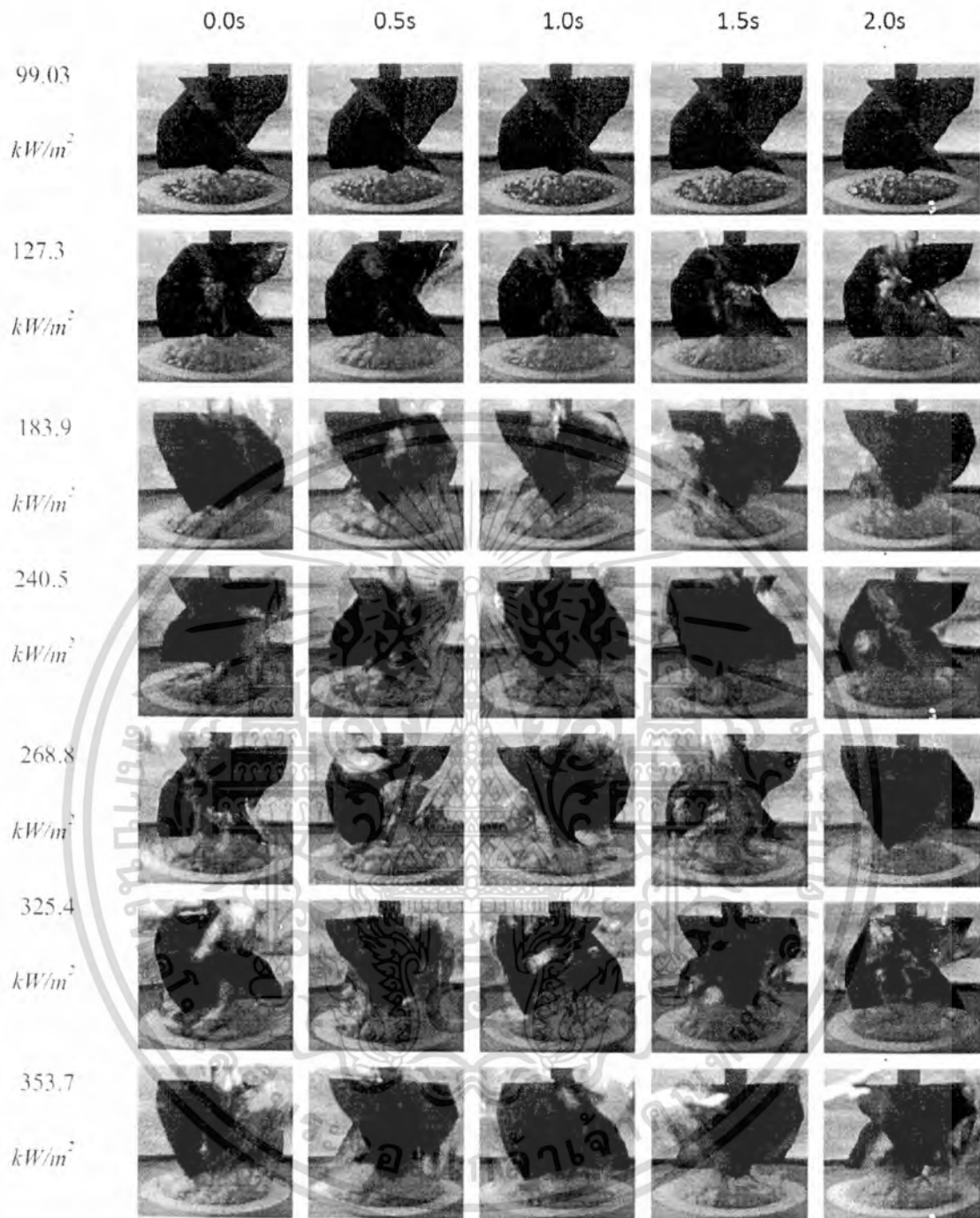
0s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



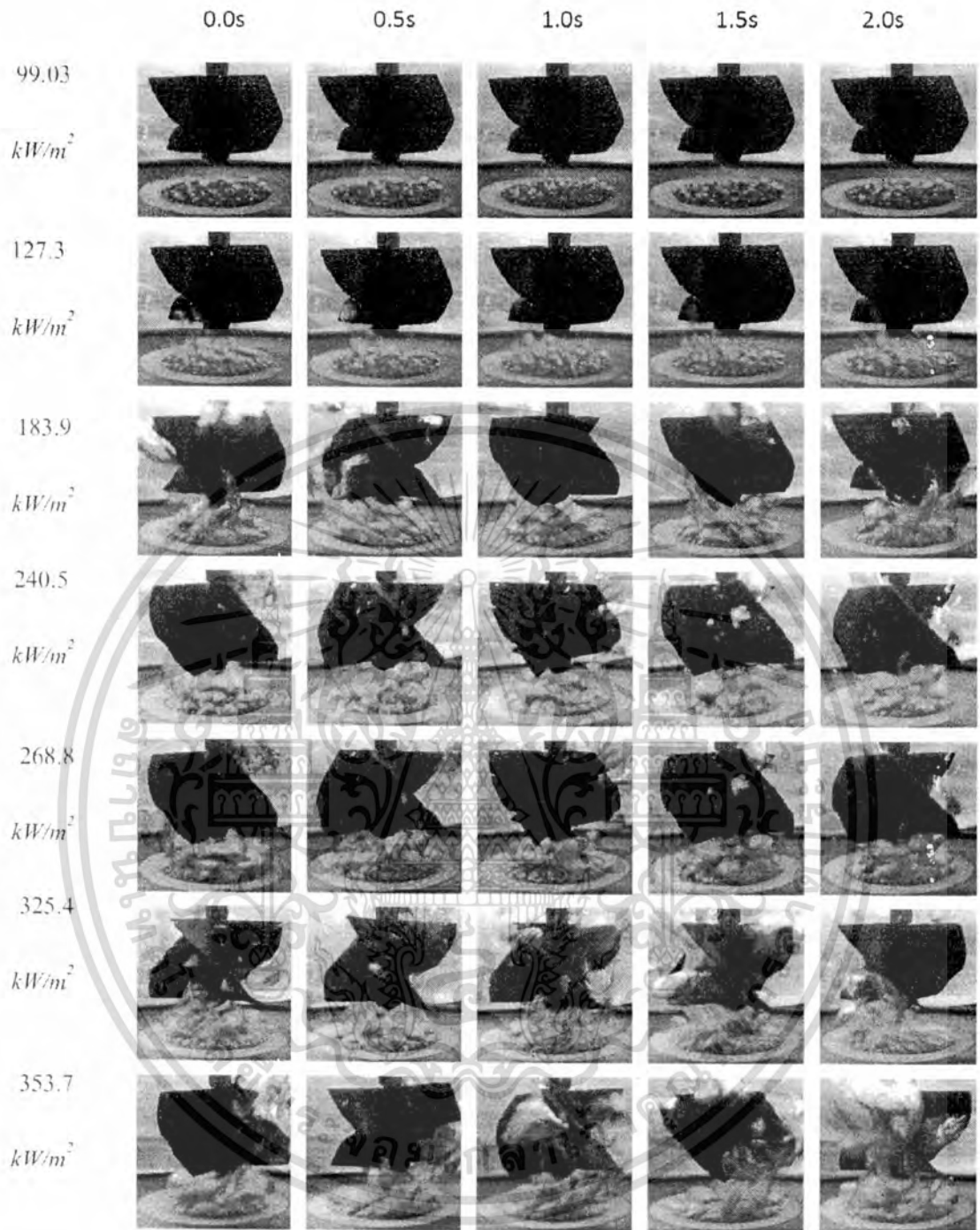
รูปที่ ข.41 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



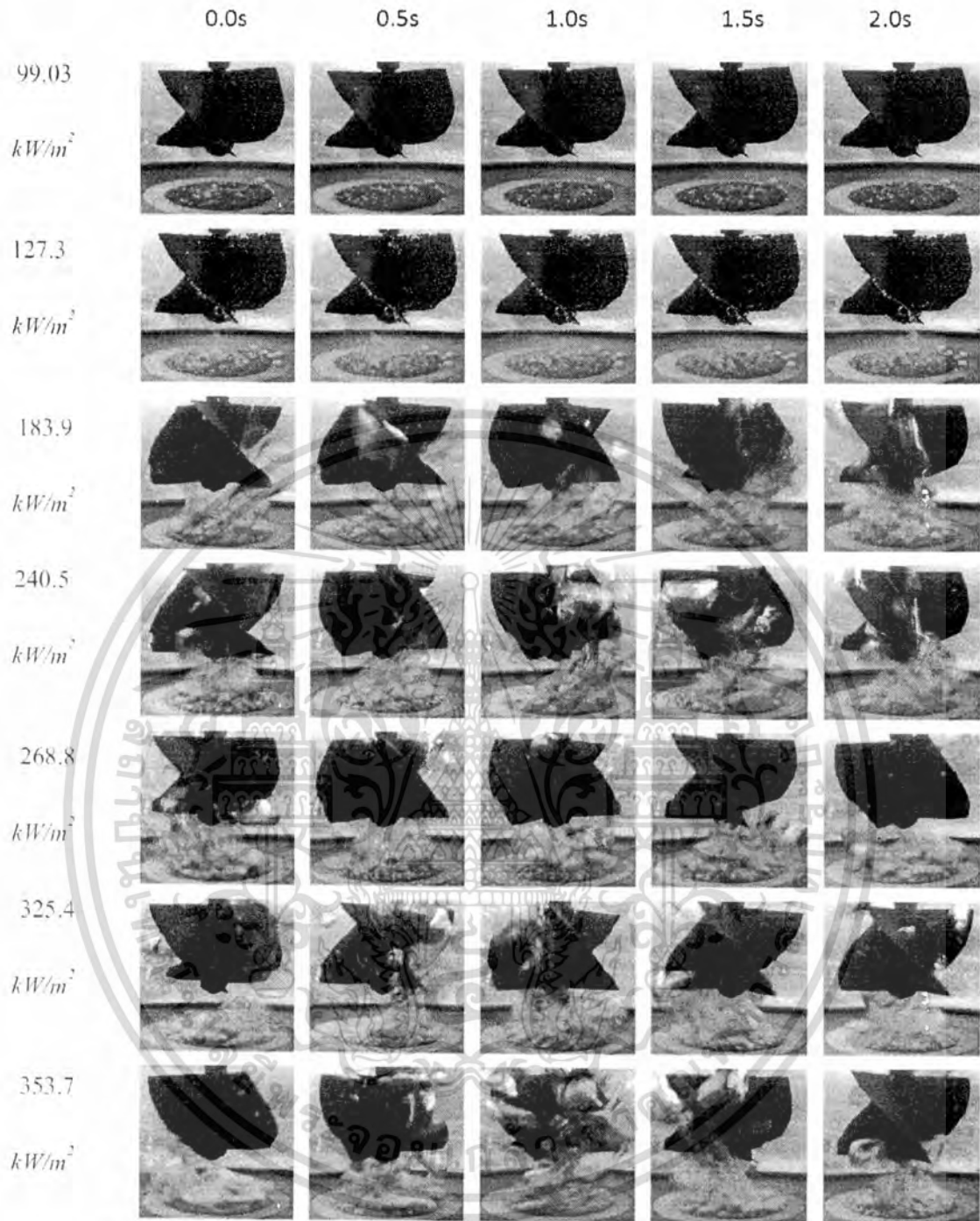
รูปที่ ข.42 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ
ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



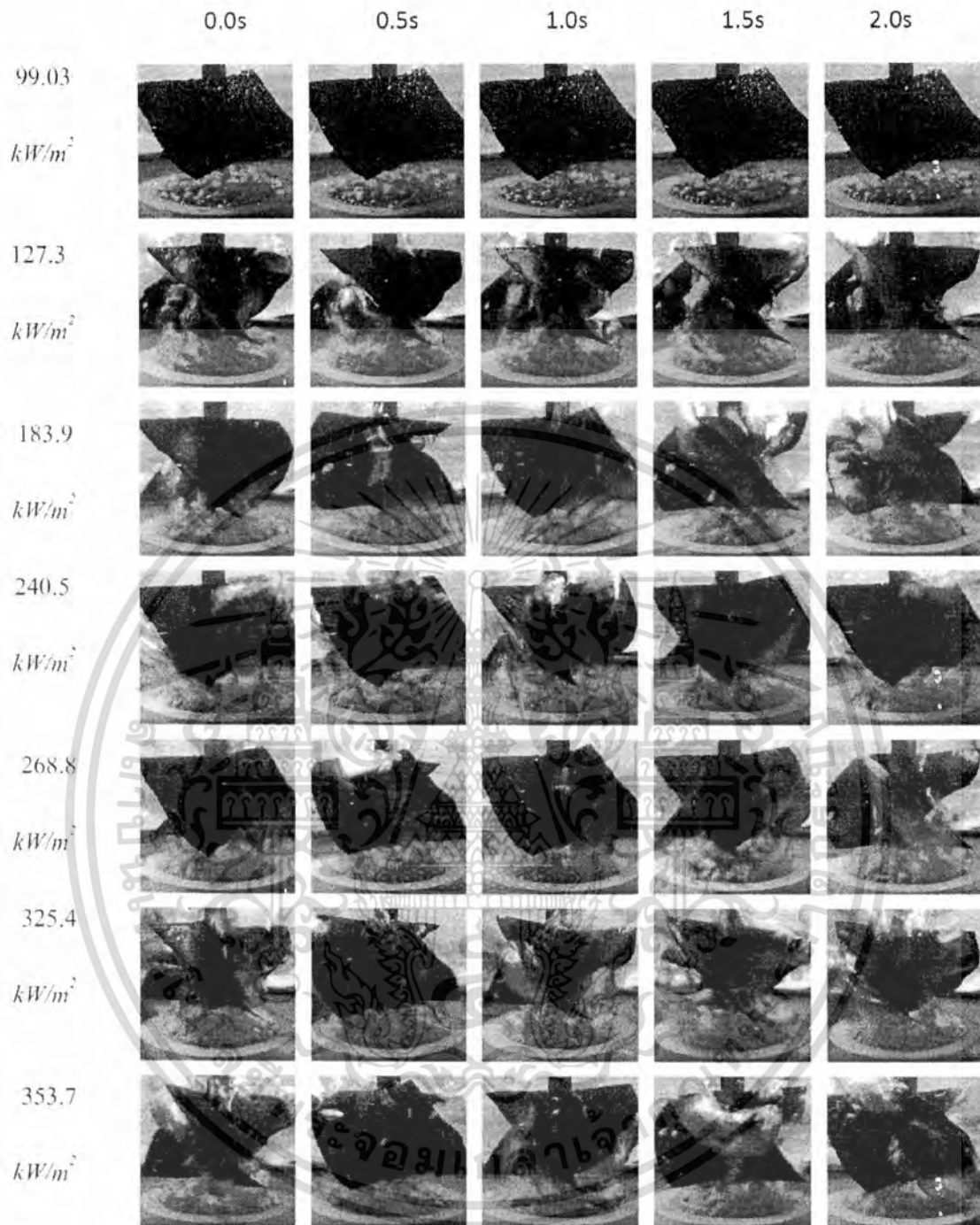
รูปที่ ข.43 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



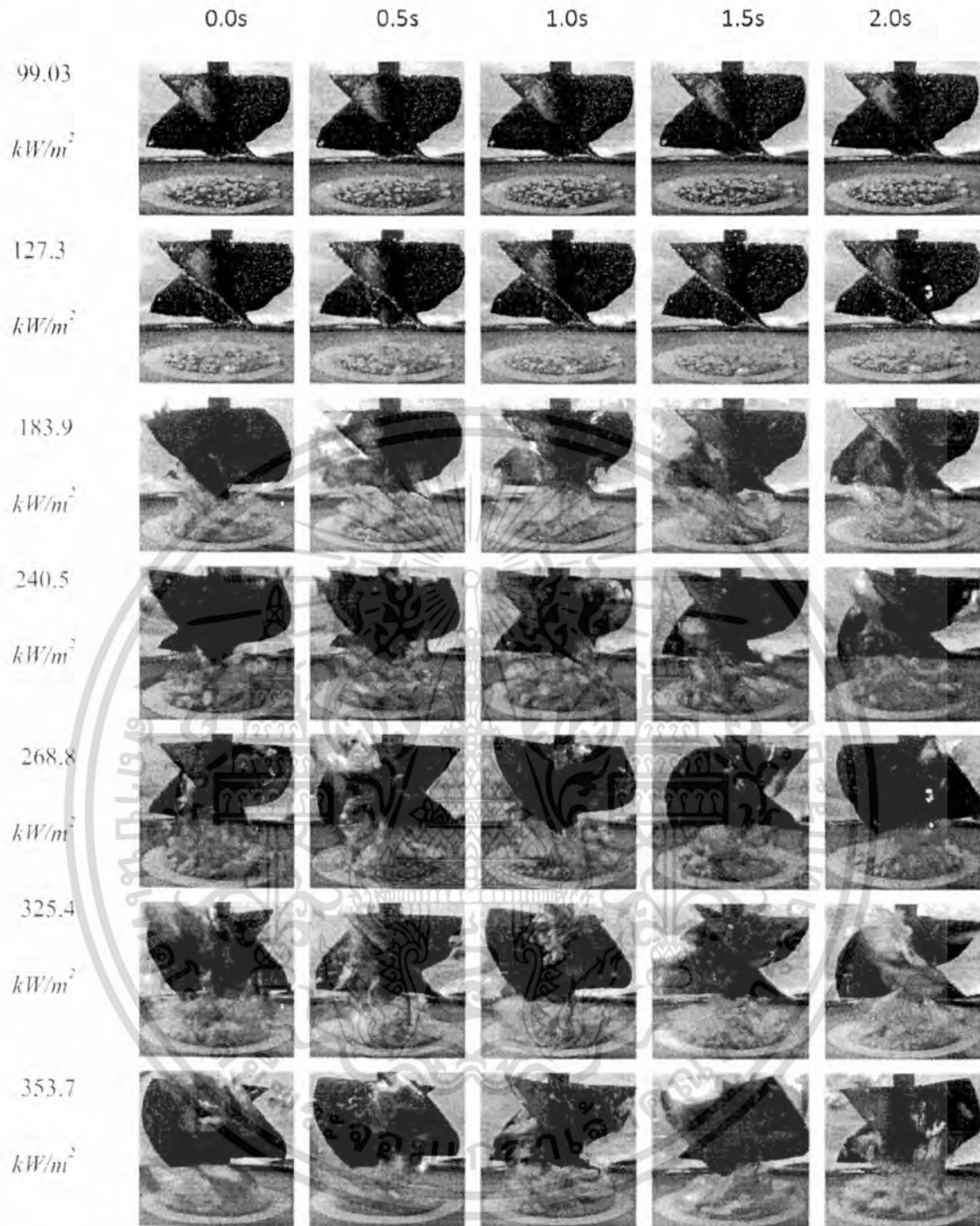
รูปที่ ข.44 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ
ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



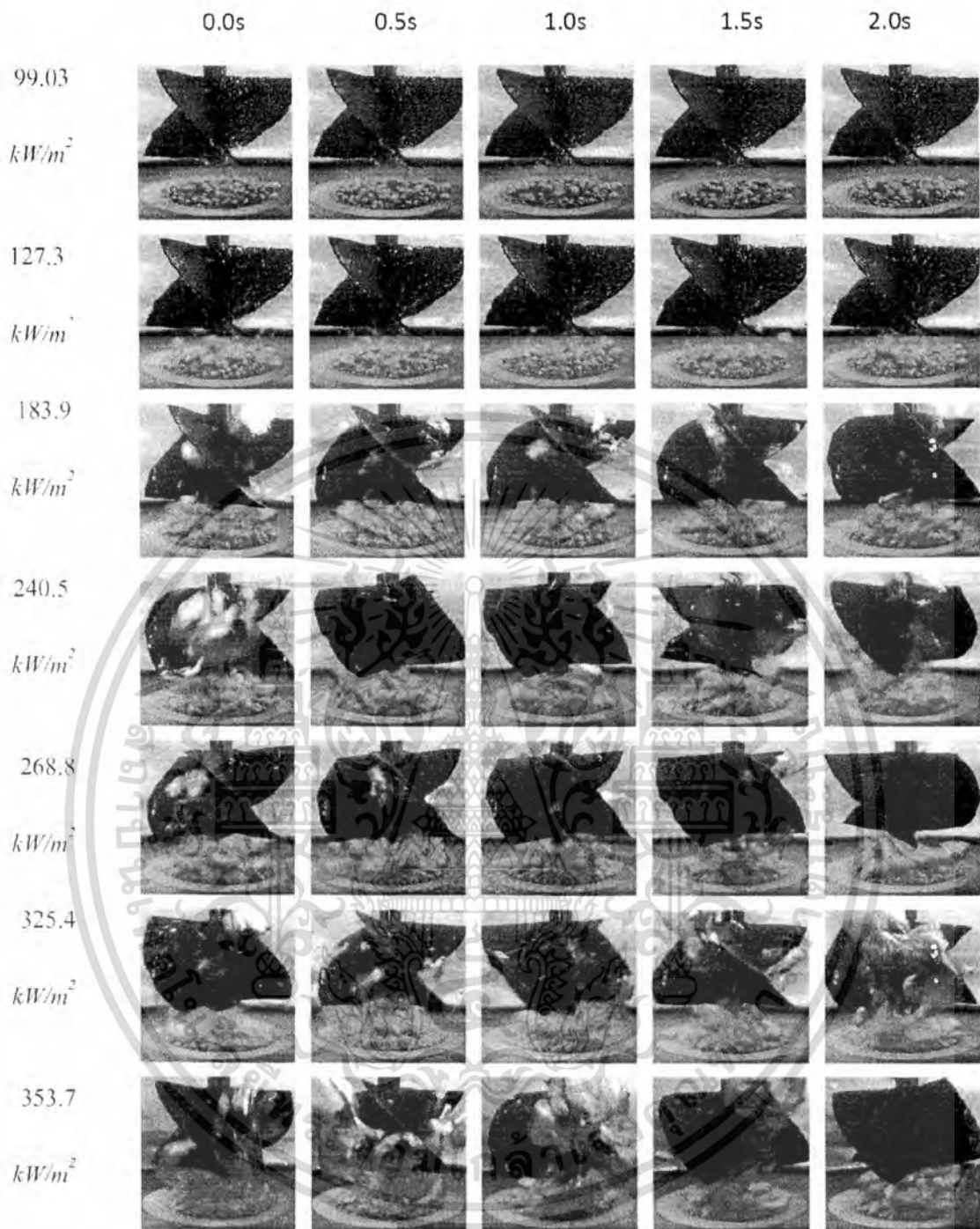
รูปที่ ข.45 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ ขนาด 40 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



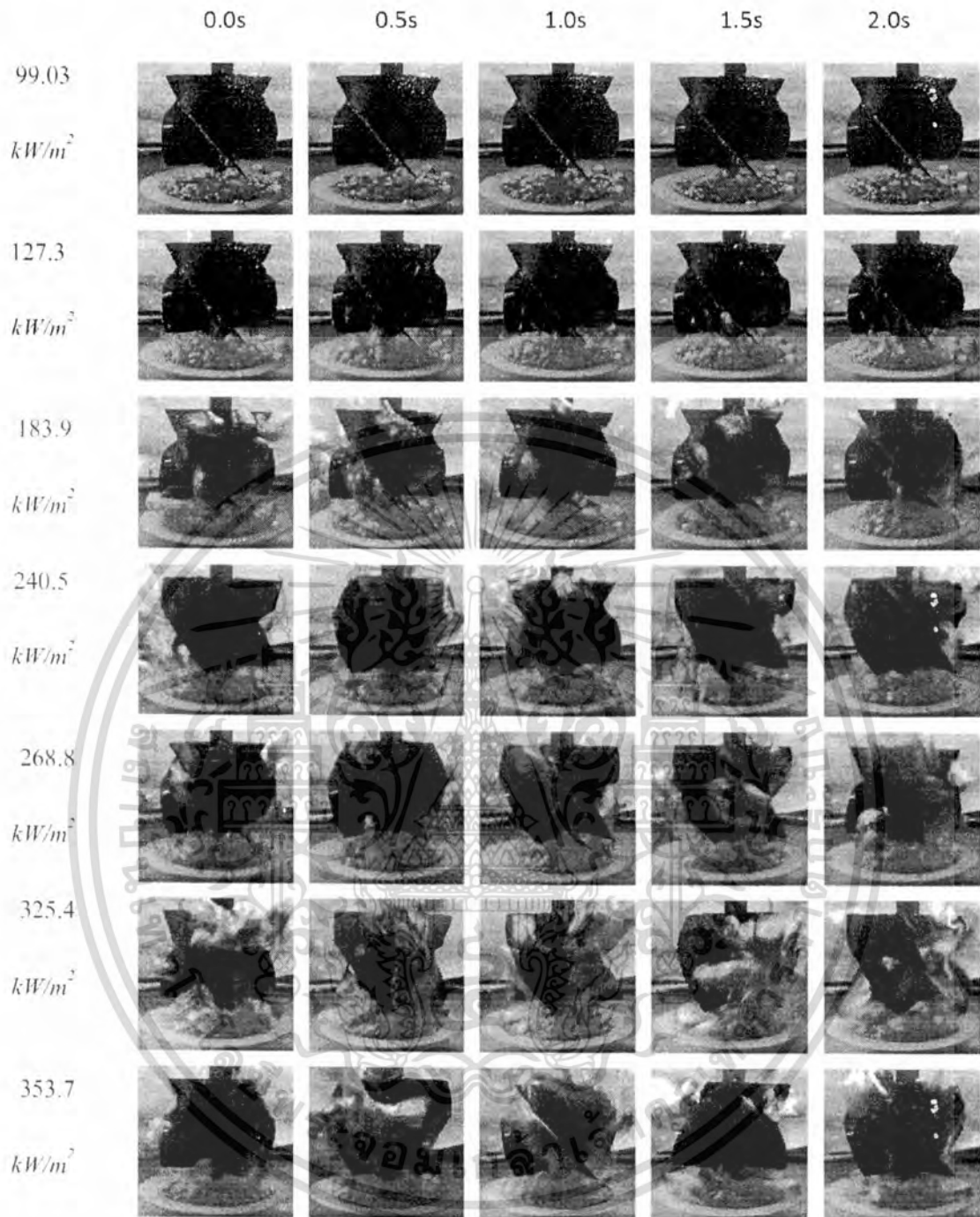
รูปที่ ข.47 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 3 ใบ ขนาด 40 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



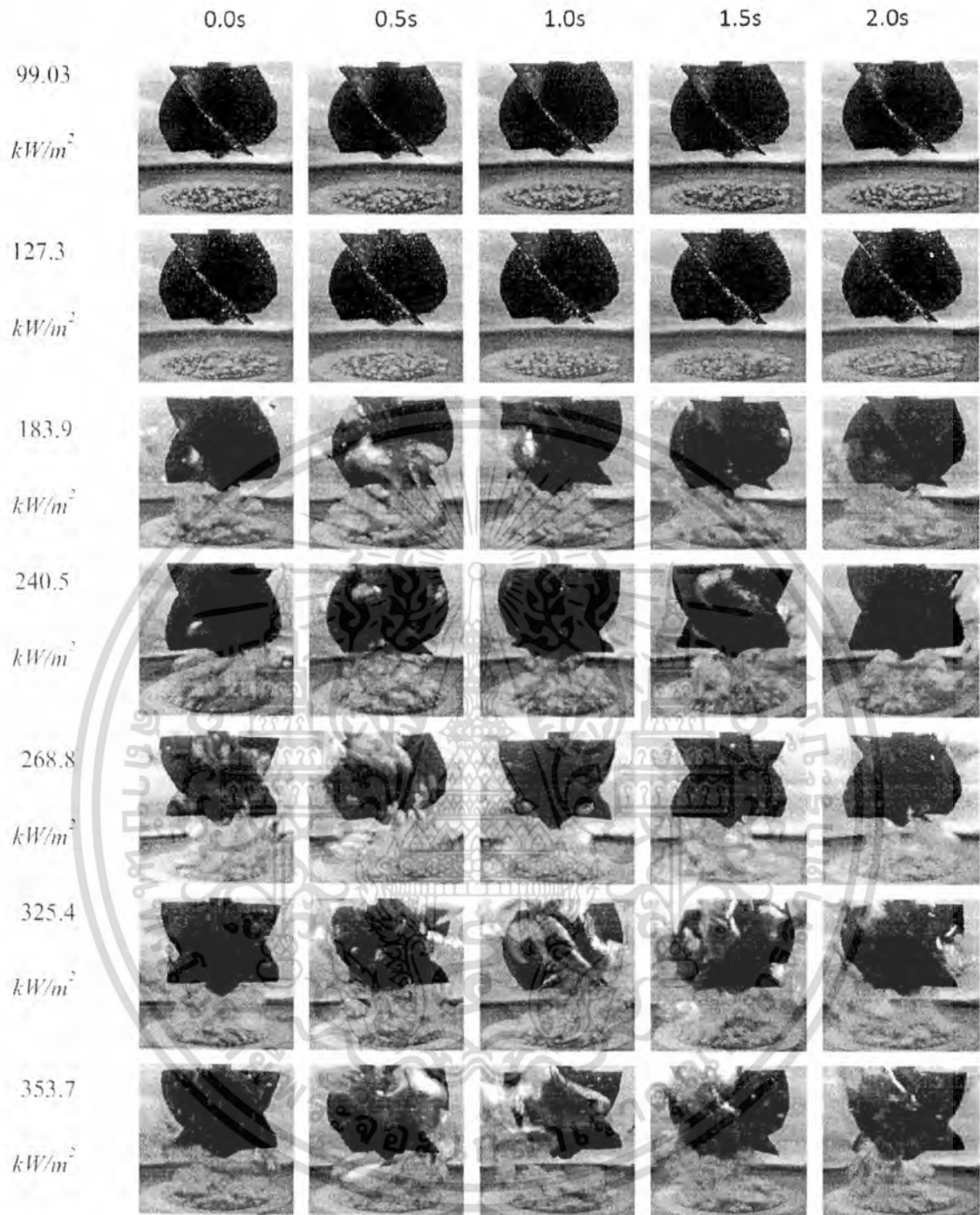
รูปที่ ข.48 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4-ใบ
ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



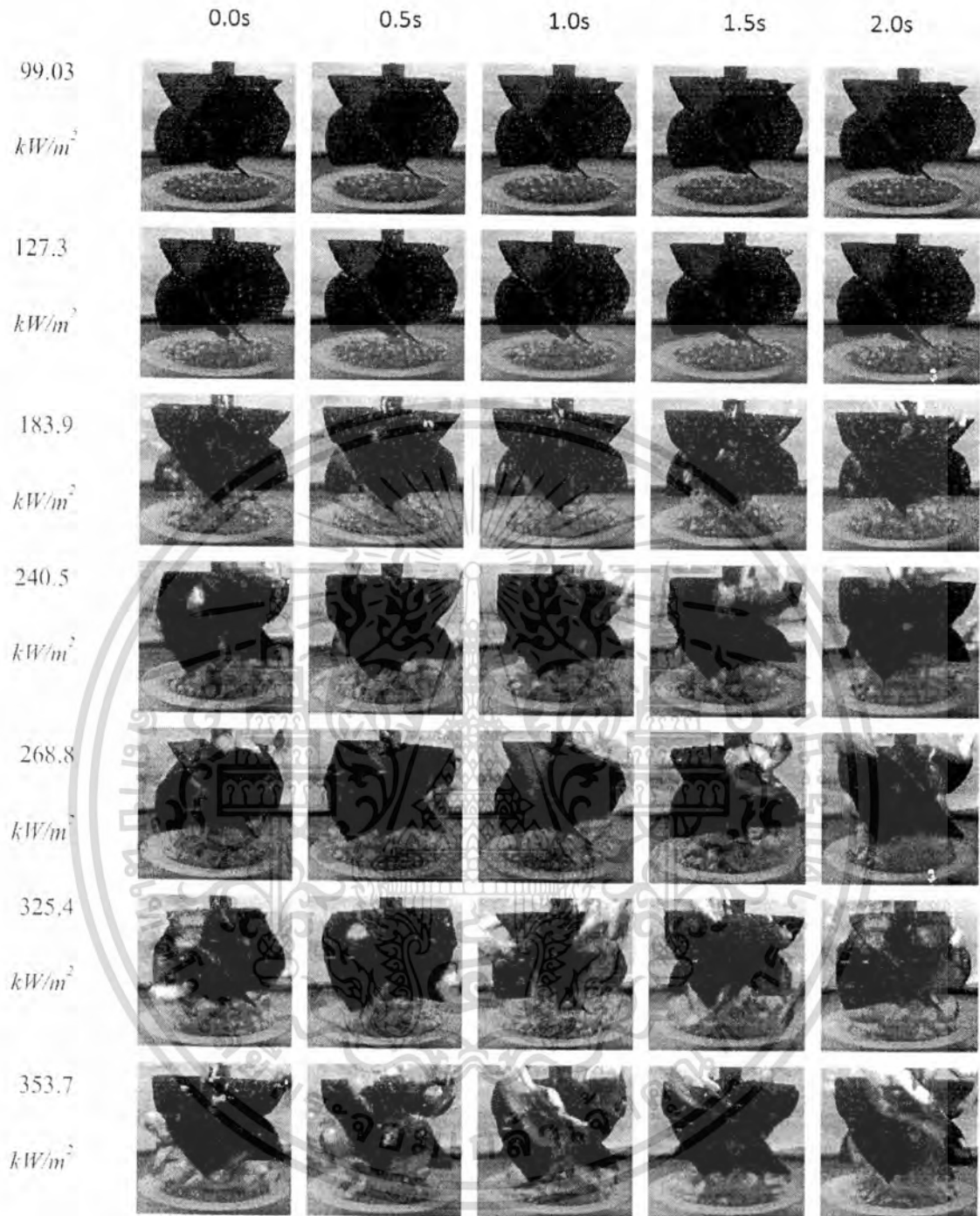
รูปที่ ข.49 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



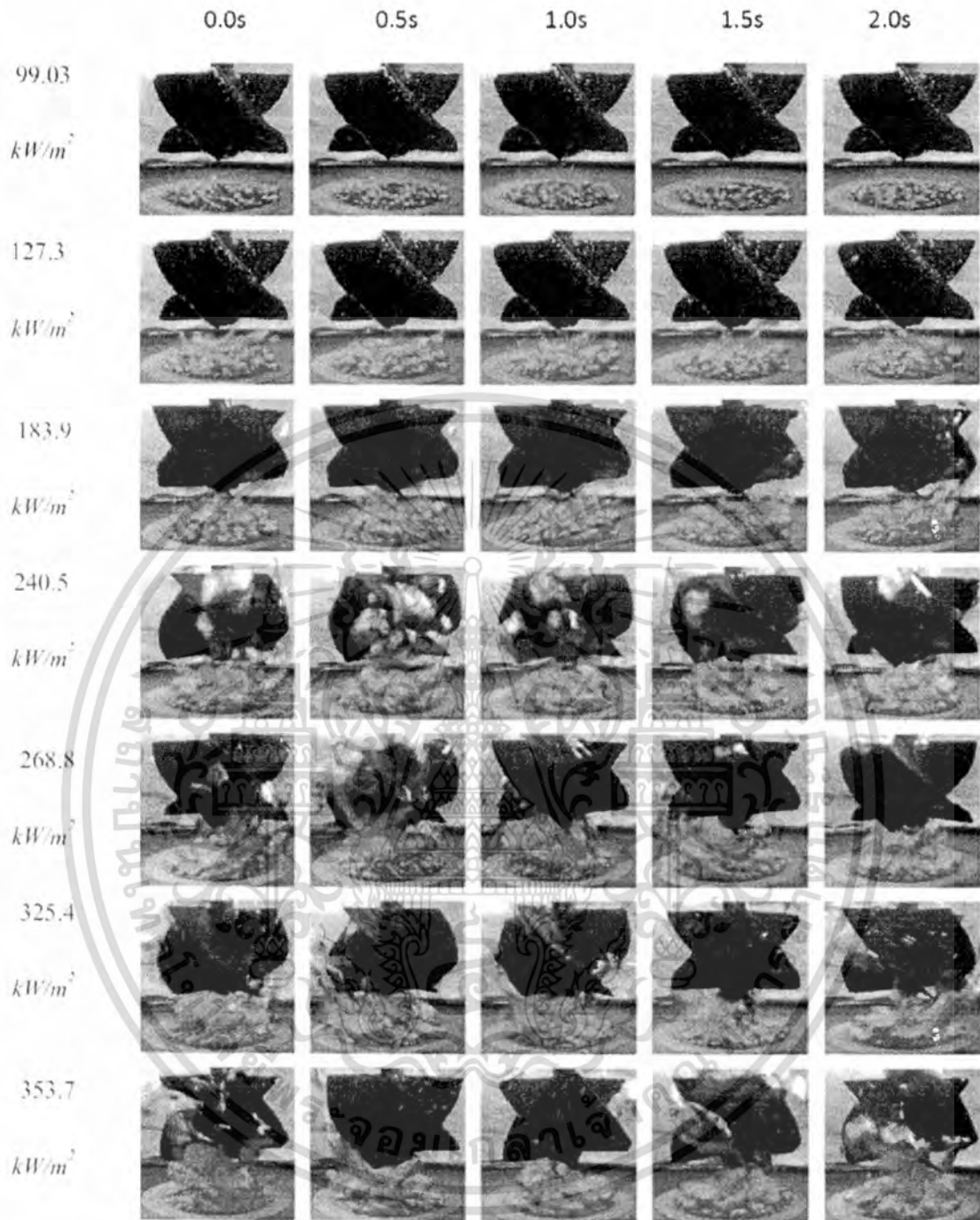
รูปที่ ข.50 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ
ขนาด 30 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



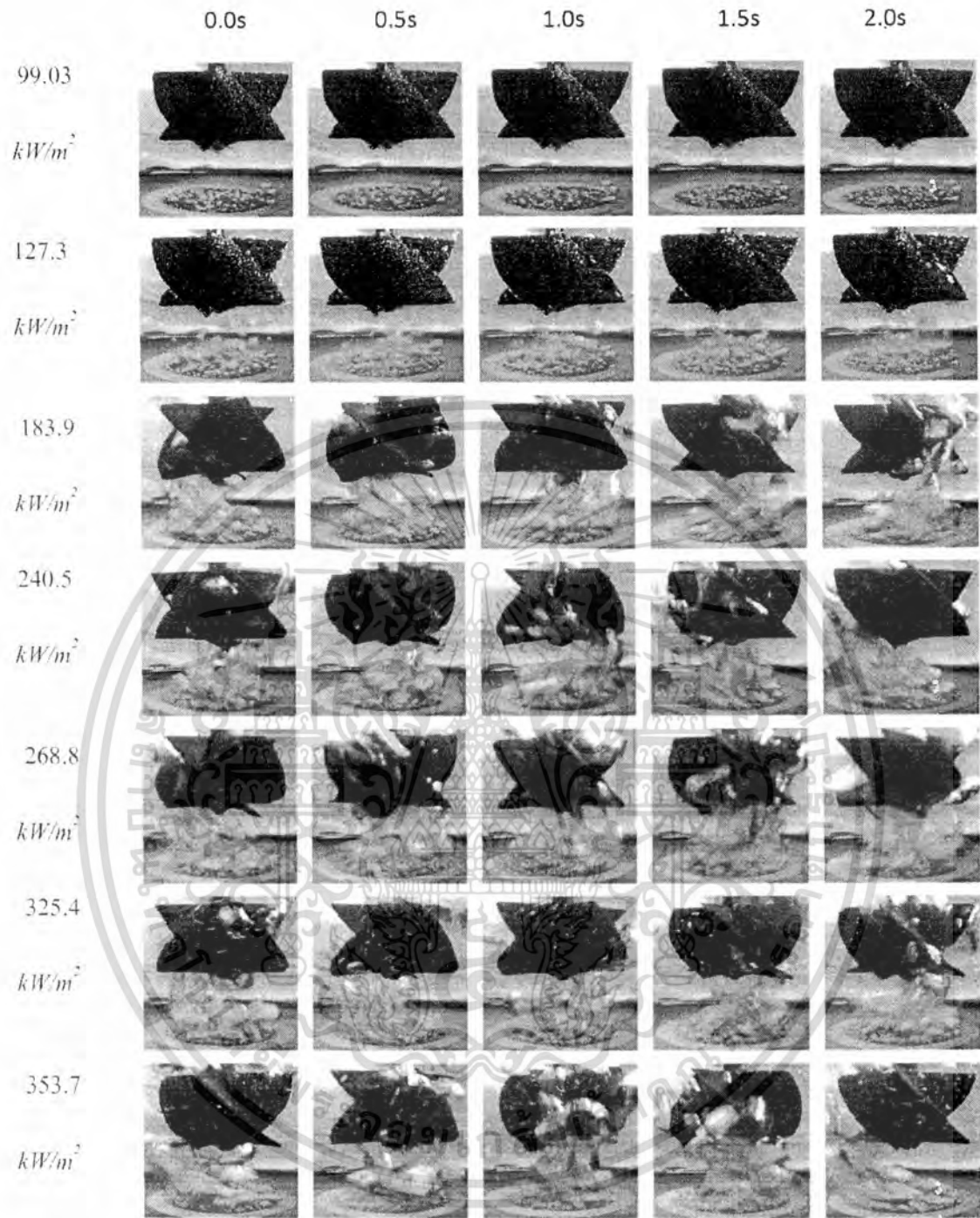
รูปที่ ข.51 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



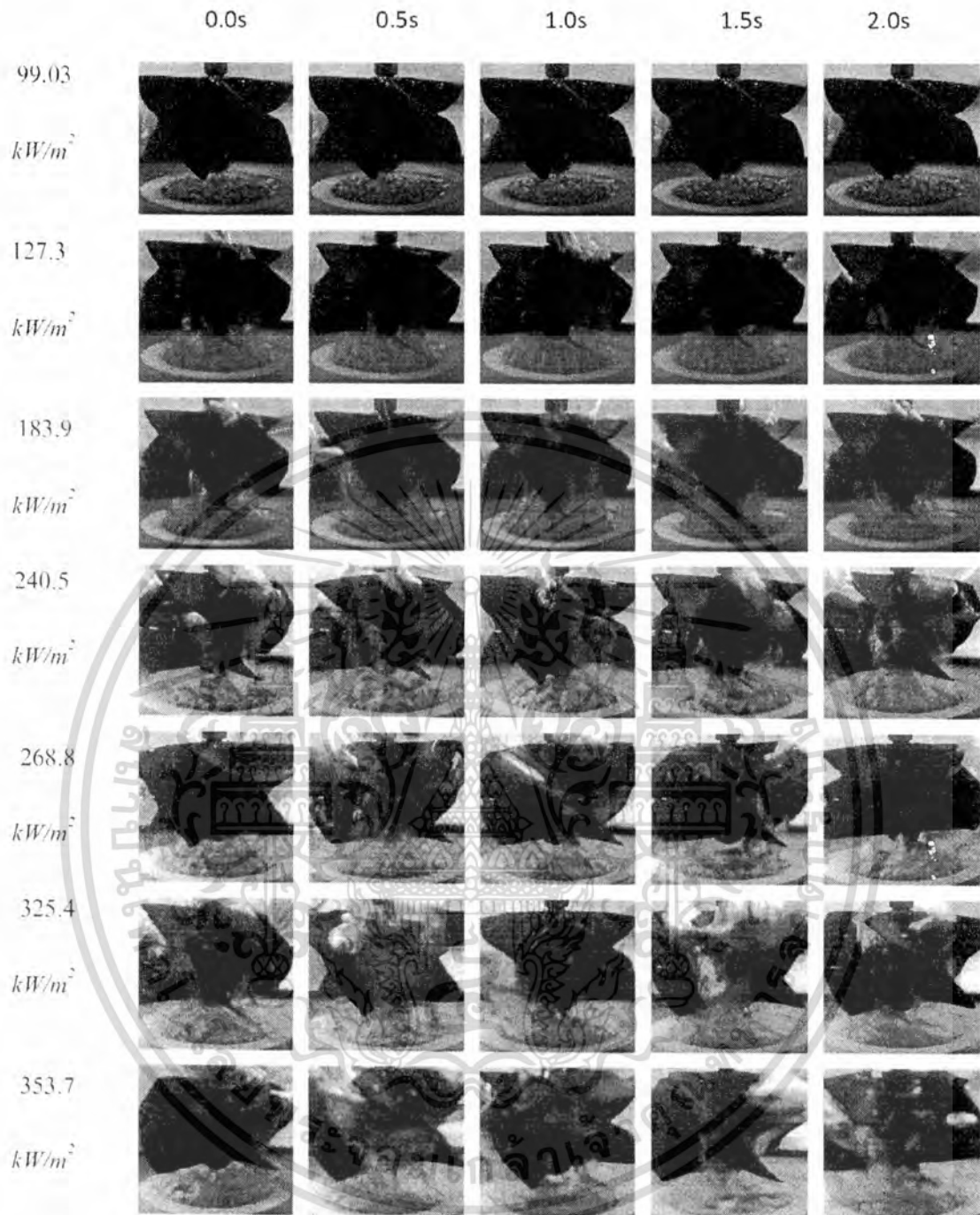
รูปที่ ข.52 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



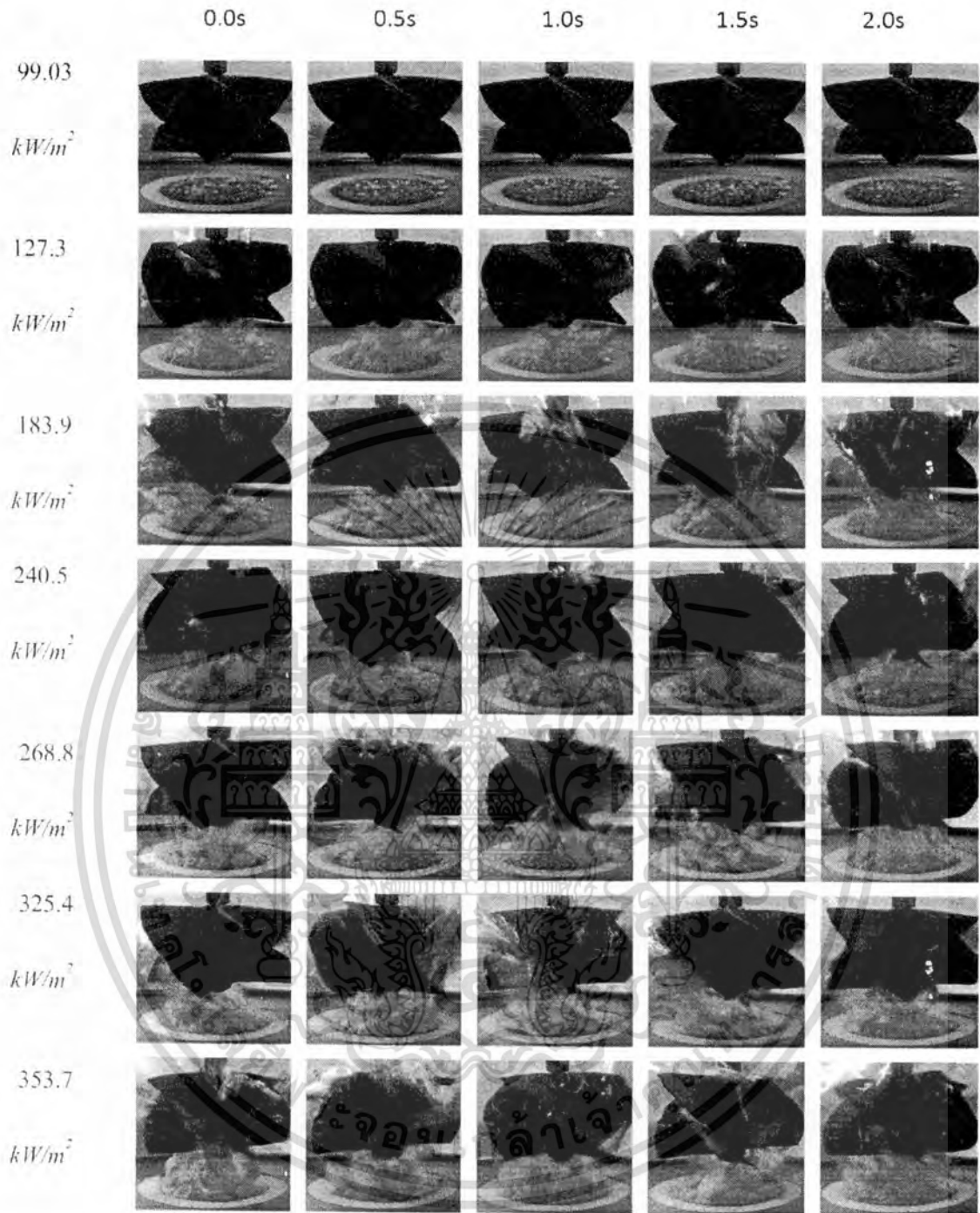
รูปที่ ข.53 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาด 35 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



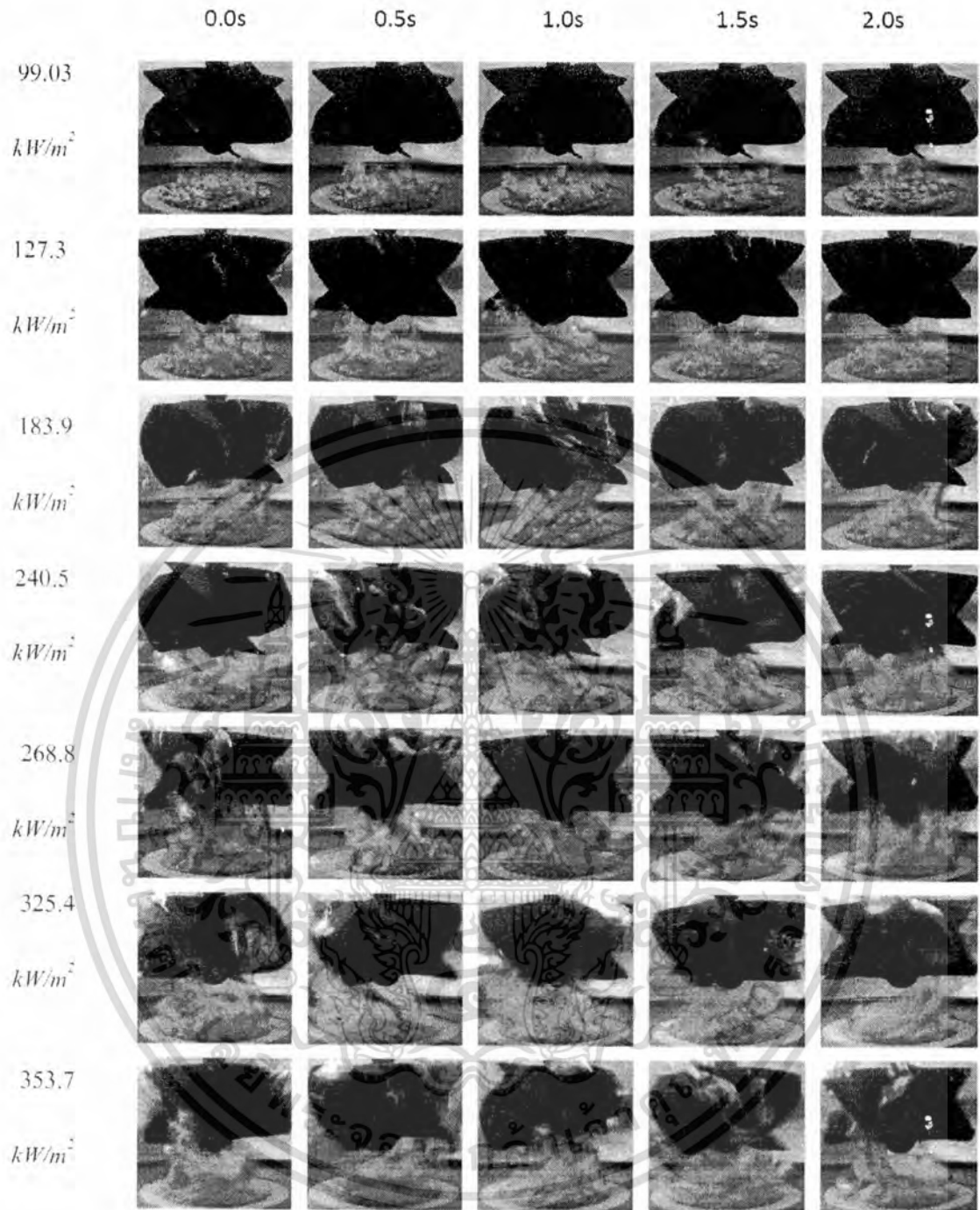
รูปที่ ข.54 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ
ขนาด 40 mm. และระยะห่าง 5 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.55 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาด 40 mm. และระยะห่าง 10 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.56 แสดงปรากฏการณ์ของการเดือดของน้ำกลั่นโดยติดตั้ง twisted tape ชนิด 4 ใบ ขนาด 40 mm. และระยะห่าง 15 mm.ไว้เหนือพื้นผิวให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 4 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2557

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การพัฒนาการถ่ายเทความร้อนแบบการเดือดเพื่อใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม
(ภาษาอังกฤษ) Development of boiling heat transfer for use in industry

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) อาจารย์ อติเรก สุริยะวงศ์

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 เมษายน 2556 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2557

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2556 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2557

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 499,600 บาท 100% วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	111,600	111,600	0
งบดำเนินงาน	0	0	0
ค่าตอบแทน	0	0	0
ค่าใช้สอย	97,000	97,000	0
ค่าวัสดุ	291,000	291,000	0
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	499,600.00	499,600.00	0

(.....อติเรก สุริยะวงศ์.....)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

29 / กันยายน / 2557

(นางสาวจริณี แก้วมังงู)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

29 / 9 / 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายอดิเรก สุริยวงษ์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Adirek Suriyawong

ตำแหน่งปัจจุบันอาจารย์

หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มือถือ 081-354-3663 e-mail: ksadirek@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ม.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2552
วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	2547

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

Boiling and Condensation Heat Transfer, Heat transfer Application, Multiphase flow

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพใน

2009 National Research Council of Thailand (NRCT), Thailand

Research: Experimental Study on the Nucleate Boiling of Nanofluids Applied for the Refrigeration and Air Conditioning.

2007 Energy Policy and Planning Office (EPPO), Ministry of Energy, Thailand.

Research: Boiling of a New Alternative Refrigerant "Nanofluid".

ผลงานวิจัย : ชื่อผลงานวิจัย ปีที่พิมพ์ การเผยแพร่ และแหล่งทุน

- 1 Saenmart K., Cheowuttikul P., Suriyawong A., Wongwises S. (2008) Onset of flooding in a small diameter tube. International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 35, Issue 4, Pages 458-465
- 2 Suriyawong A., Wongwises S. (2010) Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of TiO₂-water nanofluids at very low concentrations, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 34, Issue 8, Pages 992-999
- 3 M. Balcilar, A.S. Dalkilic, A. Suriyawong, T. Yiamsawas, S. Wongwises, (2012) Investigation of pool boiling of nanofluids using artificial neural networks and correlation development techniques, International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 39, Issue 3, March 2012, Pages 424-431.
- 4 Adirek Suriyawong and Somchai Wongwises, (2012) Effect of Nanofluid Concentration on the Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Enhancement on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a Copper Plain Surface, The International conference of the Thai Society of Agricultural Engineering April 4–5, 2012, Chiangmai Thailand.

- 5 Adirek Suriyawong and Somchai Wongwises, (2012) Effects of Surface Material and Surface Roughness on the Nucleate Boiling Heat Transfer Enhancement, The 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering, October 2012, Chiang Rai.
- 6 สมชาย วงศ์วิเศษ และ อติเรก สุริยะวงศ์ (2554) “การเดือดของของไหลนาโน” ราชบัณฑิตยสถานแห่งราชอาณาจักรไทย (อยู่ระหว่างรอการตีพิมพ์)

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายปัญญา แดงวิไลลักษณ์

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Panya Daungviluilux

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

โทรศัพท์ และโทรสาร 0-77 59-1450, 086-7546234

e-mail : kdpanya@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ม.	วิศวกรรมเครื่องกล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2542
วศ.บ.เกียรตินิยมอันดับ 2	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยสยาม	2539

สาขาวิชาที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ(แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)ระบุสาขาวิชาการ

1.การออกแบบเครื่องจักรกลการเกษตร

2. Graphic Design,CAD CAM CAE, Network, คอมพิวเตอร์

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งภายใน และภายนอกประเทศ

1. ศิระ สายศร, วสันต์ ดั่งคำจันทร์, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ “การศึกษากลไกการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟร่วมกับฟลูอิดไดซ์เบด”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, หน้าที่ 860-863. ตุลาคม 2547, จ.ขอนแก่น
2. ศิระ สายศร, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ “การเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและเครื่องอบแห้งแบบหมุนวนร่วมกับไมโครเวฟ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, หน้าที่ 1079-1084. ตุลาคม 2548, จ.ภูเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ จำลอง ปราบแก้ว. “เครื่องบีบน้ำมันปาล์มขนาดเล็กสำหรับกลุ่มเกษตรกร”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, หน้าที่ 360-365. ตุลาคม 2548, จ.ภูเก็ต
4. ดิษฐพร ตุงโสธานนท์, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ วชร กาลาสี. 2549. “ความต้องการพลังงานภาคการผลิตของประเทศไทยในแต่ละช่วงของเศรษฐกิจ: ส่วนที่ 1 ช่วงปี 1987-2004”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
5. วชร กาลาสี, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ และ พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2549. “แนวโน้มความต้องการพลังงานในภาคการผลิตของไทย: ส่วนที่ 2 (2005-2020)”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20, 18-20 ตุลาคม 2549, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
6. ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, ศิระ สายสร “เครื่องบีบน้ำมันปาล์มแบบสายพานกรองอัตโนมัติขนาดเล็กสำหรับกลุ่มเกษตรกร” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2018-20 ตุลาคม 2549 จังหวัดนครราชสีมา
7. กฤษ สมนึก ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ วชร กาลาสี “พัฒนาการอบปาล์มน้ำมันด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
8. ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ จำลอง ปราบแก้ว “เครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะเลาะแบบลากจูง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
9. ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ และ กฤษ สมนึก “เครื่องเคลือบไขผลส้มโอ” การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10 ประจำปี 2552, 1 - 3 เมษายน 2552 ณ สุระสัมพันธ์ ม. เทคโนโลยีสุรนารี
10. ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, วชร กาลาสี “การพัฒนาเครื่องไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องในการอบผลหมาก” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4 - 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่
11. ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ “การทำความเย็นแบบแอร์ฟอล์ยสำหรับกล้วยเล็บมือนางบรรจุกล่อง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี
12. ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ และ จำลอง ปราบแก้ว “การพัฒนาเครื่องแยกเนื้อและเมล็ดปาล์มกึ่งอัตโนมัติสำหรับกลุ่มเกษตรกร” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี
13. Patara Suppatkul, Panya Daungvilailus and Chamlong Prabkeao. “Development of Palm Oil Pressing Machine Without Sterilization Process” International Workshop Strengthening the Application of Agricultural Engineering and Post harvest Technology for Effective and Sustainable Development in Agricultural Production, pp 129, Dec 2005, Hanoi, Vietnam

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. สิ่งประดิษฐ์ “ เครื่องแยกผลปาล์มจากทะเลาย ชนิดถังกลมและฐานหมุน ” จำลอง ปราบ แก้ว , จารุวัตร เจริญสุข และ ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ “ ผลงานดีเด่น สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี พ.ศ.2545ได้รับอนุสิทธิบัตร เลขที่ 1339 เมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2546. และได้เผยแพร่ใน วารสารสมาคมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, ปีที่ 2 เล่มที่ 3 ประจำเดือนกุมภาพันธ์- มีนาคม 2546 , วารสาร UP DATE, ปีที่ 18 ฉบับที่ 185 ประจำเดือน มกราคม 2546. และจดหมายข่าว ปาล์มน้ำมัน ปีที่ 3 ฉบับที่ 4 เดือน ธันวาคม 2545 – กุมภาพันธ์

ผู้ร่วมโครงการวิจัย: ดร.ศิริระ สายศร

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) นายศิริระ สายศร

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Sira Saisorn

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานที่อยู่

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

17/1 ม.6 ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ.ชุมพร 86160

โทรศัพท์. +66 4858 1596, +66 7759 1444-6 โทรสาร. 0-77591445

อีเมลล์: kssira@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ด.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2553
วศ.ม.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	2545
วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2542

สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ

การไหลสองสถานะในท่อขนาดไมโครแชนเนล, เทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

- 1.Saisorn S, Wongwises S. A review of two-phase gas-liquid adiabatic flow characteristics in micro-channels. Renewable & Sustainable Energy Reviews 2008; 12: 824-838. มี impact factor 4.842
- 2.Saisorn S, Wongwises S. Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in a horizontal circular micro-channel. Experimental Thermal and Fluid Science 2008; 32: 748-760. มี impact factor 1.234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Saisorn S, Wongwises S. An inspection of viscosity model for homogeneous two-phase flow pressure drop prediction in a horizontal circular micro-channel. International Communications in Heat and Mass Transfer 2008; 35: 833-838. มี impact factor 1.189
 4. Saisorn S, Wongwises S. An experimental investigation of two-phase air-water flow through a horizontal circular micro-channel. Experimental Thermal and Fluid Science 2009; 33: 306-315. มี impact factor 1.234
 5. Saisorn S, Wongwises S. The effects of channel diameter on flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in circular micro-channels. Experimental Thermal and Fluid Science 2010; 34: 454-462. มี impact factor 1.234
 6. Saisorn S, Kaew-On J, Wongwises S. Flow pattern and heat transfer characteristics of R-134a refrigerant during flow boiling in a horizontal circular mini-channel. International Journal of Heat and Mass Transfer 2010; 53: 4023-4038. มี impact factor 1.947
 7. Saisorn S, Wongwises S. Two-phase flow in circular micro-channels. ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale; Whistler Canada, September 21-26, 2008.
 8. Saisorn S, Kaew-On J, Wongwises S. Flow boiling heat transfer characteristics of R-134a in horizontal and vertical mini-channels. 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels; Montreal Canada, August 1-5, 2010.
 9. คีระ สายศร, วสันต์ ดั่งคำจันทร์, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, “การศึกษากลไกการอบแห้งเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟร่วมกับฟลูอิดไดซ์เบด”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น
 10. คีระ สายศร, ปัญญา แดงวิไลลักษณ์, “การเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวโพดโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับไมโครเวฟและเครื่องอบแห้งแบบหมุนวนร่วมกับไมโครเวฟ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดสงขลา
- รางวัลที่เคยได้รับ (ด้านวิชาการโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกี่ยวกับงานวิจัย)
- Outstanding oral presentation in RGJ-Ph.D. Congress IX April 4-6, 2008
- ทุนวิจัยที่เคยได้รับ
- ทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร 2546-2547
 - ทุนปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (2549-2553)

ผู้ร่วมโครงการวิจัย: นายไชยรัตน์ เพชรคีรี
 ชื่อ - สกุล (ภาษาไทย) นายไชยรัตน์ เพชรคีรี
 ชื่อ - สกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.Chairat Petkeree
 ตำแหน่ง นายช่างเทคนิค

หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

โทรศัพท์ และโทรสาร 0-7759-1411

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	2525

สาขาวิชาที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ
 -เครื่องมือกล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้