



กฎข้อที่ 1 และ 2 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับคิริบตามแนวยาวที่มี
โปรไฟล์สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ภายใต้สภาวะผิวเปียก
บางส่วน

ทศพล จันทร์ระอ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

กฎข้อที่ 1 และ 2 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับครีปตามแนวยาวที่มี
โปรไฟล์สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ภายใต้สภาวะผิวเปียก
บางส่วน



ทศพล จันทร์ระอ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

1ST AND 2ND LAWS OF THERMODYNAMICS FOR OPTIMIZATION OF
LONGITUDINAL FINS OF RECTANGULAR, TRIANGULAR, CONCAVE PARABOLIC,
AND CONVEX PARABOLIC PROFILES UNDER PARTIALLY WET SURFACE
CONDITIONS



TOTSAPON CHANLAOR

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF ENGINEERING
IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY

2024

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ทศพล จันทร์ละออ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี)

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ ดั่งทองสุข)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ บุญโล่ง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา รังสิโยภาส)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณยศ คุรุกิจโกศล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัย
บูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑูรย์ แจ่มเอี่ยม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

65910173: สาขาวิชา: วิศวกรรมเครื่องกล; วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล)

คำสำคัญ: ครีบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม/ ครีบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สามเหลี่ยม/ ครีบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้า/ ครีบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์พาราโบลาโค้งนูน/ สภาวะลดความชื้น/ ครีบเปียกบางส่วน/ การถ่ายโอนความร้อน/ อัตราการถ่ายโอนความร้อน/ การเกิดเอนโทรปี/ อัตราการเกิดเอนโทรปี/ ตัวเลขการเกิดเอนโทรปี

ทศพล จันทร์ระอ : กฎข้อที่ 1 และ 2 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับครีบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ภายใต้สภาวะผิวเปียกบางส่วน. (1ST AND 2ND LAWS OF THERMODYNAMICS FOR OPTIMIZATION OF LONGITUDINAL FINS OF RECTANGULAR, TRIANGULAR, CONCAVE PARABOLIC, AND CONVEX PARABOLIC PROFILES UNDER PARTIALLY WET SURFACE CONDITIONS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี, วศ.ด. ปี พ.ศ. 2567.

ในปัจจุบันมีผู้ทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับครีบเปียกบางส่วนค่อนข้างน้อย เนื่องจากการคำนวณมีความซับซ้อน และมีงานวิจัยในอดีตให้อ้างอิงค่อนข้างน้อย รวมถึงยังไม่มียานวิจัยที่กล่าวถึงการเกิดเอนโทรปีในครีบเปียกบางส่วน วิทยานิพนธ์นี้จึงศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของครีบในสภาวะผิวเปียกบางส่วนตามแนวยาว เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะการทำงานต่าง ๆ โดยอยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่ 1 และ 2 ของอุณหพลศาสตร์ และอาศัยพื้นฐานข้อมูลจากงานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ไปแล้วในอดีต แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น จะใช้จำลองสภาวะการทำงานและหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของครีบในสภาวะผิวเปียกบางส่วน ของครีบ 4 โปรไฟล์ คือ โปรไฟล์สี่เหลี่ยม โปรไฟล์สามเหลี่ยม โปรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้า และโปรไฟล์พาราโบลาโค้งนูน ส่วนหนึ่งของผลลัพธ์ที่ได้พบว่า ที่พื้นที่ด้านข้างครีบคงที่ การเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศ จะทำให้ความยาวที่เหมาะสมของครีบลดลง แต่ที่ความเร็วอากาศคงที่ การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ด้านข้างของครีบ จะทำให้ความยาวที่เหมาะสมของครีบเพิ่มขึ้น โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอแผนภูมิสำหรับเลือกขนาดของครีบที่เหมาะสม หรือแผนภูมิที่แสดงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของครีบไว้ด้วย

65910173: MAJOR: MECHANICAL ENGINEERING; M.Eng. (MECHANICAL ENGINEERING)

KEYWORDS: HEAT TRANSFER/ HEAT TRANSFER RATE/ LONGITUDINAL FINS OF RECTANGULAR PROFILES/ LONGITUDINAL FINS OF TRIANGULAR PROFILES/ LONGITUDINAL FINS OF CONCAVE PARABOLIC PROFILES/ LONGITUDINAL FINS OF CONVEX PARABOLIC PROFILES/ DEHUMIDIFYING/ ENTROPY GENERATION/ ENTROPY GENERATION RATE/ ENTROPY GENERATION NUMBER

TOTSAPON CHANLAOR : 1ST AND 2ND LAWS OF THERMODYNAMICS FOR OPTIMIZATION OF LONGITUDINAL FINS OF RECTANGULAR, TRIANGULAR, CONCAVE PARABOLIC, AND CONVEX PARABOLIC PROFILES UNDER PARTIALLY WET SURFACE CONDITIONS. ADVISORY COMMITTEE: WORACHEST PIROMPUGD, D.Eng. 2024.

Currently, there are relatively few researchers related to partially wet fins because the calculations are complicated and there are relatively few past researches to refer to. In addition, there is no research that mentions entropy generation in partially wet fins. This thesis studies the mathematical model of the longitudinal partially wet fins to find the most optimum point in many operating conditions based on the 1st and 2nd Laws of Thermodynamics and the basic of data from previously published research. The developed mathematical model will be used to simulate the operating conditions and find the most optimum point of the fins in the partially wet condition of the 4 fin profiles: rectangular profile, triangular profile, concave parabolic profile, and convex parabolic profile. Some of the results found that at a constant fin side area, an increase in air velocity will reduce the optimum fin length. However, at a constant air velocity, an increase in the fin side area will increase the optimum fin length. This thesis will also present a selection chart for the optimum fin size or a chart showing the optimal operating conditions of the fins.

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี เป็นอย่างสูงที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความรู้ ช่วยตรวจสอบ ด้วยความเอาใจใส่ ตลอดจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้ให้ทุนการศึกษาและรับผู้จัดทำ เข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา(ปริญญาโท) รวมไปถึงอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวของผู้จัดทำ ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้การสนับสนุน สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้จัดทำเองที่มีความมุ่งมั่น พยายาม และอดทนจนวิทยานิพนธ์สำเร็จตามเป้าหมาย

ทศพล จันทร์ระอ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ฌ
รายการสัญลักษณ์.....	ฎ
ตัวห้อยและตัวยก.....	ฐ
บทที่ 1.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์.....	4
ขอบเขตการศึกษา.....	4
บทที่ 2.....	6
การถ่ายโอนความร้อน (HEAT TRANSFER).....	6
ครีบริบายความร้อน.....	11
การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบริบายตามแนวยาว	15
เอนโทรปี (ENTROPY).....	27
แผนภูมิไซโครเมตริก	30
การสำรวจเอกสารและงานวิจัยในอดีต.....	33
บทที่ 3.....	43
ครีบริบายตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปสี่เหลี่ยม	43
ครีบริบายตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปสามเหลี่ยม	48

ครีบบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปพาราโบลาโค้งเว้า	53
ครีบบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปพาราโบลาโค้งนูน	59
การเกิดเอนโทรปีของครีบบในกระบวนการพาความร้อนแบบบังคับ	63
บทที่ 4	66
การกระจายของอุณหภูมิ (TEMPERATURE PROFILE)	66
อัตราการถ่ายโอนความร้อน (HEAT TRANSFER RATE)	67
อัตราการเกิดเอนโทรปี (ENTROPY GENERATION RATE)	88
ตัวเลขการเกิดเอนโทรปี (ENTROPY GENERATION NUMBER)	96
แผนภูมิสำหรับออกแบบ (SELECTION CHART)	101
บทที่ 5	103
อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศ	103
อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ	103
อิทธิพลของความเร็วอากาศ	104
อิทธิพลของความยาวครีบบ	104
อิทธิพลของความหนาของฐานครีบบ	104
อิทธิพลของอุณหภูมิฐานครีบบ	105
บรรณานุกรม	106
ประวัติย่อของผู้วิจัย	111

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ครีบบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	1
ภาพที่ 2 ครีบบในแผงหม้อน้ำระบายความร้อนรถยนต์.....	2
ภาพที่ 3 ครีบบระบายความร้อนในเครื่องควบแน่นของเครื่องปรับอากาศ.....	2
ภาพที่ 4 ครีบบดูดซับในเครื่องระเหยของเครื่องปรับอากาศความชื้นภายใต้สภาวะผิวเปียก.....	3
ภาพที่ 5 การนำความร้อนผ่านของแข็ง.....	7
ภาพที่ 6 ตัวอย่างการพาความร้อนแบบบังคับ.....	8
ภาพที่ 7 ตัวอย่างการพาความร้อนแบบธรรมชาติ.....	9
ภาพที่ 8 ตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อน.....	10
ภาพที่ 9 ครีบบรูปร่างต่าง ๆ.....	11
ภาพที่ 10 ประสิทธิภาพของครีบบที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และครีบบहुคโปรไฟล์ ทรงกระบอก ที่มีผิวเรียบ.....	14
ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพของครีบบวงแหวนที่มีความหนาคงที่.....	14
ภาพที่ 12 ครีบบมีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	16
ภาพที่ 13 ครีบบที่มีโปรไฟล์รูปสามเหลี่ยม.....	19
ภาพที่ 14 ครีบบที่มีโปรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้า.....	22
ภาพที่ 15 ครีบบที่มีโปรไฟล์แบบพาราโบลาโค้งนูน.....	25
ภาพที่ 16 ภาพการทำงานของระบบผสม.....	27
ภาพที่ 17 ภาพประกอบการอธิบาย Entropy generation.....	29
ภาพที่ 18 แผนภูมิไซโครเมตริก.....	32
ภาพที่ 19 ภาพประกอบการอธิบายงานวิจัยของ.....	33
ภาพที่ 20 ภาพประกอบการอธิบายงานวิจัยของ.....	33

ภาพที่ 21 ครีบบวงแหวน	35
ภาพที่ 22 ครีบบตามแนวยาวและครีบนาม	35
ภาพที่ 23 ครีบบ โครงสร้างตัวที่	36
ภาพที่ 24 ครีบบพฐนตามแนวยาว โปรงไฟล้สี่เหลี่ยม.....	37
ภาพที่ 25 ครีบบพฐนโปรงไฟล้สี่เหลี่ยมคางหมู	37
ภาพที่ 26 ครีบบพฐนโปรงไฟล้พาราโบลาค้งเว้า.....	38
ภาพที่ 27 ครีบบพฐนโปรงไฟล้พาราโบลาค้งนูน.....	38
ภาพที่ 28 ครีบบพฐนแบบวงแหวน.....	39
ภาพที่ 29 ครีบบพฐนตามแนวยาว โปรงไฟล้เอ็กซ์โปเนนเซียลปลายบาง.....	39
ภาพที่ 30 ครีบบพฐนตามแนวยาว โปรงไฟล้เอ็กซ์โปเนนเซียลปลายหนา.....	40
ภาพที่ 31 ครีบบพฐนตามแนวยาว โปรงไฟล้สี่เหลี่ยม.....	40
ภาพที่ 32 ครีบบที่มีโปรงไฟล้รูปสี่เหลี่ยม	43
ภาพที่ 33 ครีบบที่มีโปรงไฟล้รูปสามเหลี่ยม	49
ภาพที่ 34 ครีบบที่มีโปรงไฟล้รูปพาราโบลาค้งเว้า	54
ภาพที่ 35 ครีบบที่มีโปรงไฟล้รูปพาราโบลาค้งนูน	59
ภาพที่ 36 แผนภาพแสดงการเกิดเอนโทรปีของการพาความร้อนของครีบบ	64
ภาพที่ 37 การกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีบบ	67
ภาพที่ 38 อธิพฐนของอุณหภูมิอากาศต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบในแต่ละตำแหน่ง ..	69
ภาพที่ 39 อธิพฐนของความชื้นสัมพัทธ์ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบในแต่ละตำแหน่ง	71
ภาพที่ 40 อธิพฐนของความเร็วอากาศต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบในแต่ละตำแหน่ง ..	73
ภาพที่ 41 อธิพฐนของความยาวครีบบต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบในแต่ละตำแหน่ง.....	75
ภาพที่ 42 อธิพฐนของความหนาฐานครีบบต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบในแต่ละตำแหน่ง	77

ภาพที่ 43 อิทธิพลของอุณหภูมิฐานครีบริบต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบริบในแต่ละตำแหน่ง	79
ภาพที่ 44 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม	81
ภาพที่ 45 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม	82
ภาพที่ 46 อิทธิพลของความเร็วของอากาศที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม	83
ภาพที่ 47 อิทธิพลของความยาวครีบริบที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม	85
ภาพที่ 48 อิทธิพลของความหนาของฐานครีบริบที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม	86
ภาพที่ 49 อิทธิพลของอุณหภูมิฐานครีบริบที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม	87
ภาพที่ 50 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี	88
ภาพที่ 51 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี	89
ภาพที่ 52 อิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี	91
ภาพที่ 53 อิทธิพลของความยาวครีบริบที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี	92
ภาพที่ 54 อิทธิพลของความหนาของฐานครีบริบที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี	93
ภาพที่ 55 อิทธิพลของอุณหภูมิฐานครีบริบที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี	95
ภาพที่ 56 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี	96
ภาพที่ 57 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี	97
ภาพที่ 58 อิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี	98
ภาพที่ 59 อิทธิพลของความยาวครีบริบที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี	99
ภาพที่ 60 อิทธิพลของความหนาของฐานครีบริบที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี	100
ภาพที่ 61 อิทธิพลของอุณหภูมิฐานครีบริบที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี	101
ภาพที่ 62 แผนภูมิสำหรับออกแบบในรูปแบบของตัวเลขเรย์โนลด์และความเร็วอากาศ	102
ภาพที่ 63 แผนภูมิสำหรับออกแบบในรูปแบบของอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม	102

รายการสัญลักษณ์

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

b คือ ความยาวของครีป (m)

b_w' คือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันเอนทัลปีของอากาศอิมิตัวเทียบกับอุณหภูมิ (J/kg/K)

C คือ ค่าคงที่ใด ๆ

C_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่พื้นผิว

c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (J/kg/K)

e คือ ค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์ที่เป็นฐานของลอการิทึมธรรมชาติ

F_D คือ แรงต้านอากาศ (N)

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2/K$)

I_n คือ Modified Bessel Function of the First Kind ออเดอร์ที่ n

i คือ เอนทัลปี (J/kg)

K_n คือ Modified Bessel Function of the Second Kind ออเดอร์ที่ n

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m/K$)

L คือ ความลึกของครีป (m)

Nu คือ ตัวเลขนัสเซิลต์

P_a คือ ความดันบรรยากาศ (Pa)

P_g คือ ความดันอิมิตัว (Pa)

p คือ ความยาวรอบรูปของครีป (m)

\dot{Q} คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (W)

\dot{Q}' คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อหนึ่งหน่วยความยาว (W/m)

Re คือ ตัวเลขเรย์โนลด์

RH, ϕ คือ ค่าชื้นสัมพัทธ์

S_{gen} คือ อัตราการเกิดเอนโทรปี (W/K)

T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

T_K คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

V คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)

x คือ ตำแหน่งใด ๆ

δ, t คือ ความหนาของครีป (m)

γ คือ ผลต่างของเอนทัลปีของอากาศอิมิตัวเทียบกับเอนทัลปีของอากาศชื้น (J/kg)

η คือ ประสิทธิภาพของครีป

θ คือ ผลต่างของอุณหภูมิตำแหน่งใด ๆ เทียบที่กับอุณหภูมิของอากาศชั้น (องศาเซลเซียส)

μ คือ ความหนืดพลวัต (Pa*s)

ν คือ ความหนืดจลน์ (m^2/s)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟานโบลท์มานน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2/K^4)$

ω คือ อัตราส่วนความชื้นต่อมวลอากาศแห้ง ($kg/kg_{dry\ air}$)

ตัวห้อยและตัวยก

a คือ อากาศ

b คือ ฐานครีป

c คือ หน้าตัด

cav คือ ครีปพาราโบลาโค้งเว้า

cond คือ การนำความร้อน

conv คือ การพาความร้อน

dp คือ จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

dry คือ ส่วนที่แห้ง

f คือ ครีป

g คือ จุดที่ไอน้ำอิ่มตัว

ideal คือ อุคตคติ

max คือ ค่าสูงสุด

R คือ แหล่งความร้อน (Reservoir)

rad คือ การแผ่รังสีความร้อน

rec คือ ครีปสี่เหลี่ยม

s คือ จุดอิ่มตัว

sf คือ ผิวสัมผัส

tri คือ ครีปสามเหลี่ยม

vex คือ ครีปพาราโบลาโค้งนูน

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ครีบริบมีบทบาทสำคัญที่เป็นตัวช่วยในการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อน ไม่ว่าจะเป็นการดูดซับความร้อนหรือระบายความร้อน โดยจะสามารถพบเห็นได้ทั้งตามที่พักอาศัยไปจนถึงกระทั่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การช่วยระบายความร้อนของครีบริบนั้นสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตามภาพที่ 1 ที่ในปัจจุบันมีความร้อนสูง เนื่องด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวล้ำไปมาก ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (ไพศาล นาสล, 2557) หรือแม้กระทั่งแผงหม้อน้ำระบายความร้อนและอินเตอร์คูลเลอร์ภายในรถยนต์ตามภาพที่ 2 ต่างก็ใช้ครีบริบในการช่วยเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อน รวมไปถึงเครื่องควบแน่นแบบท่อและครีบริบ (Fin and tube condenser) ในเครื่องปรับอากาศตามภาพที่ 3 ทั้งหมดที่กล่าวมานั้นจะเป็นการใช้ครีบริบในลักษณะเพิ่มพื้นที่ของการระบายความร้อนโดยที่ไม่มีการลดความชื้น หรือกล่าวคือเป็นการถ่ายโอนความร้อนของครีบริบแห่งเท่านั้น



ภาพที่ 1 ครีบริบระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

(Made-in-china, 2023)



ภาพที่ 2 ครีปในแผงหม้อน้ำระบายความร้อนรถยนต์
(Kilitaraiyon, 2023)



ภาพที่ 3 ครีประบายความร้อนในเครื่องควบแน่นของเครื่องปรับอากาศ
(Bluecold, 2023)

นอกจากจะใช้ครีปในการระบายความร้อนแล้วนั้น ครีปยังสามารถใช้ในการเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับความร้อน ยกตัวอย่างเครื่องระเหยในเครื่องปรับอากาศ (Evaporator) ในกระบวนการปรับอากาศนั้น จะไม่ใช่การลดอุณหภูมิภายในพื้นที่นั้น ๆ เพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมถึงการลดความชื้นภายในพื้นที่นั้น ๆ ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม (กานูพงษ์ ญาณเวทย์สกุล, 2555) กล่าวคือ เครื่องระเหยของเครื่องปรับอากาศนั้น จะทำหน้าที่ในการลดอุณหภูมิของพื้นที่นั้น ๆ หรือเป็นการดูดซับความร้อน รวมไปถึงช่วยลดความชื้นภายในพื้นที่นั้น ๆ หรือก็คือการทำให้ไอน้ำของอากาศ

ในพื้นที่นั้น ๆ มาควบแน่นที่ผิวของเครื่องระเหยที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เครื่องระเหยนั้นทำหน้าที่ดูดซับความร้อนภายใต้สภาวะลดความชื้น หรือก็คือชุดท่อและครีบบจะอยู่ในสภาวะเปียกตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ครีบบดูดซับในเครื่องระเหยของเครื่องปรับอากาศความร้อนภายใต้สภาวะผิวเปียก (Energyvanguard, 2023)

การที่ครีบบจะเปียกหรือไม่นั้น ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศโดยรอบครีบบและผิวครีบบ โดยถ้าผิวครีบบมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง จะทำให้ครีบบอยู่ในสภาวะผิวแห้ง เมื่อผิวครีบบมีอุณหภูมิต่ำกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง จะทำให้ครีบบอยู่ในสภาวะผิวเปียก แต่ถ้าหากว่าครีบบมีความยาวจนทำให้ครีบบมีทั้งส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง นั้นทำให้ครีบบอยู่ในสภาวะครีบบเปียกบางส่วน (Pirompugd and Wongwises, 2013b)

ในปัจจุบันมีผู้ทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับครีบบเปียกบางส่วนค่อนข้างน้อย เนื่องจากการคำนวณมีความซับซ้อน และมีงานวิจัยให้อ้างอิงค่อนข้างน้อย รวมถึงยังไม่มีการศึกษาวิจัยที่กล่าวถึงการเกิดเอนโทรปีในครีบบเปียกบางส่วน ซึ่งการเกิดเอนโทรปีสามารถช่วยในการออกแบบครีบบให้มีรูปร่างและขนาดที่เหมาะสมได้ โดยรูปร่างของครีบบที่เหมาะสมนั้นจะช่วยให้ถ่ายโอนความร้อนได้ดี และมีการเกิดเอนโทรปีน้อย (Poulikakos and Bejan, 1982) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยที่ทำให้มีอัตราการเกิดเอนโทรปีน้อยที่สุดและมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด ของครีบบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ภายใต้สภาวะเปียกบางส่วน

วัตถุประสงค์

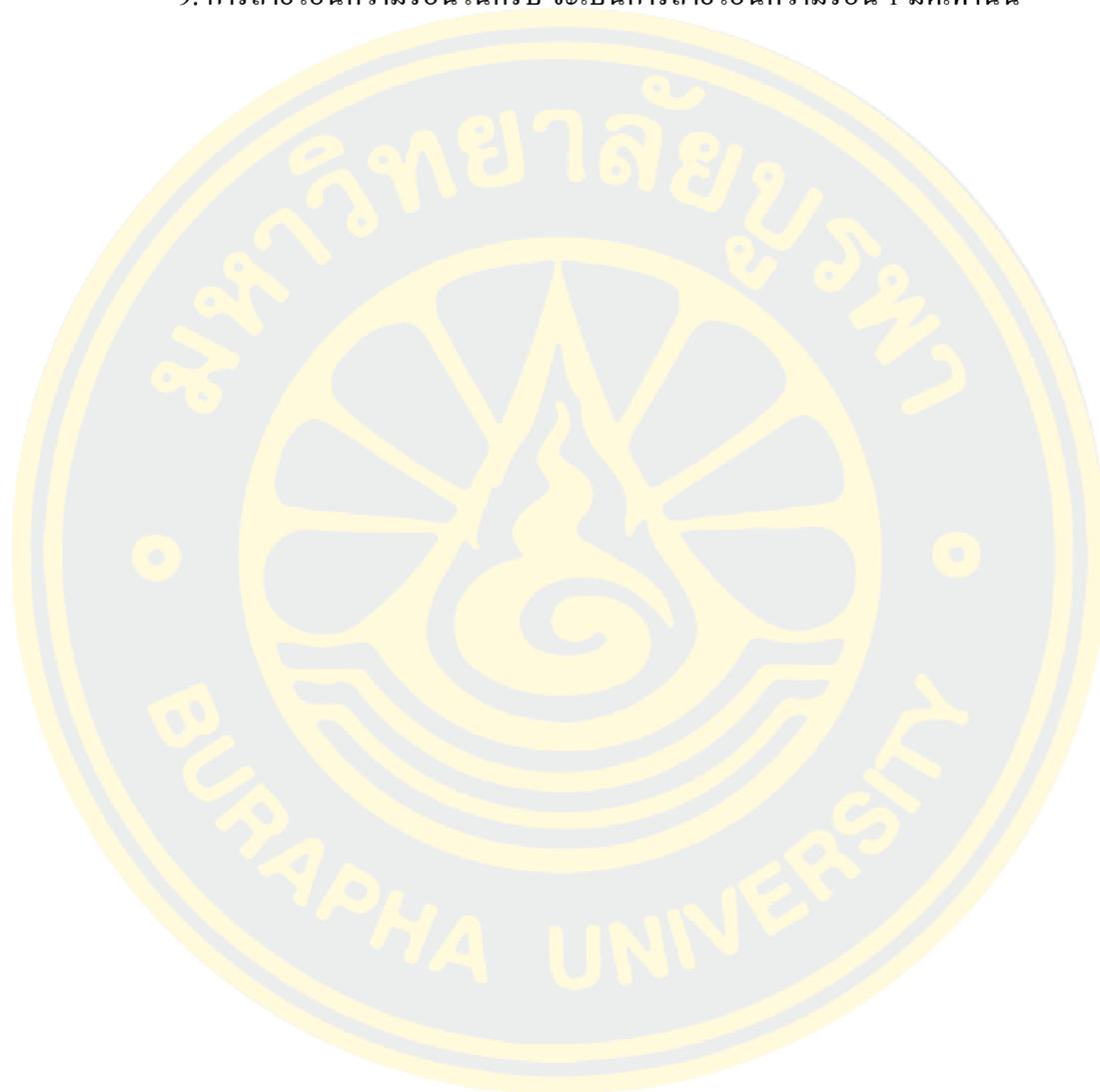
1. เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายคุณสมบัติตามกฎข้อที่ 1 และกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับการไหลของอากาศขึ้นผ่านครีบบตามแนวยาวทั้ง 4 ชนิด คือ ครีบบที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม โปรไฟล์สามเหลี่ยม โปรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้า และโปรไฟล์พาราโบลาโค้งนูน ที่อยู่ในสถานะผิวเปียกบางส่วน
2. เพื่อศึกษาโปรแกรมหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนสำหรับการไหลของอากาศขึ้นผ่านครีบบตามแนวยาวทั้ง 4 ชนิด ที่อยู่ในสถานะผิวเปียกบางส่วน
3. เพื่อศึกษาโปรแกรมหาอัตราการเกิดเอนโทรปี (Entropy generation rate) สำหรับการไหลของอากาศขึ้นผ่านครีบบตามแนวยาวทั้ง 4 ชนิด ที่อยู่ในสถานะผิวเปียกบางส่วน
4. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวครีบบ ความหนาของฐานครีบบ อุณหภูมิฐานครีบบ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วอากาศ ที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนและอัตราการเกิดเอนโทรปีสำหรับการไหลของอากาศขึ้นผ่านครีบบตามแนวยาวทั้ง 4 ชนิด ภายใต้สถานะผิวเปียกบางส่วน
5. เพื่อค้นหาที่เหมาะสมที่สุดระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนและอัตราการเกิดเอนโทรปีสำหรับการไหลของอากาศขึ้นผ่านครีบบตามแนวยาวทั้ง 4 ชนิด ภายใต้สถานะผิวเปียกบางส่วน

ขอบเขตการศึกษา

1. การศึกษากฎข้อที่ 1 และ 2 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับครีบบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ภายใต้สถานะผิวเปียกบางส่วน เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีเท่านั้น
2. ครีบบที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเป็นครีบบทองแดงและครีบบอลูมิเนียมเท่านั้น
3. ของไหลที่ไหลผ่านครีบบคืออากาศขึ้นเท่านั้น
4. การไหลของอากาศที่ไหลผ่านครีบบ เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) เท่านั้น
5. ในการศึกษาครั้งนี้ จะเป็นการศึกษาแบบจำลองสำหรับการพาความร้อนแบบบังคับในสถานะคงตัว (Steady-state condition) เท่านั้น
6. ครีบบตามแนวยาวในการศึกษาครั้งนี้ จะเป็นครีบบเดียวเท่านั้น
7. ตัวแปรที่เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ ตัวเลขการเกิดเอนโทรปี

8. ตัวแปรที่จะศึกษาในแบบจำลองนี้ จะมีความยาวของครีบ ความหนาของฐานครีบ อุณหภูมิฐานครีบ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วอากาศ โดยให้ความลึกของครีบคงที่

9. การถ่ายโอนความร้อนในครีบ จะเป็นการถ่ายโอนความร้อน 1 มิติเท่านั้น



บทที่ 2

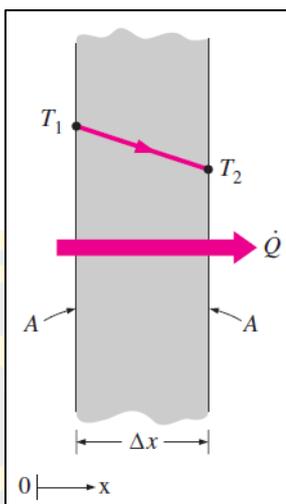
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การถ่ายโอนความร้อน (HEAT TRANSFER)

การถ่ายโอนความร้อน คือ การถ่ายโอนพลังงานจากแหล่งหนึ่งไปอีกแหล่งหนึ่ง โดยที่แต่ละแหล่งจะมีอุณหภูมิต่างกัน พลังงานจะถ่ายโอนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ และการถ่ายโอนความร้อนจะสิ้นสุดลงเมื่อทั้ง 2 แหล่งมีอุณหภูมิเท่ากัน (Cengel and Ghajar, 2015) การถ่ายโอนความร้อนมี 3 วิธี คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

1. การนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อนเกิดขึ้นกับตัวกลางที่ไม่เคลื่อนที่ สามารถเกิดได้ทั้งใน ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยที่ในของแข็งการนำความร้อนเกิดจากการสั่นของอนุภาคที่เรียงตัวกันอยู่อย่างหนาแน่น ในวัตถุที่เป็นของแข็งนั้นและส่งพลังงานอย่างต่อเนื่องกันไปโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลหรือสสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ในส่วนของของเหลว และก๊าซนั้น การนำความร้อนจะเกิดขึ้นโดยแพร่กระจาย และการชนกันของโมเลกุล ที่เคลื่อนที่แบบสุ่ม จะมีเพียงพลังงานเท่านั้นที่ถูก ถ่ายโอนไป ตัวอย่างการนำความร้อนในของแข็ง หากถือแท่งโลหะไว้ในมือด้านหนึ่ง แล้วนำอีกด้านหนึ่งไปจ่อที่ไฟหรือแหล่งกำเนิดความร้อน เมื่อเวลาผ่านไปแท่งโลหะทั้งแท่งจะมีอุณหภูมิเท่ากัน



ภาพที่ 5 การนำความร้อนผ่านของแข็ง
(Cengel and Ghajar, 2015)

วัสดุที่นำความร้อนได้ดีจะเรียกว่า "ตัวนำความร้อน (Conductor)" ได้แก่ โลหะ เช่น เงิน ทองแดง เหล็ก ส่วนวัสดุที่นำความร้อนได้ไม่ดีจะเรียกว่า "ฉนวนความร้อน (Insulators)" ได้แก่ อโลหะและแก๊ส เช่น ไม้ พลาสติก อากาศ ซึ่งความรู้ในเรื่องนี้เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ ได้ เช่น สร้างบ้านเพื่อป้องกันความร้อน โดยบ้านที่สร้างจากฉนวนใยหินหรือไฟเบอร์กลาส จะมีความเย็นภายในเพราะวัสดุดังกล่าวเป็นฉนวนความร้อน จึงมีการนำความร้อนจากนอกบ้านเข้าสู่ภายในบ้านได้น้อยกว่าวัสดุอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ฉนวนความร้อนไม่ได้หยุดการถ่ายโอนความร้อนอย่างสิ้นเชิง เพียงแต่ทำให้การถ่ายโอนความร้อนเป็นไปได้ช้าลงเท่านั้น

จากภาพที่ 5 สิ่งที่จะทำให้อัตราการนำความร้อนมากขึ้น จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ตัวกลางที่มีพื้นที่หน้าตัดในการนำความร้อนที่มาก ตัวกลางที่เป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดี ความหนาของตัวกลางที่น้อย และผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองฝั่งของตัวกลางที่ต่างกันมาก หรือสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\text{อัตราการนำความร้อน} \propto \frac{(\text{พื้นที่การนำความร้อน})(\text{ผลต่างของอุณหภูมิ})}{(\text{ความหนาของตัวกลาง})}$$

หรือสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

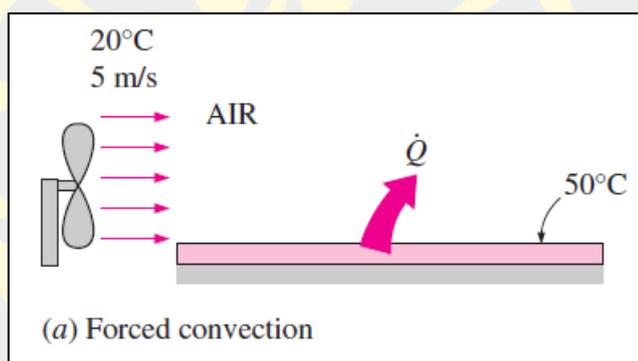
$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA_c \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA_c \frac{\Delta T}{\Delta x} = -kA_c \frac{dT}{dx} \quad (2-1)$$

2. การพาความร้อน (Heat Convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนพลังงานจากพื้นผิวของของแข็งที่ติดกับของไหลที่กำลังเคลื่อนที่และมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นของเหลวหรือก๊าซ โดยที่หากของไหลที่ติดอยู่กับพื้นผิวของของแข็งนั้น ไม่มีการเคลื่อนที่ การถ่ายโอนความร้อนดังกล่าวจะกลายเป็นการนำความร้อน โดยที่การพาความร้อนสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1 การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection)

เป็นการพาความร้อนที่บังคับให้ของไหลที่ติดอยู่กับพื้นผิวของของแข็งเคลื่อนที่ เช่น การใช้ปั๊มน้ำ การใช้พัดลม บังคับให้ของไหลนั้น ๆ เคลื่อนที่

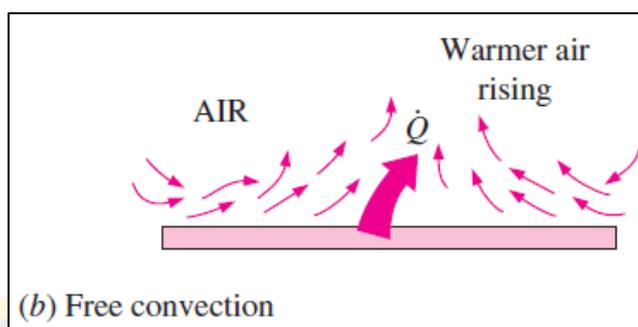


ภาพที่ 6 ตัวอย่างการพาความร้อนแบบบังคับ

(Cengel and Ghajar, 2015)

2.2 การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection หรือ Free Convection)

เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหล อันส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของไหลที่อยู่ที่แหล่งเดียวกัน โดยที่ของไหลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจะลอยขึ้นสูง และของไหลที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าก็จะจมลงมาแทนที่ ทำให้เกิดการไหลวนดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

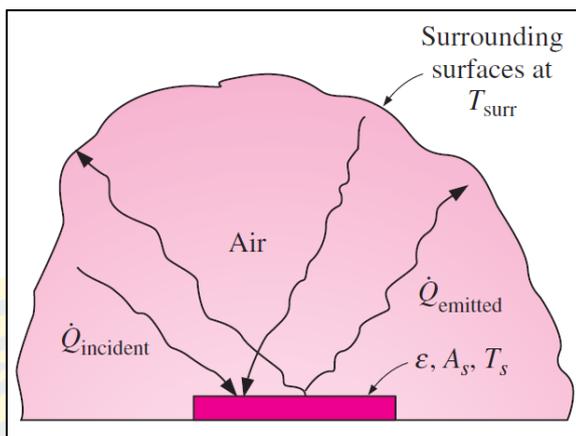
(Cengel and Ghajar, 2015)

อัตราการพาความร้อนทั้ง 2 ประเภทนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น คุณสมบัติของของไหลที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ความเร็วของของไหล พื้นผิวถ่ายโอนความร้อนที่ของไหลนั้นไหลผ่าน เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมานั้นจะถูกนำเสนอให้อยู่ในตัวแปรสัมประสิทธิ์การพาความร้อน แต่อย่างไรก็ดี การที่จะเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้นั้น จำเป็นที่จะต้องมียผลต่างของอุณหภูมิ จึงนำเสนอเป็นสมการอย่างง่ายด้วยกฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's cooling law) คือ

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_{\text{sf}}(T_{\text{sf}} - T_{\text{a}}) \quad (2-2)$$

3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนจะมีลักษณะการแผ่รังสีความร้อนในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในทุกทิศทางรอบจุดกำเนิดหรือวัตถุโดยไม่อาศัยตัวกลาง โดยการแผ่รังสีความร้อนจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อสิ่งนั้น ๆ มีอุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน วัตถุที่มีความร้อนมากกว่า จะแผ่รังสีได้มากกว่า เช่น ดวงอาทิตย์แผ่รังสีความร้อนได้มากกว่ากาแล็กซี่ในแก้ว ส่วนความสามารถในการดูดซับความร้อนก็จะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับลักษณะและสมบัติของวัตถุนั้น ๆ เช่น วัตถุสีเข้ม ค้าน จะสามารถแผ่และดูดซับความร้อนได้ดีกว่าวัตถุที่มีสีอ่อนและมันวาว หรือหากวัตถุสองชิ้นทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน ปริมาณเท่ากัน วัตถุที่มีลักษณะแบนและบาง จะสามารถแผ่รังสีความร้อนได้เร็วกว่าวัตถุที่อ้วนหนา การแผ่รังสีความร้อนสามารถดูตัวอย่างได้ตามภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อน
(Cengel and Ghajar, 2015)

จะคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนสูงสุดได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{\text{rad,max}} = \sigma A_{\text{sf}} T_{\text{sf}}^4 \quad (2-3)$$

จากสมการข้างต้นจะเป็นการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุในอุดมคติ หรือเรียกว่า “วัตถุดำ” ซึ่งวัตถุจริงชนิดอื่น ๆ ที่มีอุณหภูมิเท่ากับวัตถุดำ จะมีอัตราการแผ่รังสีความร้อนน้อยกว่าวัตถุดำเสมอ จึงกำหนดตัวแปรขึ้นมาเพื่อที่จะใช้สมการเดิมได้ คือ Emissivity (ϵ) โดยที่ ϵ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 และวัตถุดำจะมีค่า $\epsilon = 1$ เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_{\text{sf}} T_{\text{sf}}^4 \quad (2-4)$$

จากภาพที่ 8 จะเห็นว่าในความเป็นจริง วัตถุสามารถแผ่รังสีความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมได้หรือวัตถุอื่นที่อยู่รอบ ๆ ได้ และสามารถดูดซับการแผ่รังสีความร้อนจากสิ่งแวดล้อมหรือวัตถุอื่นได้ และจะหยุดลงเมื่อสองสิ่งนั้นมีอุณหภูมิเท่ากัน จึงเขียนเป็นสมการได้ใหม่ ดังนี้

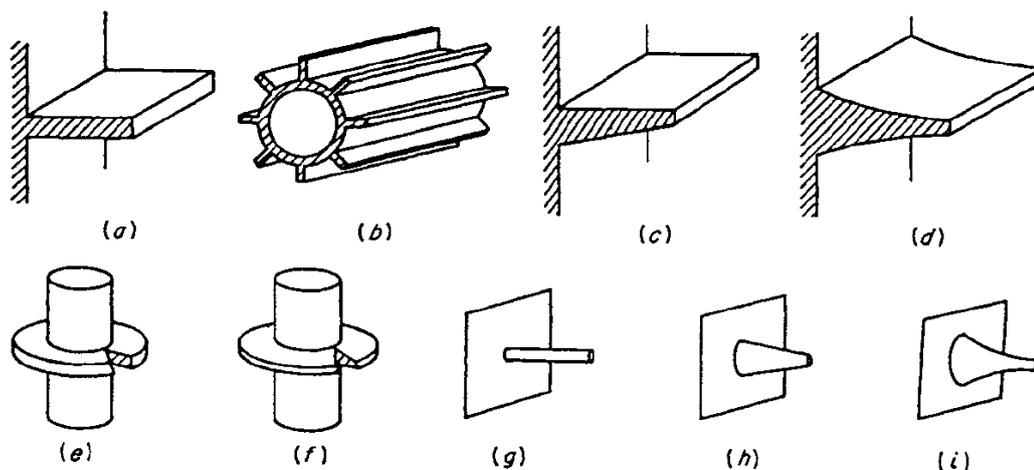
$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_{\text{sf}} (T_{\text{sf}}^4 - T_{\text{a}}^4) \quad (2-5)$$

ครีประบายความร้อน

จากสมการที่ 2-2 โดยปกติอุณหภูมิทั้ง 2 ค่า นั้น จะถูกกำหนดจากการออกแบบ ในการที่จะเพิ่มหรือลดอัตราการถ่ายโอนความร้อนได้นั้นจึงขึ้นอยู่กับ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนเท่านั้น ในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นจะเป็นการเพิ่มความเร็วหรือปริมาณของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งอาจได้ผลหรือไม่ก็ได้ผลก็ได้ ดังนั้นวิธีที่ได้ผลแน่นอนที่สุดคือการเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน โดยการต่อยึดติดพื้นที่ผิวส่วนต่อขยายต่อออกมาจากพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนเดิม ซึ่งพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนที่ต่อขยายออกมานั้นจะถูกเรียกว่า “ครีบ”

1. ลักษณะของครีบ

วัสดุที่ใช้ในการทำครีบส่วนใหญ่แล้วจะใช้วัสดุที่มีค่าสภาพการนำความร้อนสูง (High Thermal Conductivity) และมีลักษณะบาง จะช่วยให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนได้มากขึ้น โดยครีบจะแบ่งได้ตามลักษณะ ยกตัวอย่าง เช่น



ภาพที่ 9 ครีบรูปร่างต่าง ๆ

(Allan D Kraus et al., 2001)

จากภาพที่ 9 จะเป็นตัวอย่างรูปร่างทั่วไปของครีบอ้างอิงจากหนังสือ Extended Surface Heat Transfer ของ Allan D. Kraus et al., 2001 จะสามารถแบ่งครีบได้เป็น 3 ประเภทตามรูปร่างทั่วไป ดังนี้

1.1 ครีบตามแนวยาว (Longitudinal fin) ภาพ a จะเป็นครีบสี่เหลี่ยมตามแนวยาวที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ตามแนวแกนนอน ในส่วนของภาพ c และ d จะเป็นครีบตามแนวยาวที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ตามแนวแกนนอน โดยภาพ c จะมีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู หรือสามารถเป็นรูปร่างที่คล้ายกันได้ เช่น สามเหลี่ยม และภาพ d จะมีลักษณะของครีบเป็น โค้งพาราโบลา โดยจะสามารถเป็นได้ทั้งโค้งเว้าและโค้งนูน ครีบประเภทนี้จะสามารถติดตั้งได้ทั้งบนพื้นผิวเรียบ ดังภาพ a c และ d หรือบนผิวท่อดังตัวอย่างในภาพ b

1.2 ครีบวงแหวน (Radial fin) ภาพ e จะเป็นครีบวงแหวนที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ตามแนวรัศมี และภาพ f จะเป็นครีบวงแหวนที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ตามแนวรัศมี ครีบประเภทนี้จะนิยมติดตั้งกับผิวท่อ

1.3 ครีบหนาม หรือครีบหมุด (Spine) ภาพ g จะเป็นครีบหนามทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ตามแนวแกนนอน ในส่วนของภาพ h และ i จะเป็นครีบหนามที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ตามแนวแกนนอน โดยภาพ h จะเป็นรูปทรงกรวย และภาพ i จะมีลักษณะของครีบเป็น โค้งพาราโบลา โดยจะสามารถเป็นได้ทั้งโค้งเว้าและโค้งนูน ครีบประเภทนี้จะสามารถติดตั้งได้ทั้งบนพื้นผิวเรียบและผิวโค้ง

2. ประสิทธิภาพของครีบระบายความร้อน

ประสิทธิภาพของครีบ (fin efficiency, η_f) คือ เป็นการเปรียบเทียบการระบายความร้อนจริงจากครีบ กับอัตราการระบายความร้อนในอุดมคติจากครีบอันเดียวกัน การพาความร้อนจากครีบจะมีค่ามากที่สุดเมื่ออุณหภูมิทุกส่วนของครีบมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ฐาน หรือ $\theta_b = T_b - T_a$ แต่ในความจริงการนำความร้อนในครีบจะทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของครีบมีค่าต่างไปจากอุณหภูมิที่ฐานครีบ ดังนั้นคำจำกัดความของประสิทธิภาพของครีบจึงเป็น

$$\eta_f = \frac{Q_f}{Q_{ideal}} \quad (2-6)$$

อัตราการถ่ายโอนความร้อนในอุดมคติจะสามารถหาได้จากสมการการพาความร้อน ที่มีอุณหภูมิผิวครีบทุกส่วนเท่ากับอุณหภูมิที่ฐานครีบ หรือเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\dot{Q}_{ideal} = hA_{sf}(T_b - T_a) \quad (2-7)$$

เมื่อ A_{sf} คือ พื้นที่ผิวของครีบที่สัมผัสกับของไหลที่มีอุณหภูมิเป็น T_a ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากครีบก็จะมีค่าเป็น

$$\dot{Q}_f = \eta_f h A_{sf} (T_b - T_a) \quad (2-8)$$

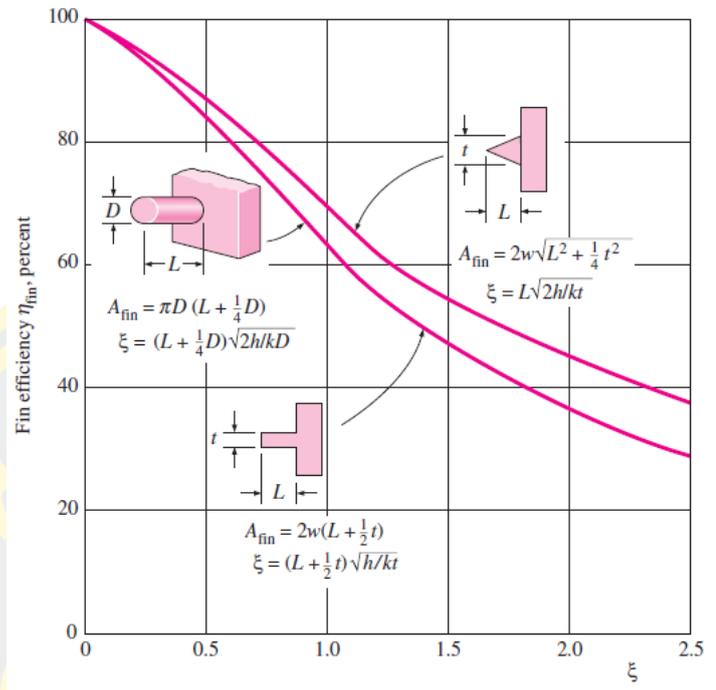
จากนั้นจะหาสมการสำหรับหาประสิทธิภาพของครีบริบ โดยจะยกตัวอย่างประสิทธิภาพของครีบริบระบายความร้อนที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ที่มีความยาวเป็นอนันต์ (สมการที่ 2-9) และครีบริบที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ที่มีฉนวนหุ้มที่ปลายครีบริบ (สมการที่ 2-10)

$$\eta_f = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{Q}_{ideal}} = \frac{\sqrt{hp k A_c} (T_b - T_a)}{hp L (T_b - T_a)} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{k A_c}{hp}} = \frac{1}{mL} \quad (2-9)$$

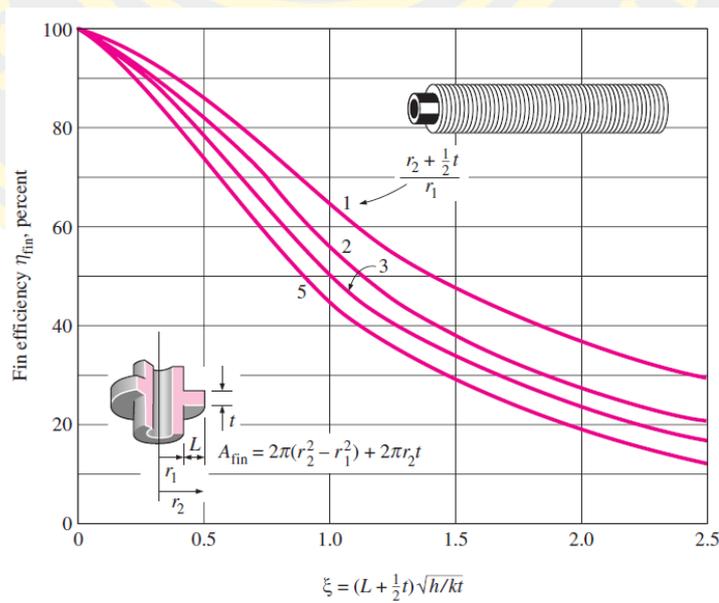
และ

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL)}{mL} \quad (2-10)$$

การหาประสิทธิภาพของครีบริบถูกพัฒนาเป็นกราฟความสัมพันธ์ที่จะนำเสนอต่อไปนี้ ตามภาพที่ 10 และภาพที่ 11 เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่าย และหลากหลายรูปร่างยิ่งขึ้น โดยภาพที่ 10 จะเป็นกราฟประสิทธิภาพของครีบริบที่มีผิวเรียบ และภาพที่ 11 จะเป็นประสิทธิภาพของครีบริบวงแหวนที่มีความหนาคงที่ และในทางปฏิบัติ ครีบริบที่มีความหนาคงที่นั้น เมื่อเทียบความหนาของครีบริบกับความยาวของครีบริบแล้วพบว่า ความหนาจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาว ดังนั้นจึงสามารถละเว้นการคำนวณที่พื้นผิวปลายครีบริบได้



ภาพที่ 10 ประสิทธิภาพของครีบบัที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และครีบบูคโปรไฟล์ทรงกระบอก ที่มีผิวเรียบ (Cengel and Ghajar, 2015)



ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพของครีบบวงแหวนที่มีความหนาคงที่ (Cengel and Ghajar, 2015)

นอกจากนี้ยังอาจใช้ประสิทธิภาพของครีบบ (fin effectiveness, ϵ_f) เป็นตัวแปรที่อธิบายถึง อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในครีบบได้อีกด้วย โดยประสิทธิภาพของครีบบ คือการ เปรียบเทียบของอัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบ ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนที่บริเวณฐาน ครีบบเมื่อปราศจากครีบบ หรือเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\epsilon_f = \frac{Q_f}{hA_{c,b}\theta_b} \quad (2-11)$$

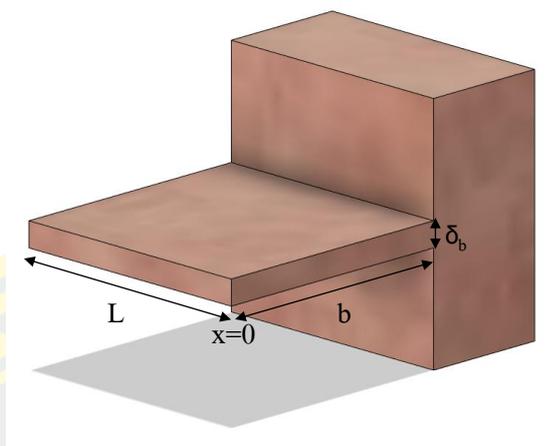
$A_{c,b}$ คือ พื้นที่ตัดขวางของฐานครีบบระบายความร้อน

การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบตามแนวยาว

การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบตามแนวยาว คือการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบที่มีพื้นที่ ด้านข้างรูปแบบหนึ่งที่มีความลึกคงที่เป็น Uniform shape ซึ่งจะแบ่งออกเป็นหลัก ๆ 4 ชนิด ตาม ลักษณะของพื้นที่ด้านข้างของครีบบ คือ พื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular profile) พื้นที่ ด้านข้างเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular profile) พื้นที่ด้านข้างเป็นแบบ โค้งเว้า (Concave parabolic profile) และพื้นที่ด้านข้างเป็นแบบ โค้งนูน (Convex parabolic profile) โดยจะมีสมการเชิงอนุพันธ์ ผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ สมการการถ่ายโอนความร้อน และประสิทธิภาพของครีบบแต่ละ ครีบบ ดังนี้

1. การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Longitudinal fins of rectangular profile)

จะเป็นครีบบระบายความร้อนที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม เป็นการถ่ายโอนความร้อน ผ่านครีบบที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ตั้งแต่ฐานครีบบจนถึงปลายครีบบตามภาพที่ 12 โดยสามารถเขียนเป็น สมการต่าง ๆ ได้ ดังนี้



ภาพที่ 12 ครีบบมีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยม

การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจะมีสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ (Governing Differential Equation) คือ

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{2h}{k_f\delta_b}\theta = 0 \quad (2-12)$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 2-12 คือ

$$\theta = C_1e^{mx} + C_2e^{-mx} \quad (2-13)$$

ค่า m หาได้ดังนี้

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_f\delta_b}} \quad (2-14)$$

ในการหาค่า C_1 และ C_2 จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = 0, \quad \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

และ

$$x = b, \theta_b = T_b - T_a$$

ที่ $x = 0$ จะได้

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0 = C_1 m e^{mx} - C_2 m e^{-mx}$$

$$0 = C_1 - C_2$$

$$C_1 = C_2 = C$$

ที่ $x = b$ จะได้

$$\theta = C(e^{mb} + e^{-mb})$$

$$C = \frac{\theta}{(e^{mb} + e^{-mb})}$$

จะได้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ คือ

$$\theta(x) = \frac{\theta_b \cosh mx}{\cosh mb} \quad (2-15)$$

ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนหาได้จาก

$$\dot{Q}_b = k_f A_c \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=b}$$

พื้นที่หน้าตัดของครีบบาได้จาก $A_c = \delta_b L$ และแทนค่าอนุพันธ์ของสมการที่ 2-15 ที่ $x = b$ จะได้

$$\dot{Q}_{b,rec} = \frac{k_f \delta_b L m \theta_b \sinh mb}{\cosh mb} \quad (2-16)$$

หรือ

$$\dot{Q}_{b,rec} = k_f \delta_b L m \theta_b \tanh mb \quad (2-17)$$

ค่าประสิทธิภาพของครีป (fin efficiency) หาได้จาก

$$\eta_f = \frac{\dot{Q}_b}{\dot{Q}_{ideal}}$$

จาก $\dot{Q}_{ideal} = hp\theta_b$ และ $p=2(L + \delta_b)$ แต่ L มากกว่า δ มาก ๆ ดังนั้น $\dot{Q}_{ideal} = 2hL\theta_b$

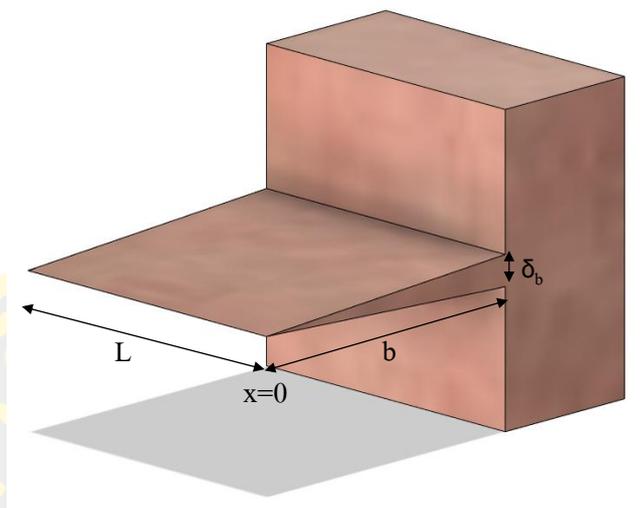
$$\eta_{f,rec} = \frac{k_f\delta_b L m \theta_b \tanh mb}{2hL\theta_b}$$

จาก $m^2 = \frac{2h}{k_f\delta_b}$ จะได้

$$\eta_{f,rec} = \frac{\tanh mb}{mb} \quad (2-18)$$

2. การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีปที่มีโปรไฟล์รูปสามเหลี่ยม (Longitudinal fins of triangular profile)

จะเป็นครีประบายความร้อนที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปสามเหลี่ยม เป็นการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีปที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ โดยที่ฐานครีปจะมีพื้นที่หน้าตัดมาก และค่อย ๆ ลดลงอย่างคงที่จนถึงปลายครีปตามภาพที่ 13 โดยสามารถเขียนเป็นสมการต่าง ๆ ได้ ดังนี้



ภาพที่ 13 ครีบที่มีโปรไฟล์รูปสามเหลี่ยม

การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบที่มีโปรไฟล์รูปสามเหลี่ยมจะมีสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ (Governing Differential Equations) คือ

$$x \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d\theta}{dx} - m^2 b \theta = 0 \quad (2-19)$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 2-19 คือ

$$\theta(x) = C_1 I_0(2m\sqrt{bx}) + C_2 K_0(2m\sqrt{bx}) \quad (2-20)$$

ในการหาค่า C_1 และ C_2 จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = 0, \quad \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

และ

$$x = b, \quad \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=b} = 0$$

และ

$$x = b, \theta_b = T_b - T_a$$

ที่ $x = 0$ จะได้

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0 = C_1 m \sqrt{\frac{b}{x}} I_1(2m\sqrt{bx}) - C_2 m \sqrt{\frac{b}{x}} K_1(2m\sqrt{bx})$$

$$0 = C_1 I_1(2m\sqrt{bx}) - C_2 K_1(2m\sqrt{bx})$$

$$0 = C_1 I_1(0) - C_2 K_1(0)$$

ค่า C_2 จะมีค่าเป็น 0 เนื่องจากค่า K_1 จะมีค่าอนันต์ที่ $x = 0$ จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\theta(x) = C_1 I_0(2m\sqrt{bx})$$

ที่ $x = b$ จะได้

$$\theta(b) = C_1 I_0(2mb)$$

$$C_1 = \frac{\theta(b)}{I_0(2mb)}$$

จะได้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ คือ

$$\theta(x) = \frac{\theta_b I_0(2m\sqrt{bx})}{I_0(2mb)} \quad (2-21)$$

หาอัตราการถ่ายโอนความร้อนหาได้จาก

$$\dot{Q}_b = k_f A_c \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=b}$$

พื้นที่หน้าตัดของครีบบาได้จาก $A_c = \frac{\delta_b x L}{b}$ และแทนค่าอนุพันธ์ของสมการที่ 2-21 ที่ $x = b$ จะได้

$$\dot{Q}_{b,tri} = \frac{2hL\theta_b I_1(2mb)}{mI_0(2mb)} \quad (2-22)$$

หาค่าประสิทธิภาพของครีบ (fin efficiency) ได้จาก

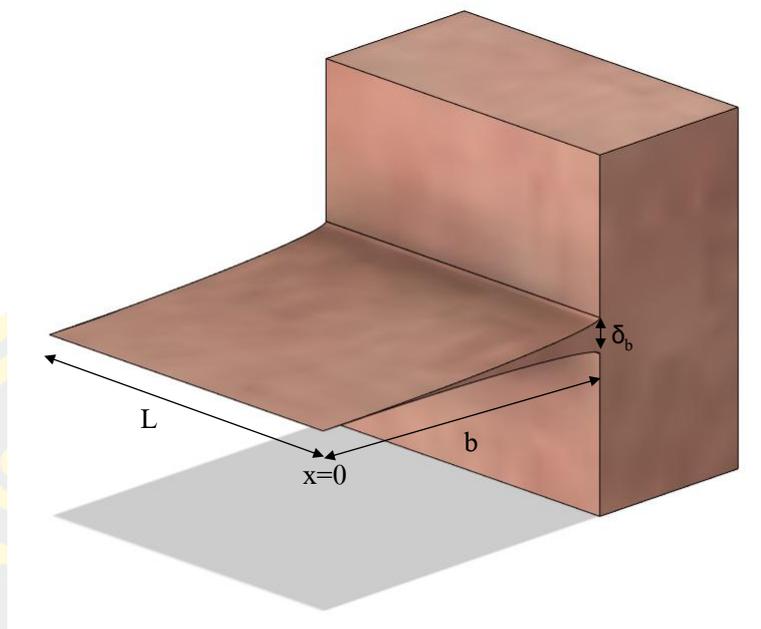
$$\eta_{f,tri} = \frac{\dot{Q}_{b,tri}}{\dot{Q}_{ideal}} = \frac{2hL\theta_b [I_1(2mb)/mI_0(2mb)]}{2hbL\theta_b}$$

หรือ

$$\eta_{f,tri} = \frac{I_1(2mb)}{(mb)I_0(2mb)} \quad (2-23)$$

3. การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบที่มีโปรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้า (Longitudinal fins of concave parabolic profile)

จะเป็นครีบบระบายความร้อนที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปพาราโบลาโค้งเว้า เป็นการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบบที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ โดยที่ฐานครีบบจะมีพื้นที่หน้าตัดมาก และลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงปลายครีบบตามภาพที่ 14 โดยสามารถเขียนเป็นสมการต่างๆ ได้ ดังนี้



ภาพที่ 14 ครีบริที่มีโปรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้า

การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีบริที่มีโปรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้าจะมีสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ (Governing Differential Equations) คือ

$$x^2 \frac{d^2\theta}{dx^2} + 2x \frac{d\theta}{dx} - m^2 b^2 \theta = 0 \quad (2-24)$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 2-24 คือ

$$\theta(x) = C_1 x^\alpha + C_2 x^\beta \quad (2-25)$$

โดยที่

$$\alpha, \beta = -\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} (1 + 4m^2 b^2)^{1/2} \quad (2-26)$$

ในการหาค่า C_1 และ C_2 จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = 0, \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

และ

$$x = b, \theta_b = T_b - T_a$$

ที่ $x = 0$ จะได้

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0 = C_1 \alpha x^{\alpha-1} + C_2 \beta x^{\beta-1}$$

จากสมการนี้ จะพบว่า C_2 จะต้องมีค่าเท่ากับ 0 เทอมที่ 2 ด้านขวามือของสมการจึงจะมีค่าเท่ากับ 0

$$\theta(x) = C_1 \alpha x^{\alpha-1}$$

ที่ $x = b$ จะได้

$$\theta(b) = C_1 b^\alpha$$

$$C_1 = \frac{\theta(b)}{b^\alpha}$$

จะได้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ คือ

$$\theta(x) = \theta_b \left(\frac{x}{b} \right)^\alpha \quad (2-27)$$

หาอัตราการถ่ายโอนความร้อนหาได้จาก

$$\dot{Q}_{b,cav} = k_f A_c \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=b}$$

พื้นที่หน้าตัดของครีปหาได้จาก $A_c = \frac{\delta_b x^2 L}{b^2}$ และแทนค่าอนุพันธ์ของสมการที่ 2-27 ที่ $x = b$ จะได้

$$\dot{Q}_{b,cav} = \frac{k_f \delta_b L \theta_b \alpha}{b}$$

หรือ

$$\dot{Q}_{b,cav} = \frac{k_f \delta_b L \theta_b}{2b} \left[-1 + \sqrt{1 + (2mb)^2} \right] \quad (2-28)$$

หาค่าประสิทธิภาพของครีป (fin efficiency) ได้จาก

$$\eta_{f,cav} = \frac{\dot{Q}_{b,cav}}{\dot{Q}_{ideal}} = \frac{k_f \delta_b L \theta_b \left[-1 + \sqrt{1 + (2mb)^2} \right]}{(2b)(2hbL\theta_b)}$$

จาก $m^2 = \frac{2h}{k_f \delta_b}$ และคูณด้วย $-1 - \sqrt{1 + (2mb)^2}$ ทั้งเศษและส่วน จะได้

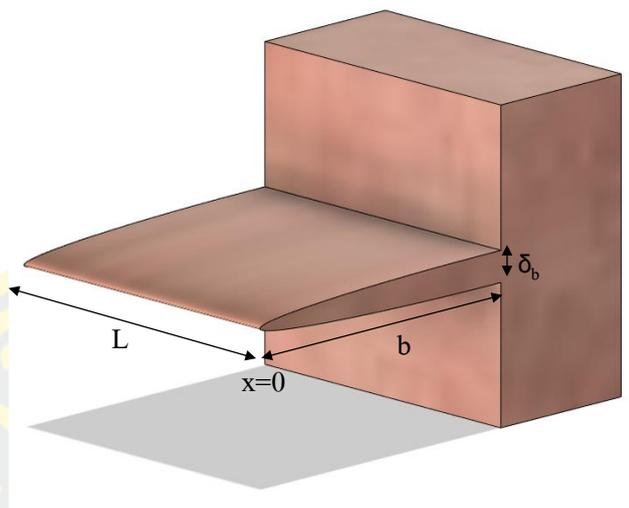
$$\eta_{f,cav} = \frac{-1 + \sqrt{1 + (2mb)^2}}{2(mb)^2} \frac{-1 - \sqrt{1 + (2mb)^2}}{-1 - \sqrt{1 + (2mb)^2}}$$

ดังนั้น

$$\eta_{f,cav} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + (2mb)^2}} \quad (2-29)$$

4. การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีปที่มีโปรไฟล์แบบพาราโบลาโค้งนูน (Longitudinal fins of Convex parabolic profile)

จะเป็นครีประบายความร้อนที่มีพื้นที่ด้านข้างเป็นรูปพาราโบลาโค้งนูน เป็นการถ่ายโอนความร้อนผ่านครีปที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ โดยที่ฐานครีปจะมีพื้นที่หน้าตัดมาก และค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ จนถึงปลายครีปตามภาพที่ 15 โดยสามารถเขียนเป็นสมการต่าง ๆ ได้ ดังนี้



ภาพที่ 15 ครีปที่มีโปรไฟล์แบบพาราโบลาโค้งงอ

การถ่ายโอนความร้อนผ่านครีปที่มีโปรไฟล์แบบโค้งงอจะมีสมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ (Governing Differential Equations) คือ

$$\sqrt{x} \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{1}{2\sqrt{x}} \frac{d\theta}{dx} - m^2\sqrt{b}\theta = 0 \quad (2-30)$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 2-30 คือ

$$\theta(u) = \Omega u^{1/3} [C_1 I_{1/3}(u) + C_2 I_{-1/3}(u)] \quad (2-31)$$

โดยที่

$$u = \frac{4}{3} mb^{1/4} x^{3/4} \quad (2-32)$$

และ

$$\Omega = \left(\frac{3}{4mb^{1/4}} \right)^{1/3} \quad (2-33)$$

ในการหาค่า C_1 และ C_2 จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 3 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = 0, \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

$$x = b, \theta_b = T_b - T_a$$

และ

$$x(u = u_b = \frac{4}{3}mb), \left. \frac{d\theta}{du} \right|_{u=0} = 0$$

คุณ $u^{1/3}$ ทั้ง $I_{1/3}(u)$ และ $I_{-1/3}(u)$ จะได้

$$\frac{d}{du} [u^{1/3} I_{1/3}(u)] \quad (2-34)$$

จากสมการที่ 2-34 จะมีค่าเข้าใกล้ค่าอนันต์ที่ $x=0$ จะทำให้ค่า $C_1 = 0$ และหาค่า C_2 จาก 2-33 จะกลายเป็นสมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ นั่นคือ

$$\theta(x) = \theta_b \left(\frac{x}{b} \right)^{1/4} \frac{I_{-1/3} \left(\frac{4}{3}mb^{1/4}x^{3/4} \right)}{I_{-1/3} \left(\frac{4}{3}mb \right)} \quad (2-35)$$

ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนหาได้จาก

$$\dot{Q}_{b,vex} = k_f A_c \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=b}$$

พื้นที่หน้าตัดของครีบหาได้จาก $A_c = \delta_b L \sqrt{\frac{x}{b}}$ และแทนค่าอนุพันธ์ของสมการที่ 2-35 ที่ $x = b$ จะ

$$\dot{Q}_{b,vex} = k_f \delta_b L \theta_b \frac{I_{2/3} \left(\frac{4}{3}mb \right)}{I_{-1/3} \left(\frac{4}{3}mb \right)} \quad (2-36)$$

หาค่าประสิทธิภาพของครีป (fin efficiency) ได้จาก

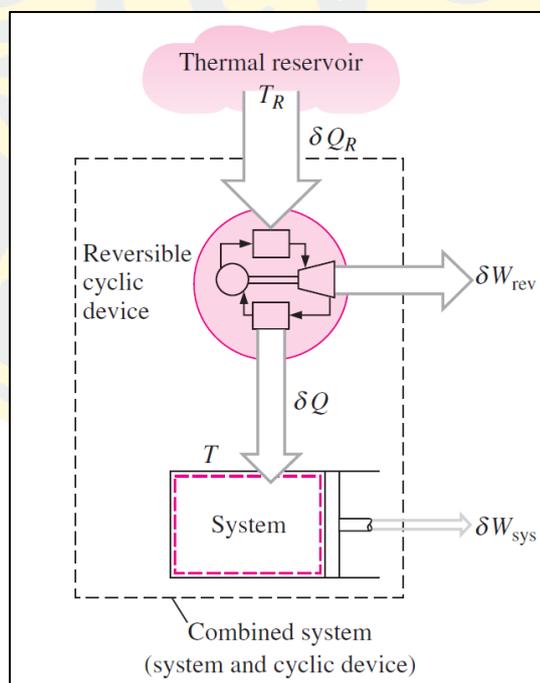
$$\eta_{f,vex} = \frac{\dot{Q}_{b,vex}}{\dot{Q}_{ideal}} = \frac{k\delta_b L \theta_b \left[I_{2/3} \left(\frac{4}{3} mb \right) \right]}{(2hbL\theta_b) \left[I_{-1/3} \left(\frac{4}{3} mb \right) \right]}$$

หรือ

$$\eta_{f,vex} = \frac{1}{mb} \frac{I_{2/3} \left(\frac{4}{3} mb \right)}{I_{-1/3} \left(\frac{4}{3} mb \right)} \quad (2-37)$$

เอนโทรปี (ENTROPY)

เอนโทรปี เป็นคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่ถูกค้นพบโดย Clausius ในปีค.ศ. 1865 ใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัว S มีหน่วยเป็น kJ/K (กิโลจูลต่อเคลวิน) หรือ s มีหน่วยเป็น kJ/(kg*K) (กิโลจูลต่อกิโลกรัมเคลวิน) โดยสามารถใช้กฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์อธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 16 ภาพการทำงานของระบบผสม

(Cengel et al., 2011)

จาก reversible cyclic device จะได้สมการ

$$\frac{\delta Q_R}{T_R} = \frac{\delta Q}{T} \quad (2-38)$$

หรือจัดรูปใหม่ จะได้

$$\delta Q_R = T_R \frac{\delta Q}{T} \quad (2-39)$$

จากระบบผสม กำหนดให้

$$\delta W_C = \delta W_{rev} + \delta W_{sys} \quad (2-40)$$

ทำการสมดุลพลังงานทั้งระบบผสม จะได้

$$\delta Q_R - \delta W_C = dE_C \quad (2-41)$$

เนื่องจากระบบทำงานเป็นวัฏจักร ทำให้ $dE_C = 0$ แทนค่า δW_C จากสมการที่ 2-40 และ δQ_R จากสมการ 2-39 แทนลงในสมการที่ 2-41 จะได้

$$W_C = T_R \oint \frac{\delta Q}{T} \quad (2-42)$$

จากกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ (Kelvin-Planck statement) กล่าวไว้ว่าไม่มีระบบใดที่จะสามารถผลิตงานได้หากวัฏจักรการทำงานนั้นแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งความร้อนแหล่งเดียว หรือก็คือ W_C จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ จึงเขียนได้เป็น

$$W_C = T_R \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (2-43)$$

จากภาพที่ 16 T_R คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของแหล่งความร้อน ซึ่งจะมีค่าเป็นบวกเสมอ ดังนั้นการที่จะทำให้สมการที่ 2-43 น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ได้นั้นจึงขึ้นอยู่กับ $\oint \frac{\delta Q}{T}$ จึงเขียนได้ว่า

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (2-44)$$

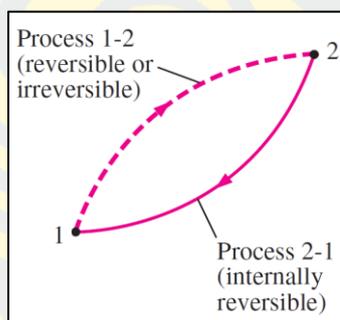
จะเรียกสมการนี้ว่า Clausius inequality โดยที่ $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$ จะเป็น reversible process หรือ internally reversible process ต่อมาจึงกำหนดให้

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int,rev}} \quad (2-45)$$

หรือ

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int,rev}} \quad (2-46)$$

เอนโทรปีเจเนอเรชัน (Entropy generation)



ภาพที่ 17 ภาพประกอบการอธิบาย Entropy generation

(Cengel et al., 2011)

เมื่อนำภาพที่ 17 มาเขียนโดยใช้ Clausius inequality จะเขียนได้ว่า

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{int,rev}} \leq 0 \quad (2-47)$$

นำสมการที่ 2-47 แทนในสมการที่ 2-44 จะได้

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_1 - S_2 \leq 0 \quad (2-48)$$

หรือ

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (2-49)$$

กำหนดให้ $S_2 - S_1 = \Delta S$ โดยถ้า $\Delta S > \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$ จะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ ถ้า $\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$ จะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ จาก $\Delta S > \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$ หากต้องให้ทั้งสองข้างของสมการเท่ากัน จำเป็นที่จะต้องเพิ่มบางอย่างเข้าไปในฝั่งที่น้อยกว่า โดยสิ่งที่เพิ่มเข้าไปนั้นจะเรียกเอนโทรปีเอนเนอเรชั่น (Entropy generation) ใช้สัญลักษณ์เป็น S_{gen} จะทำให้สามารถเขียนเป็นสมการของกระบวนการทั่วไปได้ดังนี้

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen} \quad (2-50)$$

เอนโทรปีเอนเนอเรชั่นจะบ่งบอกถึง irreversibility หรือความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ โดยหากยิ่ง S_{gen} มาก ก็จะทำให้ห่างจากความเป็นกระบวนการย้อนกลับได้มาก หรือสามารถสรุปได้ดังนี้

$S_{gen} > 0$ เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ (กระบวนการจริง)

$S_{gen} = 0$ เป็นกระบวนการย้อนกลับได้

$S_{gen} < 0$ เป็นกระบวนการที่เป็นไปไม่ได้

แผนภูมิไซโครเมตริก

แผนภูมิไซโครเมตริกเป็นแผนภูมิที่แสดงคุณสมบัติของอากาศชื้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สภาวะและกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับอากาศชื้น โดยการปรับจุดอ้างอิงคุณสมบัติของอากาศแห้งและไอน้ำอิ่มตัวในอากาศให้ตรงกัน โดยกำหนดให้เอนทัลปีของอากาศแห้งเท่ากับ

$$i_{da} = c_{p,a}T = 1.005T \quad (2-51)$$

อุณหภูมิ (T) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส และเมื่อนำเอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัวจากตารางคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์มาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ จะได้ดังนี้

$$i_g = 2501.3 + 1.82T \quad (2-52)$$

อากาศชื้นในความเป็นจริงนั้นมีทั้งมวลของอากาศแห้งและไอน้ำ ซึ่งไอน้ำเป็นเพียงส่วนหนึ่งของอากาศชื้น จึงต้องกำหนดสัดส่วนของมวลไอน้ำต่อมวลอากาศแห้ง (ω) เพื่อเป็นตัวคูณให้กับเอนทัลปีของไอน้ำในอากาศ จึงเขียนได้ดังนี้

$$i = 1.005T + \omega(2501.3 + 1.82T) \quad (2-53)$$

โดยที่ ω สัดส่วนของมวลไอน้ำต่อมวลอากาศแห้งจะอาศัยสมการของแก๊สในอุดมคติ เช่นเดียวกันกับสัดส่วนของมวลไอน้ำในอากาศต่อมวลไอน้ำอิ่มตัว (ϕ) จะได้ความสัมพันธ์

$$\phi = \frac{101.325\omega}{(0.622+\omega)P_g} \quad (2-54)$$

และ

$$\omega = \frac{0.622\phi P_g}{101.325 - \phi P_g} \quad (2-55)$$

จากสมการของแก๊สในอุดมคติ จะสามารถหาปริมาตรจำเพาะของอากาศชื้นได้จาก

$$v = \frac{0.287T_K(1+1.608\omega)}{101.325} \quad (2-56)$$

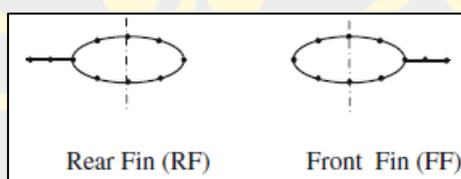
จากสมการที่ 2-53 เมื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 1 จะได้

$$i_s = 1.005T + 0.622(2501.3 + 1.82T) \quad (2-57)$$

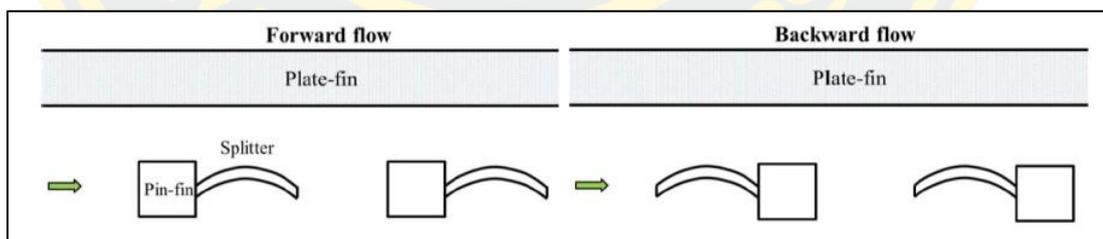
จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งและสัดส่วนความชื้นจะทำให้ได้แผนภูมิไซโครเมตริก โดยคุณสมบัติของอากาศชื้นที่แสดงในแผนภูมิไซโครเมตริกจะมี อุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียก เอนทัลปี ปริมาตรจำเพาะ ความชื้นสัมพัทธ์ การจะใช้แผนภูมิไซโครเมตริกในการหาค่าคุณสมบัติของอากาศชื้นได้นั้น จำเป็นที่จะต้องรู้คุณสมบัติอย่าง 2 ค่า เพื่อหาค่าอื่น ๆ (ASHRAE, 2001)

การสำรวจเอกสารและงานวิจัยในอดีต

ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน มีงานวิจัยมากมายที่ช่วยในการออกแบบครีบบังที่สามารถถ่ายโอนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสม โดยส่วนมากจะพิจารณาจากอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากครีบบัง และใช้เอนโทรปีเอนเจอร์ชันเป็นพารามิเตอร์ที่ช่วยในการพิจารณาลักษณะของครีบบังที่เหมาะสมอีกตัวหนึ่ง งานวิจัยในอดีตของ Poulikakos and Bejan, 1982 ได้ศึกษาลักษณะของครีบบังในกระบวนการพาความร้อนแบบบังคับของครีบบังนาม ครีบบังแผ่นสี่เหลี่ยม โปรไฟล์สี่เหลี่ยม ครีบบังแผ่นสี่เหลี่ยม โปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมู และครีบบังสามเหลี่ยม โปรไฟล์สี่เหลี่ยม ที่จะทำให้เกิดเอนโทรปีเอนเจอร์ชันที่น้อยที่สุด ต่อมางานวิจัยของ Ibrahim and Moawed, 2009 และ Shahsavar et al., 2021 ที่ศึกษาเกี่ยวกับเอนโทรปีเอนเจอร์ชันของไหลที่ไหลผ่านครีบบัง โดยที่จะติดครีบบังเข้าไปที่ด้านหน้า และด้านหลัง



ภาพที่ 19 ภาพประกอบการอธิบายงานวิจัยของ (Ibrahiem and Moawed, 2009)

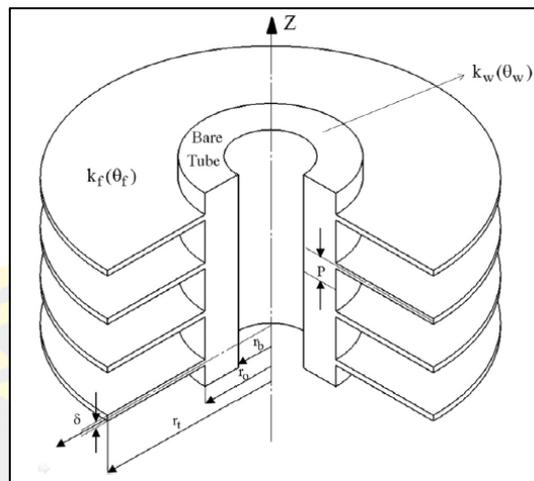


ภาพที่ 20 ภาพประกอบการอธิบายงานวิจัยของ (Shahsavar et al., 2021)

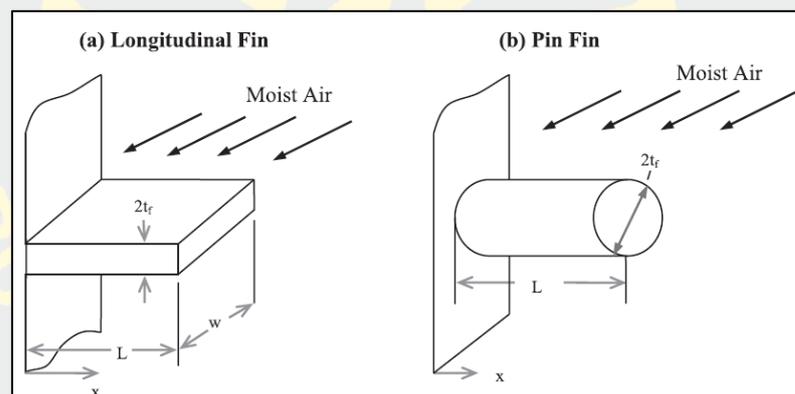
ทั้ง 2 งานวิจัยจะศึกษาเอนโทรปีเอนเจอร์ชันทั้งที่เกิดจากแรงเสียดทาน และเอนโทรปีเอนเจอร์ชันที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อน งานวิจัยของ Ibrahim and Moawed จากเป็นครีบบังตามแนวยาว ส่วนของ Shahsavar et al. จะใช้เป็นครีบบังนาม ผลที่ได้จากงานวิจัยมีความสอดคล้องกับ พบว่าตำแหน่งของการติดครีบบังจะมีผลทำให้มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเปลี่ยนไป และตำแหน่งที่ติดครีบบัง

ทำให้มีเอนโทรปีเอนเนอร์จี้ไม่เท่ากัน เป็นผลมาจาก Renold number และ Nusselt number ที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกมากมาย ที่ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเอนโทรปีที่เกิดจากครีบบนลักษณะต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นครีบที่มีการบังคับให้ของไหลไหลผ่านจนทำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับ หรือครีบที่ไม่มี การบังคับให้ของไหลไหลผ่านทำให้เกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Khatami and Rahbar, 2019) โดยที่ของไหลหรือสารที่ครีบถ่ายโอนความร้อนไปหาอาจเป็นของไหลที่เป็นสถานะเดียวกัน (Single phase) ของไหลที่มีสองสถานะ (Two phase mixture) (Zhou and Wang, 2023) หรือแม้กระทั่งสารเปลี่ยนสถานะ (Phase change material หรือ PCM) (Abdeldjalil et al., 2023) (Tavakoli et al., 2023)

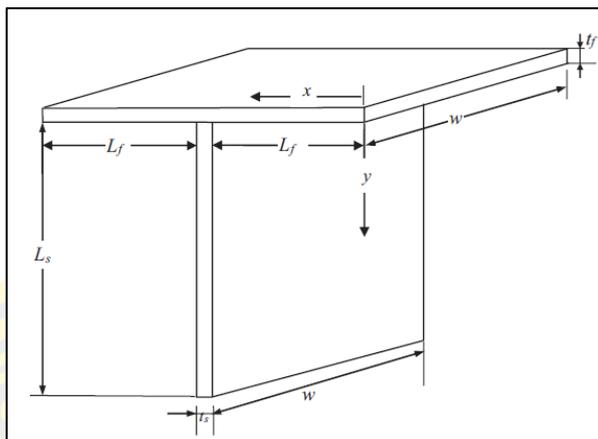
ครีบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการช่วยเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนความร้อน โดยที่ครีบจะใช้ได้ทั้งในการช่วยระบายความร้อนออกไปหรือรับความร้อนเข้ามา การที่จะสามารถใช้ครีบเพื่อขยายพื้นที่ในการรับความร้อนเข้ามานั้น อุณหภูมิของครีบจะต้องต่ำกว่าอุณหภูมิของของไหลที่พาความร้อนเข้ามาสู่ครีบ โดยถ้าอุณหภูมิของครีบต่ำจนถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) ก็จะทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศขึ้นที่ครีบ ในกรณีที่ทุกส่วนของครีบบมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง จะทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศขึ้นที่ครีบทั่วทั้งชิ้น โดยจะเรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะผิวเปียก (Fully wet condition) ทำให้เกิดงานวิจัยขึ้นมากมายเกี่ยวกับครีบบสภาวะผิวเปียก เช่น การหาขนาดที่เหมาะสมของครีบบรูปร่างต่าง ๆ ภายใต้สภาวะผิวเปียกด้วยวิธีการที่ต่างกันไป เช่น การใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ Conjugate Gradient Method (Huang and Chung, 2016) ศึกษาครีบบวงแหวนภายใต้สภาวะผิวเปียก ต่อมาในปี.ศ. 2018 ได้มีการสร้างแบบจำลองการนำความร้อนภายใต้สภาวะไม่คงตัวผ่านครีบบตามแนวยาวและครีบบหนามภายใต้สภาวะผิวเปียกโดยใช้วิธีการแยกตัวแปรจากแบบจำลองของ Fourier และ non-Fourier (Wankhade et al., 2018) รวมไปถึงมีการศึกษาครีบบที่มีโครงสร้างเป็นตัวที่ภายใต้สภาวะผิวเปียก (Das and Kundu, 2019)



ภาพที่ 21 ครีบบางแหวน
(Huang and Chung, 2016)



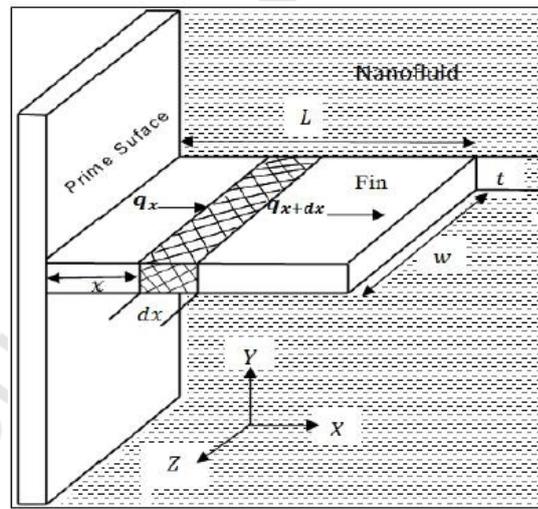
ภาพที่ 22 ครีบบางแนวยาวและครีบบานาม
(Wankhade et al., 2018)



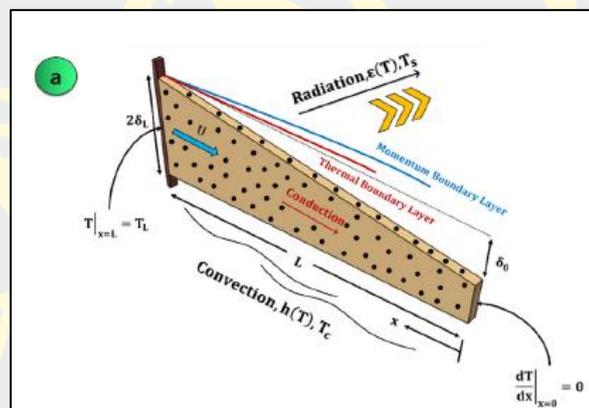
ภาพที่ 23 ครีป โครงสร้างตัวที่

(Das and Kundu, 2019)

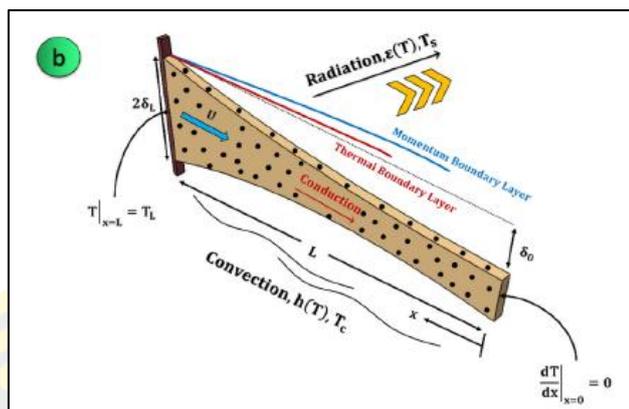
นอกจากนี้ยังมีการศึกษาครีปที่มีลักษณะพรุณที่มีรูปร่างแตกต่างกันภายใต้สภาวะผิวเปียกที่เกิดจากการควบแน่นของ Nanofluids ที่มีส่วนผสมที่ต่างกันออกไป เช่น การศึกษาการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของครีปพรุณตามแนวยาวโปรไฟล์สี่เหลี่ยมภายใต้สภาวะผิวเปียกที่มี Nanofluids ไหลผ่าน (Baslem et al., 2020) และมีงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายกัน โดยการวิเคราะห์ความร้อนของครีปพรุณที่เปียกไปด้วย Nanofluids โปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมู โปรไฟล์พาราโบลาโค้งเว้า และ โปรไฟล์พาราโบลาโค้งนูน (Hosseinzadeh et al., 2022) ในปีเดียวกันได้มีการศึกษาในลักษณะเดียวกันกับครีปพรุณแบบวงแหวน (Keerthi et al., 2022) และได้ศึกษาในลักษณะเดียวกันกับครีปตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม และ โปรไฟล์เอ็กซ์โปเนนเชียลที่มีปลายหนาและปลายบาง (Ramzan et al., 2022)



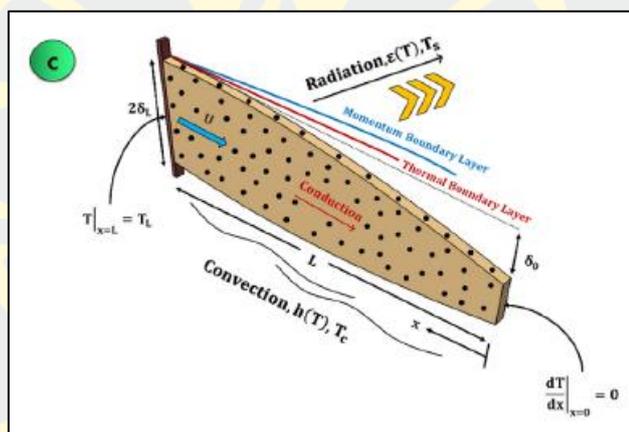
ภาพที่ 24 ครีบกพรุนตามแนวยาวโปรไฟล์สี่เหลี่ยม
(Baslem et al., 2020)



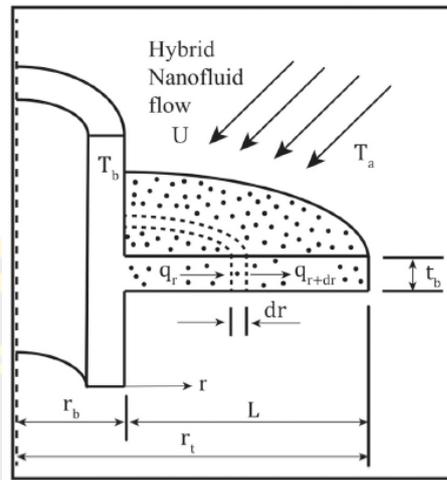
ภาพที่ 25 ครีบกพรุนโปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมู
(Hosseinzadeh et al., 2022)



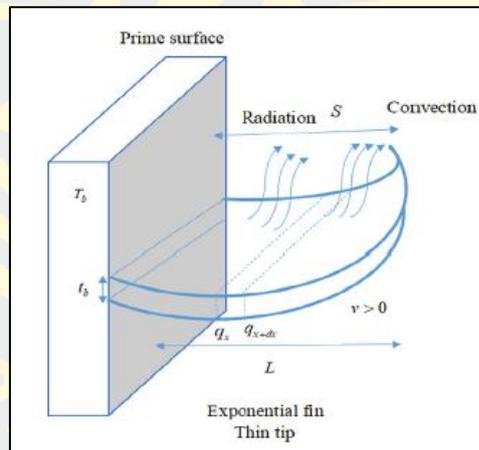
ภาพที่ 26 ครีบกพรุนโพรไฟล์พาราโบลาคึ่งเว้า
(Hosseinzadeh et al., 2022)



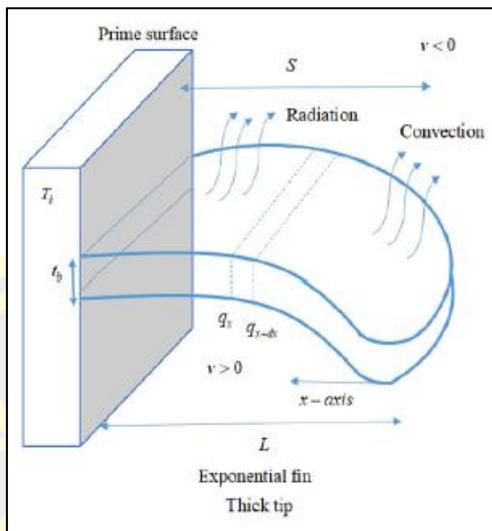
ภาพที่ 27 ครีบกพรุนโพรไฟล์พาราโบลาคึ่งนูน
(Hosseinzadeh et al., 2022)



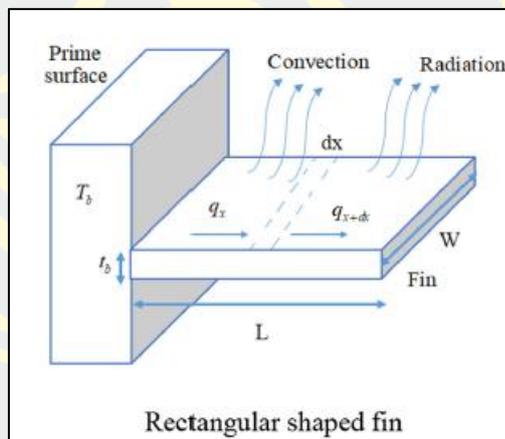
ภาพที่ 28 ครีบกพรุนแบบวงแหวน
(Keerthi et al., 2022)



ภาพที่ 29 ครีบกพรุนตามแนวหาโปรไฟล์เอ็กซ์โปเนนเชียลปลายบาง
(Ramzan et al., 2022)



ภาพที่ 30 ครีบรินตามแนวยาวโปรไฟล์เอ็กซ์โปเนนเชียลปลายหนา
(Ramzan et al., 2022)



ภาพที่ 31 ครีบรินตามแนวยาวโปรไฟล์สี่เหลี่ยม
(Ramzan et al., 2022)

ในการทำความเย็นหรือดูดซับความร้อนนั้นจะต้องทำให้ครีบรินมีความเย็นต่ำกว่าของไหลที่ไหลผ่านครีบริน จากที่กล่าวไปข้างต้นจะพบว่า มีสถานะที่ทำให้ผิวครีบรินเปียกได้เมื่ออุณหภูมิของครีบรินต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง แต่ในความเป็นจริงนั้นเมื่อครีบรินมีความขาวมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิต่ำกว่าครีบรินมีความแตกต่างจากอุณหภูมิที่ฐานครีบรินมากขึ้น และเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิส่วนปลายของ

ครีบบจะสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ส่งผลให้ส่วนปลายของครีบนั้น ไม่มีการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ โดยที่สภาวะนี้จะเรียกว่า สภาวะผิวเปียกบางส่วน (Partially wet condition)

- ในปีค.ศ. 2006 Naphon ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของครีบบแบบวงแหวนภายในสภาวะผิวแห้ง ผิวเปียก และผิวเปียกบางส่วน โดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานและมวล เพื่อหาการกระจายตัวของอุณหภูมิในครีบบและแก้สมการ โดยใช้ Finite difference ผลลัพธ์ที่ได้เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ พบว่ามีความสมเหตุสมผล (Naphon, 2006)

- ในปีค.ศ. 2013 Pirompugd and Wongwises ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของครีบบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม โปรไฟล์สามเหลี่ยม โปรไฟล์พาราโบลาคว่ำ และโปรไฟล์พาราโบลาหงาย เพื่อคำนวณหาอัตราการถ่ายโอนความร้อน การกระจายตัวของอุณหภูมิในครีบบ และประสิทธิภาพของครีบบ ภายใต้สภาวะผิวเปียกบางส่วน ผลที่ได้พบว่าเมื่อครีบบมีพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น ครีบบก็จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย แต่สภาวะผิวเปียกนั้นทำให้ประสิทธิภาพของครีบบลดลง (Pirompugd and Wongwises, 2013b)

- ในปีเดียวกัน Pirompugd and Wongwises ในลักษณะคล้ายเดิม โดยเปลี่ยนจากครีบบตามแนวยาวเป็นครีบบแบบหนามพื้นที่หน้าตัดวงกลม ที่มีโปรไฟล์ทรงกระบอก โปรไฟล์ทรงกรวย โปรไฟล์พาราโบลาคว่ำ และโปรไฟล์พาราโบลาหงาย ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าเมื่อครีบบมีพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น ครีบบก็จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพของครีบบจะลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับครีบบตามแนวยาวในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ในส่วนสภาวะผิวเปียกนั้นทำให้ประสิทธิภาพของครีบบลดลงเช่นเดียวกับครีบบตามแนวยาว (Pirompugd and Wongwises, 2013a)

- ในปีค.ศ. 2015 Huang and Chung ศึกษาครีบบวงแหวนภายใต้สภาวะเปียกบางส่วน โดยใช้วิธี Conjugate gradient method ซึ่งต่างจาก Naphon, 2006 และกำหนดให้อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 70% ถึง 90% ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะเปียกบางส่วนแน่นอน ผลที่ได้เมื่อเทียบกับแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นพบว่ามีความสอดคล้องกัน (Huang and Chung, 2015)

- ในปีค.ศ. 2020 Hazarika et al. ได้ศึกษาครีบบที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม 2 แฉก และ 3 แฉก ที่อยู่ในสภาวะผิวแห้ง ผิวเปียก และผิวเปียกบางส่วน โดยที่ครีบบมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าครีบบรูปสี่เหลี่ยมแบบ 2 แฉกจะให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับแบบ 3 แฉก ในทุก ๆ สภาวะ (Hazarika et al., 2020)

จากงานวิจัยที่ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าในสภาวะผิวเปียกบางส่วนมีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกรณีดังกล่าวนี้ค่อนข้างน้อย และยังไม่มียานวิจัยใดที่กล่าวถึงเอนโทรปีเอนเนอเรนซ์ของการพาความร้อนแบบบังคับภายใต้สภาวะผิวเปียกบางส่วน รวมถึงยังไม่มีผลการหาค่าที่เหมาะสมของเอนโทรปีเอนเนอเรนซ์ในกรณีดังกล่าวอีกด้วย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จึงจะกล่าวถึงการหาค่าที่เหมาะสมของอัตราถ่ายโอนความร้อนและเอนโทรปีเจนเนอเรชันของ
ครีบบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์สี่เหลี่ยม โปรไฟล์สามเหลี่ยม โปรไฟล์พาราโบลาคว่ำ และโปรไฟล์
พาราโบลาหงาย



บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับครีบบางส่วน

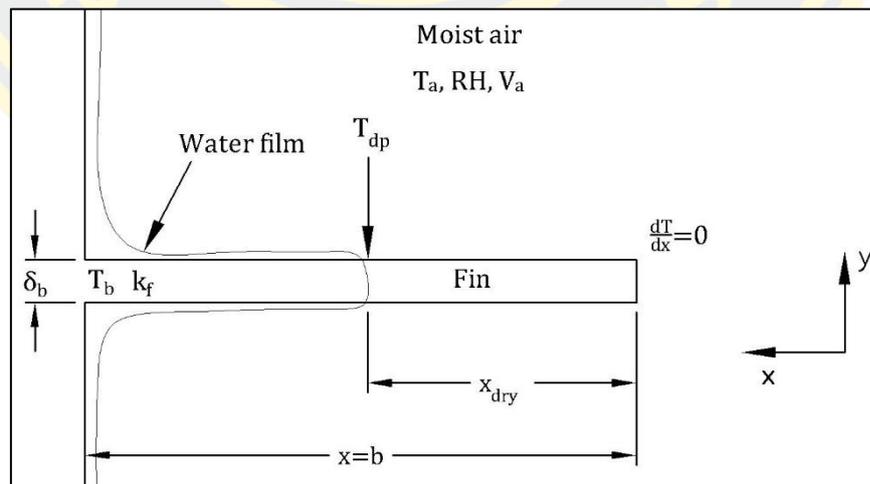
การหาค่าเอนโทรปีเอนเนอเรนซ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Poulidakos and Bejan, 1982 โดยวิธีการในงานวิจัยฉบับนี้จะต้องทราบอัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบางส่วน ซึ่งจะหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบางส่วนได้จากงานวิจัยของ Pirompugd and Wongwises, 2013b โดยงานวิจัยดังกล่าวนี้จะประกอบไปด้วยครีบบางส่วนยาวทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่

ครีบบางส่วนที่มีโปรไฟล์รูปสี่เหลี่ยม

ครีบบางส่วนที่มีโปรไฟล์รูปสี่เหลี่ยมจะเป็นครีบบางส่วนที่มีพื้นที่หน้าตัดของครีบบางส่วนที่ตามภาพที่ 32 ทำให้การนำความร้อนของครีบบางส่วนไปได้อย่างต่อเนื่อง ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบางส่วนนั้น จะแบ่งสมการเชิงอนุพันธ์ออกเป็นสองส่วน ดังนี้

1. สมการของครีบบางส่วนในส่วนที่แห้ง

ส่วนแห้งของครีบบางส่วนจะเริ่มพิจารณาจากปลายครีบบางส่วน ไปจนถึงจุดที่ครีบบางส่วนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหยดน้ำค้าง หรือก็คือส่วนที่ครีบบางส่วนเริ่มเปียกตามภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ครีบบางส่วนที่มีโปรไฟล์รูปสี่เหลี่ยม

สามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนี้

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{2h}{k_f\delta_b}\theta = 0 \quad (3-1)$$

h สามารถหาได้จากสมการเลขนัสเซิลต์สำหรับการไหลแบบราบเรียบผ่านครีป

$$Nu = 0.664Re_L^{0.5}Pr^{1/3} \quad (3-2)$$

หรือ

$$h = 0.664 \frac{k_f}{L} Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (3-3)$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 3-1 คือ

$$\theta = C_{1,rec}e^{mx} + C_{2,rec}e^{-mx} \quad (3-4)$$

และอนุพันธ์ของสมการที่ 3-2 คือ

$$\frac{d\theta}{dx} = C_{1,rec}me^{mx} - C_{2,rec}me^{-mx} \quad (3-5)$$

และกำหนดให้

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_f\delta_b}} \quad (3-6)$$

ในการหาค่า $C_{1,rec}$ และ $C_{2,rec}$ จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = 0, \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

และ

$$x = x_{\text{dry}}, \theta(x_{\text{dry}}) = \theta_{\text{dp}}$$

โดยที่

$$\theta_{\text{dp}} = T_{\text{dp}} - T_a \quad (3-7)$$

แทน $x = 0$ ใน 3.3 จะได้

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0 = C_{1,\text{rec}} m e^{mx} - C_{2,\text{rec}} m e^{-mx}$$

$$0 = C_{1,\text{rec}} - C_{2,\text{rec}}$$

$$C_{1,\text{rec}} = C_{2,\text{rec}} = C$$

ที่ $x = x_{\text{dry}}$ จะได้

$$\theta_{\text{dp}} = C(e^{mx_{\text{dry}}} + e^{-mx_{\text{dry}}})$$

$$C = \frac{\theta_{\text{dp}}}{(e^{mx_{\text{dry}}} + e^{-mx_{\text{dry}}})}$$

จะได้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ คือ

$$\theta(x) = \frac{\theta_{\text{dp}} \cosh mx}{\cosh mx_{\text{dry}}} \quad (3-8)$$

2. สมการของครีปส์เหลี่ยมในส่วนที่เปียก

สมการเชิงอนุพันธ์สามัญของการถ่ายโอนความร้อนของครีปส์เหลี่ยมในส่วนที่เปียก สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d^2\gamma}{dx^2} - \frac{2hb'_w}{k_f\delta_b c_{p,a}} \gamma = 0 \quad (3-9)$$

โดยที่

$$\gamma = i_s - i_a \quad (3-10)$$

จะได้ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 3.5 เป็นดังนี้

$$\gamma = C_{3,rec} e^{M_T x} + C_{4,rec} e^{-M_T x} \quad (3-11)$$

และกำหนดให้

$$M_T = \sqrt{\frac{2hb'_w}{k_f \delta_b c_{p,a}}} \quad (3-12)$$

และ

$$b'_w = f(T)$$

ในการหาค่า $C_{3,rec}$ และ $C_{4,rec}$ จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = x_{dry}, \quad \gamma = \gamma_{dp}$$

และ

$$x = b, \quad \gamma = \gamma_b$$

โดยที่

$$\gamma_{dp} = i_{s@T_{dp}} - i_a \quad (3-13)$$

และ

$$\gamma_b = i_{s@T_b} - i_a \quad (3-14)$$

แทน $x = x_{dry}$ และ $x = b$ ใน 3-11 จะได้

$$\gamma_{dp} = C_{3,rec}e^{M_T x_{dry}} + C_{4,rec}e^{-M_T x_{dry}} \quad (3-15)$$

และ

$$\gamma_b = C_{3,rec}e^{M_T b} + C_{4,rec}e^{-M_T b} \quad (3-16)$$

จากสมการที่ 3-15 และ 3-16 จะได้ $C_{3,rec}$ และ $C_{4,rec}$ ดังนี้

$$C_{3,rec} = \frac{\gamma_b e^{M_T b} - \gamma_{dp} e^{M_T x_{dry}}}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} \quad (3-17)$$

และ

$$C_{4,rec} = \frac{\gamma_{dp} e^{(2M_T b + M_T x_{dry})} - \gamma_b e^{(2M_T x_{dry} + M_T b)}}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} \quad (3-18)$$

เมื่อนำ $C_{3,rec}$ และ $C_{4,rec}$ แทนในสมการที่ 3-11 จะได้

$$\gamma(x) = \frac{\gamma_b e^{M_T b} - \gamma_{dp} e^{M_T x_{dry}}}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} e^{M_T x} + \frac{\gamma_{dp} e^{(2M_T b + M_T x_{dry})} - \gamma_b e^{(2M_T x_{dry} + M_T b)}}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} e^{-M_T x} \quad (3-19)$$

จากนั้นทำการหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ฐานครีปและอัตราการถ่ายโอนความร้อนในอุดมคติ ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจากสมการ

$$\dot{Q}'_x = -\frac{k_f \delta_x}{b'_w} \frac{d\gamma}{dx}$$

จะได้

$$\dot{Q}'_{x,rec} = -\frac{k_f \delta b}{b'_w} \left[\frac{M_T e^{M_T x} (\gamma_b e^{M_T b} - \gamma_{dp} e^{M_T x_{dry}}) - M_T e^{-M_T x} (\gamma_{dp} e^{(M_T x_{dry} + 2M_T b)} - \gamma_b e^{(2M_T x_{dry} + M_T b)})}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} \right]$$

หรือ

$$\dot{Q}'_{b,rec} = -\frac{k_f \delta b}{b'_w} \left[\frac{M_T \gamma_b (e^{2M_T x_{dry}} + e^{2M_T b}) - 2M_T \gamma_{dp} e^{M_T (x_{dry} + b)}}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} \right] \quad (3-20)$$

และ

$$\dot{Q}'_{ideal} = \frac{-2hb\gamma_b}{c_{p,a}}$$

จากนั้นทำการหาค่าประสิทธิภาพของครีบ

$$\eta_{f,rec} = \frac{\dot{Q}'_{b,rec}}{\dot{Q}'_{ideal}} = \frac{\gamma_b (e^{2M_T x_{dry}} + e^{2M_T b}) - 2\gamma_{dp} e^{M_T (x_{dry} + b)}}{M_T b \gamma_b (e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}})} \quad (3-21)$$

หา x_{dry} โดย $\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_{dry}} = b'_w \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=x_{dry}}$

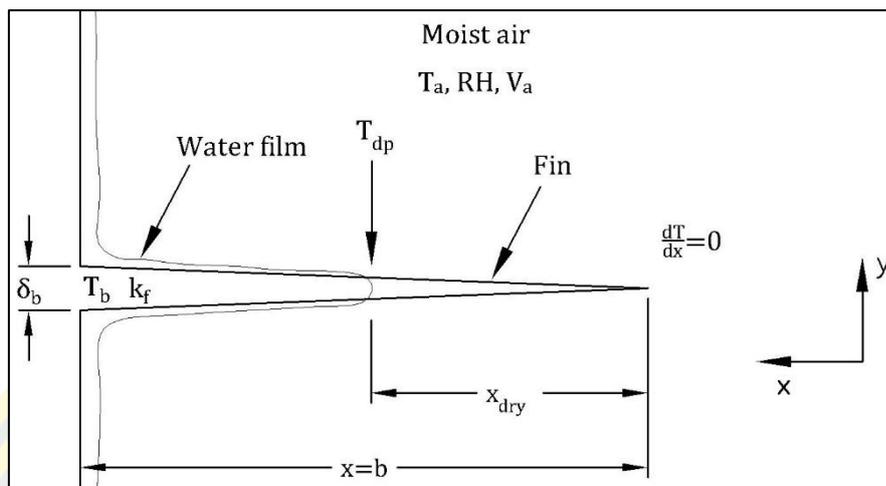
$$\frac{2M_T \gamma_b e^{M_T (x_{dry} + b)} - M_T \gamma_{dp} (e^{2M_T x_{dry}} + e^{2M_T b})}{e^{2M_T b} - e^{2M_T x_{dry}}} = \frac{mb'_w \theta_{dp}}{e^{mx_{dry}} + e^{-mx_{dry}}} (e^{mx_{dry}} - e^{-mx_{dry}}) \quad (3-22)$$

ครีบตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปสามเหลี่ยม

ครีบสามเหลี่ยมจะเป็นครีบที่มีพื้นที่หน้าตัดของครีบลดลงอย่างคงที่ตามภาพที่ 33 ทำให้การนำความร้อนของครีบลดลงตามขนาดของพื้นที่หน้าตัด ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบเปียกบางส่วนนั้น จะแบ่งสมการเชิงอนุพันธ์ออกเป็นสองส่วน ดังนี้

1. สมการของครีบสามเหลี่ยมในส่วนที่แห้ง

ส่วนแห้งของครีบจะเริ่มพิจารณาจากปลายครีบ ไปจนถึงจุดที่ครีบบี้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหยดน้ำค้าง หรือก็คือส่วนที่ครีบเริ่มเปียกตามภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ครีบริที่มีโปรไฟล์รูปสามเหลี่ยม

สามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนี้

$$x \frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{d\theta}{dx} - m^2 b \theta = 0 \tag{3-23}$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 3-23 เป็นดังนี้

$$\theta(x) = C_{1,tri} I_0(2m\sqrt{bx}) + C_{2,tri} K_0(2m\sqrt{bx}) \tag{3-24}$$

และกำหนดให้

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_f \delta_b}}$$

ในการหาค่า $C_{1,tri}$ และ $C_{2,tri}$ จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = 0, \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

และ

$$x = x_{\text{dry}}, \theta(x_{\text{dry}}) = \theta_{\text{dp}}$$

แทน $x = 0$ ในอนุพันธ์ของสมการที่ 3-24 จะได้

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0 = C_{2,\text{tri}}$$

$$C_{2,\text{tri}} = 0$$

ที่ $x = x_{\text{dry}}$ จะได้

$$\theta_{\text{dp}} = C_{1,\text{tri}} I_0(2m\sqrt{bx_{\text{dry}}})$$

$$C_{1,\text{tri}} = \frac{\theta_{\text{dp}}}{I_0(2m\sqrt{bx_{\text{dry}}})}$$

จะได้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิ คือ

$$\theta(x) = \frac{\theta_{\text{dp}} I_0(2m\sqrt{bx})}{I_0(2m\sqrt{bx_{\text{dry}}})} \quad (3-25)$$

2. สมการของครีปสามเหลี่ยมในส่วนที่เปียก

สมการเชิงอนุพันธ์สามัญของการถ่ายโอนความร้อนของครีปส่วนที่เปียก สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d^2\gamma}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d\gamma}{dx} - \frac{M_T^2 b}{x} \gamma = 0 \quad (3-26)$$

โดยที่

$$\gamma = i_s - i_a$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 3-26 เป็นดังนี้

$$\gamma = C_{3,tri}I_0(2M_T\sqrt{bx}) + C_{4,tri}K_0(2M_T\sqrt{bx}) \quad (3-27)$$

และกำหนดให้

$$M_T = \sqrt{\frac{2hb'_w}{k_f\delta_b c_{p,a}}}$$

และ

$$b'_w = f(T)$$

ในการหาค่า $C_{3,tri}$ และ $C_{4,tri}$ จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = x_{dry}, \gamma = \gamma_{dp}$$

และ

$$x = b, \gamma = \gamma_b$$

โดยที่

$$\gamma_{dp} = i_{s@T_{dp}} - i_a$$

และ

$$\gamma_b = i_{s@T_b} - i_a$$

แทน $x = x_{dry}$ และ $x = b$ ใน 3-27 จะได้

$$\gamma_{dp} = C_{3,tri}I_0(2M_T\sqrt{bx_{dry}}) + C_{4,tri}K_0(2M_T\sqrt{bx_{dry}}) \quad (3-28)$$

และ

$$\gamma_b = C_{3,tri}I_0(2M_Tb) + C_{4,tri}K_0(2M_Tb) \quad (3-29)$$

จากสมการที่ 3-28 และ 3-29 จะได้ $C_{3,tri}$ และ $C_{4,tri}$ ดังนี้

$$C_{4,tri} = \frac{\gamma_{dp}I_0(2M_Tb) - \gamma_b I_0(2M_T\sqrt{bx_{dry}})}{I_0(2M_Tb)K_0(2M_T\sqrt{bx_{dry}}) - I_0(2M_T\sqrt{bx_{dry}})K_0(2M_Tb)}$$

และ

$$C_{3,tri} = \frac{\gamma_b K_0(2M_T\sqrt{bx_{dry}}) - \gamma_{dp}K_0(2M_Tb)}{I_0(2M_Tb)K_0(2M_T\sqrt{bx_{dry}}) - I_0(2M_T\sqrt{bx_{dry}})K_0(2M_Tb)}$$

นำ $C_{3,tri}$ และ $C_{4,tri}$ แทนในสมการที่ 3-27 จะได้ผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการที่ 3-26 จากนั้นทำการหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ฐานครีปและอัตราการถ่ายโอนความร้อนในอุดมคติต่อหนึ่งหน่วยความยาวจากสมการ

$$\dot{Q}'_x = -\frac{k_f \delta_x}{b'_w} \frac{dy}{dx}$$

จะได้

$$\dot{Q}'_{x,tri} = -\frac{k_f \delta_b M_T}{b'_w} \sqrt{\frac{x}{b}} (C_{3,tri}I_1(2M_T\sqrt{bx}) - C_{4,tri}K_1(2M_T\sqrt{bx}))$$

หรือ

$$\dot{Q}'_{b,tri} = -\frac{k_f \delta_b}{b'_w} (C_{3,tri}M_T I_1(2M_Tb) - C_{4,tri}M_T K_1(2M_Tb)) \quad (3-30)$$

และ

$$\dot{Q}'_{ideal} = \frac{-2hb\gamma_b}{c_{p,a}}$$

จากนั้นทำการหาค่าประสิทธิภาพของครีบ

$$\eta_{f,tri} = \frac{\dot{Q}'_{b,tri}}{\dot{Q}'_{ideal}} = \frac{\frac{k_f \delta_b}{b'_w} (C_{3,tri} M_T I_1(2M_T b) - C_{4,tri} M_T K_1(2M_T b))}{\frac{-2hb\gamma_b}{c_{p,a}}} \quad (3-31)$$

แทนค่า $C_{3,tri}$ และ $C_{4,tri}$ ลงในสมการที่ 3-31 แล้วจัดรูปสมการ จะได้

$$\eta_{f,tri} = \frac{I_1(2M_T b) \left[K_0 \left(2M_T \sqrt{bx_{dry}} \right) - \frac{\gamma_{dp}}{\gamma_b} K_0(2M_T b) \right] + K_1(2M_T b) \left[I_0 \left(2M_T \sqrt{bx_{dry}} \right) - \frac{\gamma_{dp}}{\gamma_b} I_0(2M_T b) \right]}{M_T b \left[I_0(2M_T b) K_0 \left(2M_T \sqrt{bx_{dry}} \right) - I_0 \left(2M_T \sqrt{bx_{dry}} \right) K_0(2M_T b) \right]} \quad (3-32)$$

$$\text{หา } x_{dry} \text{ โดย } \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_{dry}} = b'_w \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=x_{dry}}$$

$$\frac{I_1(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) \left[\gamma_b K_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) - \gamma_{dp} K_0(2M_T b) \right] + K_1(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) \left[\gamma_b I_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) - \gamma_{dp} I_0(2M_T b) \right]}{I_0(2M_T b) K_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) - I_0(2M_T \sqrt{bx_{dry}}) K_0(2M_T b)}$$

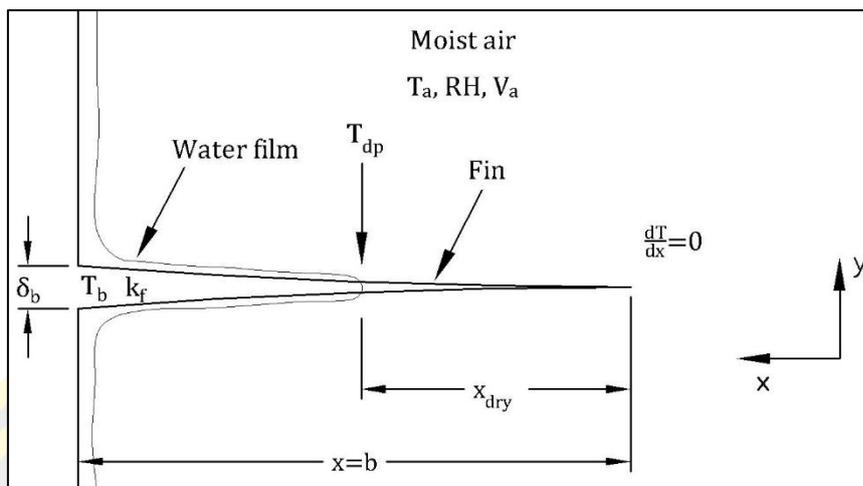
$$\sqrt{\frac{b}{x_{dry}}} = \frac{m\sqrt{b}}{M_T \sqrt{x_{dry}}} b'_{w,dp} \theta_{dp} \frac{I_1(2m\sqrt{bx_{dry}})}{I_0(2m\sqrt{bx_{dry}})} \quad (3-33)$$

ครีบบางแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปพาราโบลาโค้งเว้า

ครีบบางแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปพาราโบลาโค้งเว้าจะเป็นครีบบางที่มีพื้นที่หน้าตัดของครีบลดลงอย่างรวดเร็วตามภาพที่ 34 ทำให้การนำความร้อนของครีบลดลงตามขนาดของพื้นที่หน้าตัด ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบางส่วนนั้น จะแบ่งสมการเชิงอนุพันธ์ออกเป็นสองส่วน ดังนี้

1. สมการของครีบบางแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปพาราโบลาโค้งเว้าในส่วนที่แห้ง

ส่วนแห้งของครีบบางจะเริ่มพิจารณาจากปลายครีบบาง ไปจนถึงจุดที่ครีบบางมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหยดน้ำค้าง หรือก็คือส่วนที่ครีบบางเริ่มเปียกตามภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ครีบริที่มีโปรไฟล์รูปพาราโบลาโค้งเว้า

สามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนี้

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{d\theta}{dx} - \frac{m^2 b^2 \theta}{x^2} = 0 \tag{3-34}$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 3-34 เป็นดังนี้

$$\theta(x) = C_{1,cav} x^\alpha + C_{2,cav} x^\beta \tag{3-35}$$

โดยที่

$$\alpha, \beta = -\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} (1 + 4m^2 b^2)^{1/2} \tag{3-36}$$

และกำหนดให้

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_f \delta_b}}$$

ในการหาค่า $C_{1,cav}$ และ $C_{2,cav}$ จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = 0, \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

และ

$$x = x_{\text{dry}}, \theta(x_{\text{dry}}) = \theta_{\text{dp}}$$

ที่ $x = 0$ ในอนุพันธ์ของสมการที่ 3-35 จะได้

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0 = C_{1,\text{cav}}\alpha x^{\alpha-1} + C_{2,\text{cav}}\beta x^{\beta-1}$$

จากสมการนี้ จะพบว่า $C_{2,\text{cav}}$ จะต้องมามีค่าเท่ากับ 0 จึงจะทำให้สมการเป็นจริง ดังนั้น

$$\theta(x) = C_{1,\text{cav}}x^\alpha$$

ที่ $x = x_{\text{dry}}$ จะได้

$$\theta_{\text{dp}} = C_{1,\text{cav}}x_{\text{dry}}^\alpha$$

$$C_{1,\text{cav}} = \frac{\theta_{\text{dp}}}{x_{\text{dry}}^\alpha}$$

$$C_{1,\text{cav}} = \frac{\theta_{\text{dp}}}{x_{\text{dry}}^{-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}(1+4m^2b^2)^{1/2}}}$$

จะได้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิคือ

$$\theta(x) = \theta_{\text{dp}} \left(\frac{x}{x_{\text{dry}}} \right)^\alpha \quad (3-37)$$

2. สมการของครีปพาราโบลาโค้งไว้ในส่วนที่เปียก

สมการเชิงอนุพันธ์สามัญของการถ่ายโอนความร้อนของครีปส่วนที่เปียก สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d^2\gamma}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{d\gamma}{dx} - \frac{M_T^2 b^2}{x^2} \gamma = 0 \quad (3-38)$$

โดยที่

$$\gamma = i_s - i_a$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 3-38 เป็นดังนี้

$$\gamma(x) = C_{3,cav} x^\lambda + C_{4,cav} x^\mu \quad (3-39)$$

โดยที่

$$\lambda, \mu = -\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} (1 + 4M_T^2 b^2)^{1/2} \quad (3-40)$$

และกำหนดให้

$$M_T = \sqrt{\frac{2hb'_w}{k_f \delta_b c_{p,a}}}$$

และ

$$b'_w = f(T)$$

ในการหาค่า $C_{3,cav}$ และ $C_{4,cav}$ จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = x_{dry}, \gamma = \gamma_{dp}$$

และ

$$x = b, \gamma = \gamma_b$$

โดยที่

$$\gamma_{dp} = i_{s@T_{dp}} - i_a$$

และ

$$\gamma_b = i_{s@T_b} - i_a$$

แทน $x = x_{dry}$ และ $x = b$ ใน 3-39 จะได้

$$\gamma_{dp} = C_{3,cav} x_{dry}^\lambda + C_{4,cav} x_{dry}^\mu \quad (3-41)$$

และ

$$\gamma_b = C_{3,cav} b^\lambda + C_{4,cav} b^\mu \quad (3-42)$$

จากสมการที่ 3-40 และ 3-41 จะได้ $C_{3,cav}$ และ $C_{4,cav}$ ดังนี้

$$C_{4,cav} = \frac{\gamma_{dp} b^\lambda - \gamma_b x_{dry}^\lambda}{x_{dry}^\mu b^\lambda - x_{dry}^\lambda b^\mu}$$

และ

$$C_{3,cav} = \frac{\gamma_b x_{dry}^\mu - \gamma_{dp} b^\mu}{x_{dry}^\mu b^\lambda - x_{dry}^\lambda b^\mu}$$

นำ $C_{3,cav}$ และ $C_{4,cav}$ แทนในสมการที่ 3-38 จะได้ผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการที่ 3-37 ดังนี้

$$\gamma(x) = \frac{\gamma_b x_{dry}^\mu - \gamma_{dp} b^\mu}{x_{dry}^\mu b^\lambda - x_{dry}^\lambda b^\mu} x^\alpha + \frac{\gamma_{dp} b^\lambda - \gamma_b x_{dry}^\lambda}{x_{dry}^\mu b^\lambda - x_{dry}^\lambda b^\mu} x^\mu$$

จากนั้นทำการหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ฐานครีปและอัตราการถ่ายโอนความร้อนในอุดมคติ
ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจากสมการ

$$\dot{Q}'_x = -\frac{k_f \delta_x}{b'_w} \frac{dy}{dx}$$

จะได้

$$\dot{Q}'_{x,cav} = -\frac{k_f \delta_b}{b^2 b'_w} [\lambda C_{3,cav} x^{\lambda+1} + \mu C_{4,cav} x^{\mu+1}]$$

หรือ

$$\dot{Q}'_{b,cav} = -\frac{k_f \delta_b}{b'_w} [\lambda C_{3,cav} b^{-1+\lambda} + \mu C_{4,cav} b^{-1+\mu}] \quad (3-43)$$

และ

$$\dot{Q}'_{ideal} = \frac{-2hb\gamma_b}{c_{p,a}}$$

จากนั้นทำการหาค่าประสิทธิภาพของครีป

$$\eta_{f,cav} = \frac{\dot{Q}'_{b,cav}}{\dot{Q}'_{ideal}} = \frac{-\frac{k_f \delta_b}{b'_w} [\lambda C_{3,cav} b^{-1+\lambda} + \mu C_{4,cav} b^{-1+\mu}]}{\frac{-2hb\gamma_b}{c_{p,a}}} \quad (3-44)$$

จากนั้นหา x_{dry} โดย $\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_{dry}} = b'_w \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=x_{dry}}$

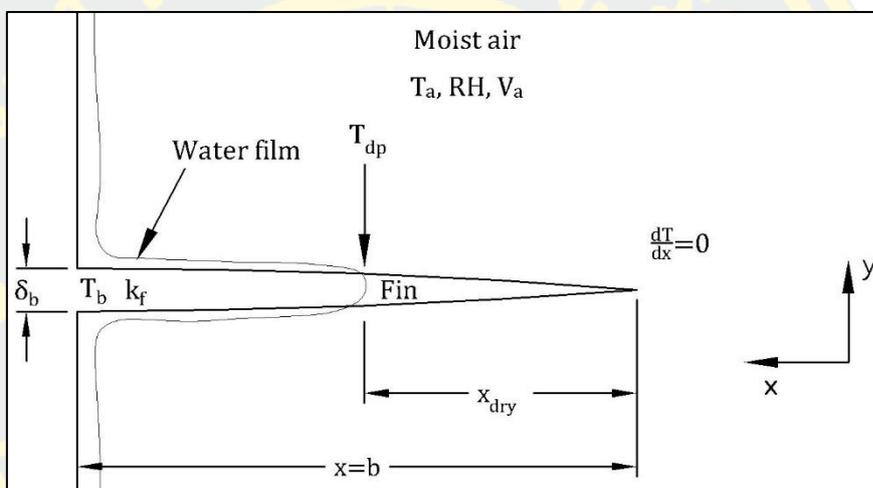
$$\lambda C_{3,cav} x_{dry}^{-1+\lambda} + \mu C_{4,cav} x_{dry}^{-1+\mu} = b'_{w,dp} \alpha C_{1,cav} x_{dry}^{-1+\alpha} \quad (3-45)$$

ครีบทตามแนวยาวที่มีโปรไฟล์รูปพาราโบลาโค้งนูน

ครีบทพาราโบลาโค้งนูนจะเป็นครีบทที่มีพื้นที่หน้าตัดของครีบทลดลงอย่างช้า ๆ ตามภาพที่ 35 ทำให้การนำความร้อนของครีบทลดลงอย่างช้า ๆ ตามขนาดของพื้นที่หน้าตัด ในการคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบทเปียกบางส่วนนั้น จะแบ่งสมการเชิงอนุพันธ์ออกเป็นสองส่วน ดังนี้

1. สมการของครีบทพาราโบลาโค้งนูนในส่วนที่แห้ง

ส่วนแห้งของครีบทจะเริ่มพิจารณาจากปลายครีบท ไปจนถึงจุดที่ครีบทมีอุณหภูมิเท่ากับ อุณหภูมิหยดน้ำค้าง หรือก็คือส่วนที่ครีบทเริ่มเปียกตามภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ครีบทที่มีโปรไฟล์รูปพาราโบลาโค้งนูน

สามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้ ดังนี้

$$\sqrt{x} \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{1}{2\sqrt{x}} \frac{d\theta}{dx} - m^2\sqrt{x}\theta = 0 \tag{3-46}$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 3-46 เป็นดังนี้

$$\theta(x) = x^{1/4} [C_{1,vex} I_{1/3}(u(x)) + C_{2,vex} I_{-1/3}(u(x))] \tag{3-47}$$

โดยที่

$$u(x) = \frac{4}{3}mb^{1/4}x^{3/4} \quad (3-48)$$

และกำหนดให้

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_f \delta_b}}$$

ในการหาค่า $C_{1,vex}$ และ $C_{2,vex}$ จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = 0, \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

และ

$$x = x_{dry}, \theta(x_{dry}) = \theta_{dp}$$

จะได้

$$C_{1,vex} = 0$$

$$C_{2,vex} = \frac{\theta_{dp}}{x_{dry}^{1/4} I_{-1/3}(u(x_{dry}))}$$

จะได้สมการการกระจายตัวของอุณหภูมิคือ

$$\theta(x) = x^{1/4} [C_{2,vex} I_{-1/3}(u(x))]$$

$$\theta(x) = \frac{\theta_{dp} x^{1/4} I_{-1/3}\left(\frac{4}{3}mb^{1/4}x^{3/4}\right)}{x_{dry}^{1/4} I_{-1/3}\left(\frac{4}{3}mb^{1/4}x_{dry}^{3/4}\right)} \quad (3-49)$$

2. สมการของครีปพาราโบลาโค้งงอในส่วนของปีก

สมการเชิงอนุพันธ์สามัญของการถ่ายโอนความร้อนของครีปส่วนที่เป็ยก สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d^2\gamma}{dx^2} + \frac{1}{2x} \frac{d\gamma}{dx} - \frac{M_T^2 \sqrt{b}}{\sqrt{x}} \gamma = 0 \quad (3-50)$$

โดยที่

$$\gamma = i_s - i_a$$

ผลเฉลยทั่วไปของสมการที่ 3-50 เป็นดังนี้

$$\gamma(x) = x^{1/4} [C_{3,vex} I_{1/3}(v(x)) + C_{4,vex} I_{-1/3}(v(x))] \quad (3-51)$$

โดยที่

$$v(x) = \frac{4}{3} M_T b^{1/4} x^{3/4} \quad (3-52)$$

และกำหนดให้

$$M_T = \sqrt{\frac{2hb'_w}{k_f \delta_b c_{p,a}}}$$

และ

$$b'_w = f(T)$$

ในการหาค่า $C_{3,vex}$ และ $C_{4,vex}$ จำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$x = x_{dry}, \quad \gamma = \gamma_{dp}$$

และ

$$x = b, \quad \gamma = \gamma_b$$

โดยที่

$$\gamma_{dp} = i_{s@T_{dp}} - i_a$$

และ

$$\gamma_b = i_{s@T_b} - i_a$$

แทน $x = x_{dry}$ และ $x = b$ จะได้ใน 3-51

$$\gamma_{dp} = x_{dry}^{1/4} [C_{3,vex} I_{1/3}(v(x_{dry})) + C_{4,vex} I_{-1/3}(v(x_{dry}))] \quad (3-53)$$

และ

$$\gamma_b = b^{1/4} [C_{3,vex} I_{1/3}(v(b)) + C_{4,vex} I_{-1/3}(v(b))] \quad (3-54)$$

จากสมการที่ 3-53 และ 3-54 จะได้ $C_{3,vex}$ และ $C_{4,vex}$ ดังนี้

$$C_{4,vex} = \frac{\gamma_{dp} x_{dry}^{-1/4} I_{1/3}(v(b)) - \gamma_b b^{-1/4} I_{1/3}(v(x_{dry}))}{I_{1/3}(v(b)) I_{-1/3}(v(x_{dry})) - I_{-1/3}(v(b)) I_{1/3}(v(x_{dry}))}$$

และ

$$C_{3,vex} = \frac{\gamma_{dp} x_{dry}^{-1/4} I_{-1/3}(v(b)) - \gamma_b b^{-1/4} I_{-1/3}(v(x_{dry}))}{I_{-1/3}(v(b)) I_{1/3}(v(x_{dry})) - I_{1/3}(v(b)) I_{-1/3}(v(x_{dry}))}$$

นำ $C_{3,vex}$ และ $C_{4,vex}$ แทนในสมการที่ 3-51 จะได้ผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการที่ 3-50 จากนั้นทำการหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ฐานครีปและอัตราการถ่ายโอนความร้อนในอุดมคติต่อหนึ่งหน่วยความยาวจากสมการ

$$\dot{Q}'_x = - \frac{k_f \delta_x}{b'_w} \frac{dy}{dx}$$

จะได้

$$\dot{Q}'_{x,vex} = -\frac{k_f \delta_b x^{0.5} M_T}{b^{0.25} b'_w} [C_{3,vex} I_{-2/3}(v(x)) + C_{4,vex} I_{2/3}(v(x))]$$

หรือ

$$\dot{Q}'_{b,vex} = -\frac{k_f \delta_b}{b'_w} [b^{1/4} M_T (C_{3,vex} I_{-2/3}(v(b)) + C_{4,vex} I_{2/3}(v(b)))] \quad (3-55)$$

และ

$$\dot{Q}'_{ideal} = \frac{-2hb\gamma_b}{c_{p,a}}$$

จากนั้นทำการหาค่าประสิทธิภาพของครีบริบ

$$\eta_{f,vex} = \frac{\dot{Q}'_{b,vex}}{\dot{Q}'_{ideal}} = \frac{-\frac{k_f \delta_b}{b'_w} [b^{1/4} M_T (C_{3,vex} I_{-2/3}(v(b)) + C_{4,vex} I_{2/3}(v(b)))]}{\frac{-2hb\gamma_b}{c_{p,a}}} \quad (3-56)$$

จากนั้นหา x_{dry} โดย $\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_{dry}} = b'_w \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=x_{dry}}$

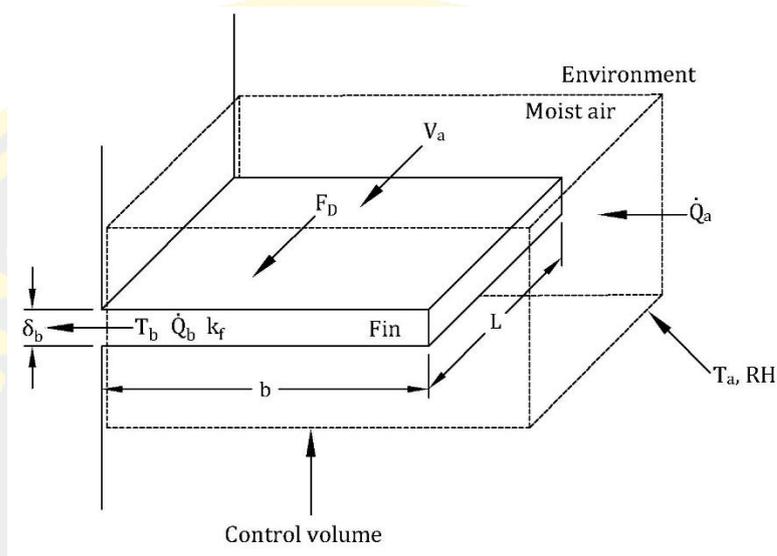
$$mb'_{w,dp} C_{2,vex} h^{1/4} I_{2/3}(u(x_{dry})) = M_T b^{1/4} [C_{3,vex} I_{-2/3}(v(x_{dry})) + C_{4,vex} I_{2/3}(v(x_{dry}))]$$

(3-57)

การเกิดเอนโทรปีของการไหลตามขวางผ่านครีบริบในกระบวนการพาความร้อนแบบบังคับ

การเกิดเอนโทรปีของการไหลตามขวางผ่านครีบริบเดี่ยวจะคำนวณหาจากแบบจำลองตามภาพที่ 36 โดยกำหนดให้ V_a แทนความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบริบ เมื่ออากาศไหลผ่านผิวครีบริบจะให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างอากาศที่ไหลและผิวครีบริบ ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย F_D จากนั้นกำหนดปริมาตรควบคุมขึ้นบริเวณรอบครีบริบ ให้อุณหภูมิของอากาศในปริมาตรควบคุมนั้นเท่ากับ T_a และมี

\dot{Q}_a เป็นอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ถ่ายโอนจากนอกปริมาตรควบคุมเข้ามาในปริมาตรควบคุม เมื่อพิจารณาที่ครีบบังให้ฐานครีบบังมีอุณหภูมิเท่ากับ T_b และมีความร้อนที่ถ่ายโอนจากครีบบังเข้าสู่ฐานครีบบังเท่ากับ \dot{Q}_b (Poulikakos and Bejan, 1982)



ภาพที่ 36 แผนภาพแสดงการเกิดเอนโทรปีของการพาความร้อนของครีบบัง

เมื่อนำภาพที่ 36 มาเขียนเป็นสมการตามกฎข้อที่ 1 และ 2 ของอุณหพลศาสตร์ จะได้สมการดังนี้

$$\dot{Q}_a - \dot{Q}_b + F_D V_a = 0 \quad (3-58)$$

และ

$$S_{gen} = \frac{\dot{Q}_b}{T_{K,b}} - \frac{\dot{Q}_a}{T_{K,a}} \quad (3-59)$$

กำหนดให้ $\theta_b = T_b - T_a$ แล้วนำสมการที่ 3-58 มาแทนใน 3-59 จะได้

$$S_{gen} = \frac{F_D V_a}{T_{K,a}} - \frac{\dot{Q}_b \theta_b}{T_{K,a}^2 (1 + \theta_b / T_a)} \quad (3-60)$$

เมื่อเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิ θ_b กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ T_a จะพบว่ามิต้าน้อยมาก จึงเขียนสมการได้ดังนี้

$$S_{\text{gen}} = \frac{F_D V_a}{T_{K,a}} - \frac{\dot{Q}_b \theta_b}{T_{K,a}^2} \quad (3-61)$$

กำหนดให้ T_a , V_a , \dot{Q}_b และคุณสมบัติของของไหลมีค่าคงที่ โดยที่ \dot{Q}_b จะสามารถหาได้จากสมการของ \dot{Q}_b ของครีบริปร่างต่าง ๆ จากนั้นหาค่า F_D จากสมการ

$$F_D = \frac{\rho_a C_f V_a^2 A_{sf}}{2} \quad (3-62)$$

โดยที่ A_{sf} และ C_f จะสามารถหาได้จาก

$$A_{sf} = 2bL \quad (3-63)$$

และ

$$C_f = 1.328 \text{Re}_L^{-1/2} \quad (3-64)$$

บทที่ 4

ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 สามารถนำมาเขียนโปรแกรมคำนวณได้ โดยใช้ Microsoft Excel เวอร์ชัน Insider เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันการคำนวณ Modified Bessel function ที่มีโอเคอร์เป็นเศษส่วน ซึ่ง Microsoft Excel เวอร์ชันปกติไม่สามารถทำได้ โดยโปรแกรมคำนวณที่เขียนขึ้น จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ของครีบบและอากาศ โดยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของโปรแกรมจะอ้างอิงจากงานวิจัยครีบบเปียกบางส่วนตามแนวยาวของ Pirompugd and Wongwises, 2013b ดังนี้

1. พารามิเตอร์ของครีบบ ได้แก่

- ความยาวครีบบ (b) = 3 cm
- ความหนาของฐานครีบบ (δ_b) = 0.1 mm
- ความลึกของครีบบ (L) = 3.8 cm
- อุณหภูมิที่ฐานของครีบบ (T_b) = 25 °
- ค่าการนำความร้อนของครีบบ (k_f) = 204 และ 386 W/m/K

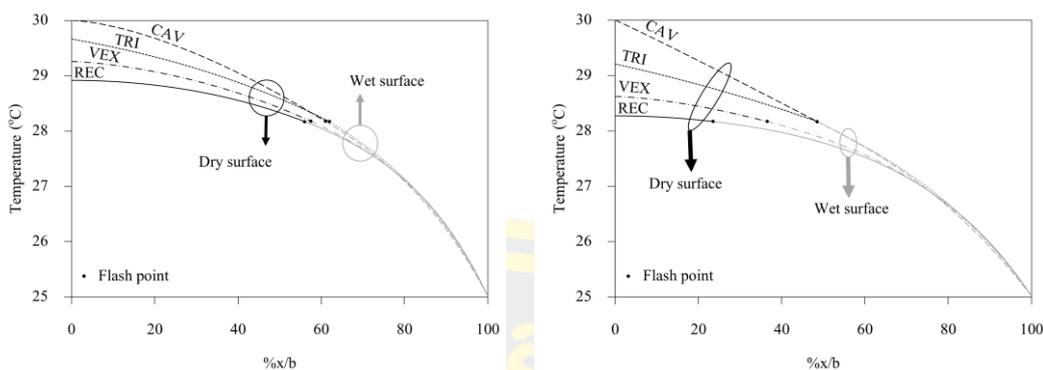
2. พารามิเตอร์ของอากาศ ได้แก่

- อุณหภูมิของอากาศ (T_a) = 30 °C
- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (RH) = 0.90
- ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบ (V_a) = 5 m/s

จากนั้นจะทำการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษาตามที่ระบุตามวัตถุประสงค์ เพื่อจะศึกษาผลลัพธ์ที่เปลี่ยนไปจากการปรับค่าพารามิเตอร์ โดยผลลัพธ์ที่ได้มีดังนี้

การกระจายของอุณหภูมิ (TEMPERATURE PROFILE)

เพื่อให้สามารถอธิบายผลลัพธ์อื่น ๆ ให้เข้าใจได้โดยง่าย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขอเสนอการกระจายของอุณหภูมิฐานครีบบไปจนถึงปลายครีบบ ของครีบบทั้ง 4 รูปร่าง ที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังนี้



(a) cribolumiเนี่ยม

(b) cribทองแดง

ภาพที่ 37 การกระจายอุณหภูมิตามความยาว crib

จากภาพที่ 37 จะแสดงถึงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของ cribolumiเนี่ยมและ cribทองแดงรูปร่างต่าง ๆ แกนนอนจะเป็นตำแหน่งบน crib โดยที่ 0 จะหมายถึงตำแหน่งที่ปลาย crib และ 100 จะหมายถึงตำแหน่งตำแหน่งที่ฐานของ crib และแกนตั้งจะแสดงอุณหภูมิของ crib เส้นแต่ละเส้นจะเป็นของ crib รูปร่างต่าง ๆ ตามข้อความที่กำกับไว้ในแต่ละเส้น และแต่ละเส้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เป็นเส้นที่ดำจะเป็นส่วนที่แห้ง และส่วนที่เป็นเส้นที่เทาจะเป็นส่วนที่เปียก และจุดสีดำที่อยู่ในแต่ละเส้น จะเป็นจุดแสดงให้เห็นที่ตำแหน่งที่ crib เริ่มเปียก หรือก็คือตำแหน่งที่ crib มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิหยดน้ำค้าง

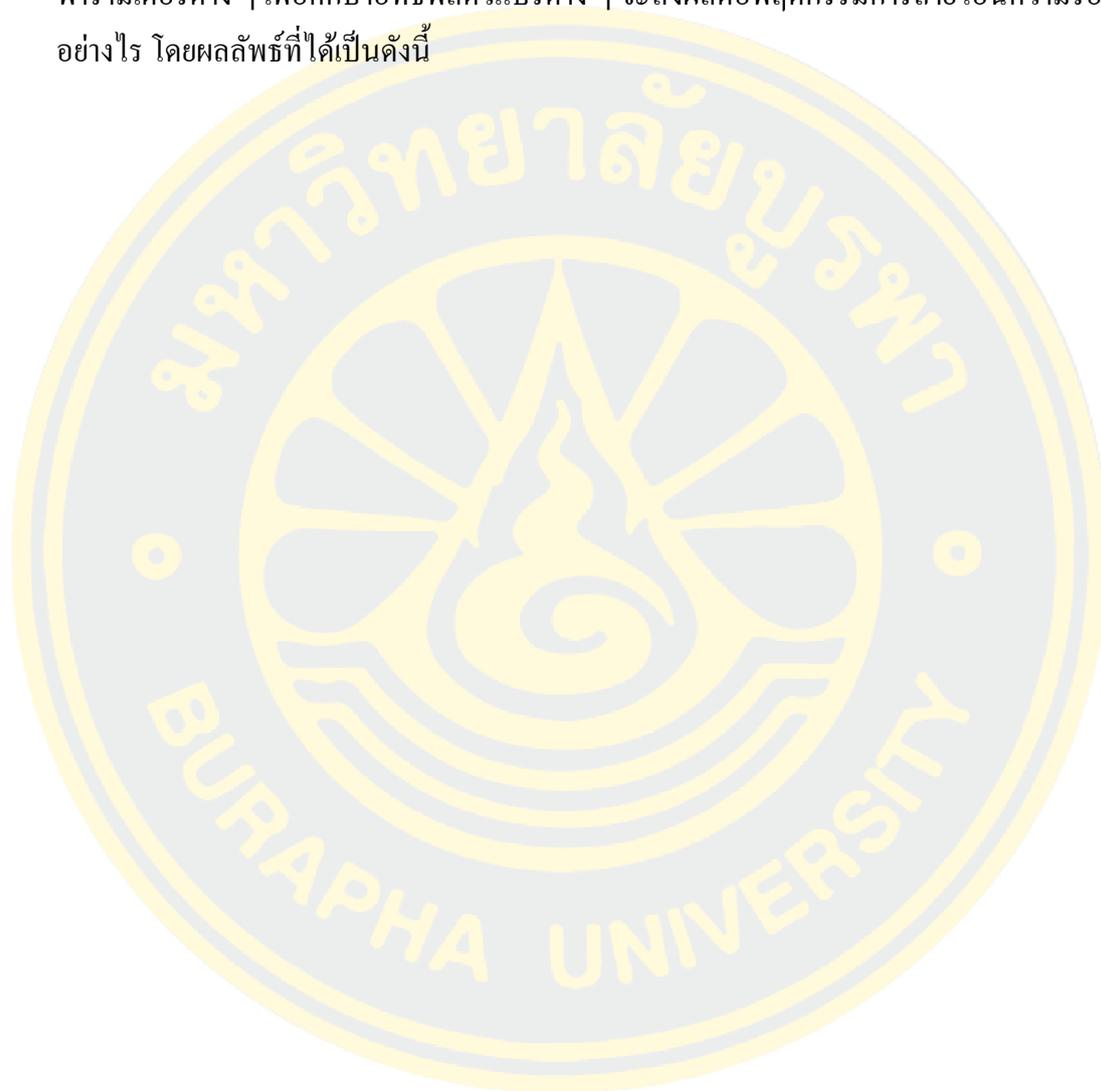
จากภาพสามารถบอกได้ว่า กราฟเส้นที่ดำที่สุดจะเป็น crib ที่กระจายอุณหภูมิจากฐาน crib ได้ดีที่สุด เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับฐาน crib ที่สุด หรือก็คือ เป็น crib ที่สามารถถ่ายโอนความร้อนจากฐาน crib ไปยังปลาย crib ได้ดีที่สุด โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าเป็น crib สีเหลืองที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ และ crib ที่กระจายอุณหภูมิได้ต่ำที่สุดจะเป็น crib พาราโบลาลังนิ้ว เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัด crib ลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างทองแดงกับolumiเนี่ยม พบว่า crib ทองแดงจะกระจายอุณหภูมิได้ดีกว่า เนื่องจากมีค่าการนำความร้อนสูงกว่า

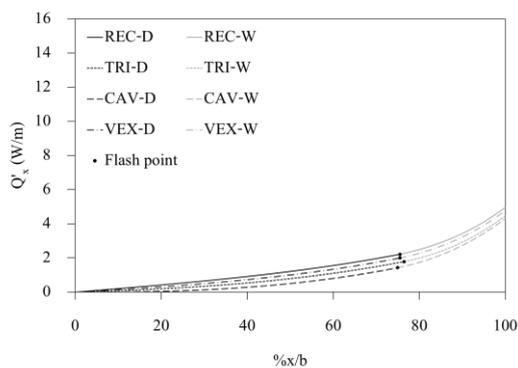
อัตราการถ่ายโอนความร้อน (HEAT TRANSFER RATE)

หัวข้อนี้จะนำเสนออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของ crib เปียกบางส่วนทั้งชิ้น และอัตราการถ่ายโอนความร้อนสะสมในแต่ละตำแหน่งตั้งแต่ปลาย crib จนถึงฐาน crib โดยมีผลลัพธ์ที่ได้ดังนี้

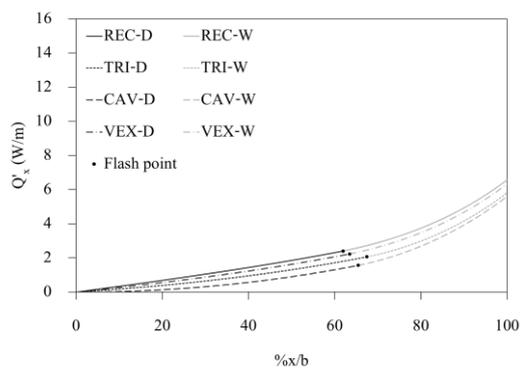
1. อัตราการถ่ายโอนความร้อนสะสมในแต่ละตำแหน่ง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมในถ่ายโอนความร้อนของครีบน้ำในตำแหน่ง โดยรูปแบบในการนำเสนอจะใกล้เคียงกับการกระจายอุณหภูมิตามความยาวครีบน้ำ แต่จะมีการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรต่าง ๆ จะส่งผลต่อพฤติกรรมถ่ายโอนความร้อนอย่างไร โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังนี้

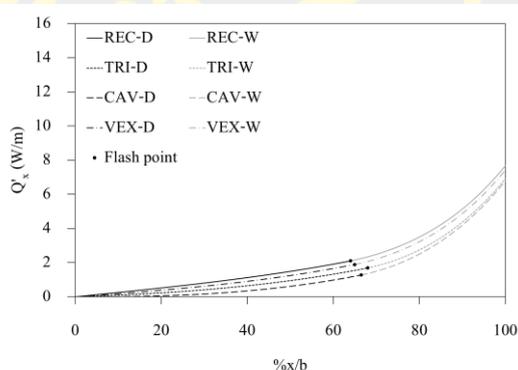




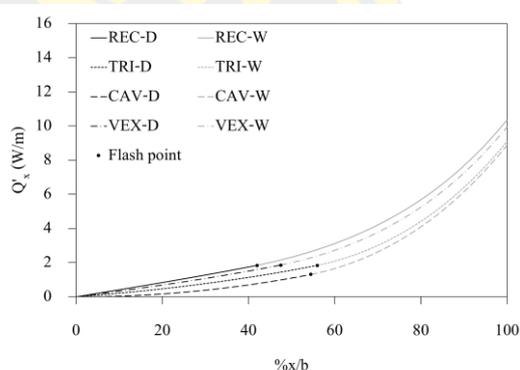
(a) ครีบบลูมิเนียมที่อุณหภูมิอากาศ 28 °C



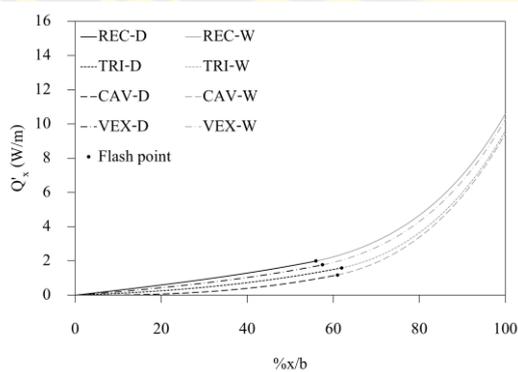
(b) ครีบทองแดงที่อุณหภูมิอากาศ 28 °C



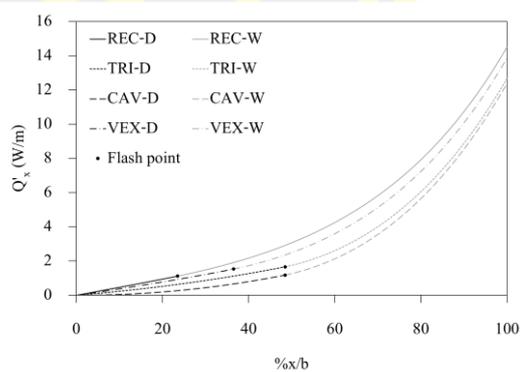
(d) ครีบบลูมิเนียมที่อุณหภูมิอากาศ 29 °C



(e) ครีบทองแดงที่อุณหภูมิอากาศ 29 °C



(f) ครีบบลูมิเนียมที่อุณหภูมิอากาศ 30 °C



(g) ครีบทองแดงที่อุณหภูมิอากาศ 30 °C

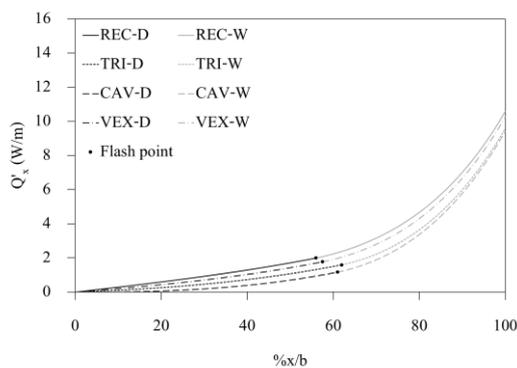
ภาพที่ 38 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบนแต่ละตำแหน่ง

จากภาพที่ 38 เส้นสีดำที่ปรากฏในกราฟจะเป็นครีบบในส่วนที่แห้ง เส้นสีเทาจะเป็นครีบบในส่วนที่เปียก และจุดสีดำจะแสดงตำแหน่งที่ครีบบเริ่มเปียก และพบว่าครีบบสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด จากนั้นจะเป็นครีบบพาราโบลาโค้งนูน ครีบบสามเหลี่ยม และครีบบพาราโบลาโค้งเว้า ตามลำดับ

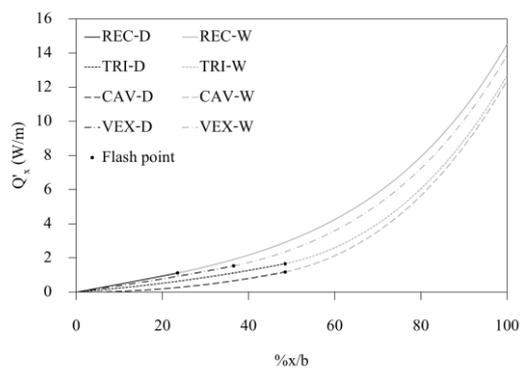
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศ จากค่าเริ่มต้น $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปรับลดลงพบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะลดลง เนื่องจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิและเอนทัลปีของครีบบกับอากาศลดลง จึงส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในส่วนที่แห้งของครีบบลูมิเนียมที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบบสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 29.72% ครีบบสามเหลี่ยม 26.60% พาราโบลาโค้งเว้า 28.55% และพาราโบลาโค้งนูน 29.47% และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบบสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 27.29% ครีบบสามเหลี่ยม 24.56% พาราโบลาโค้งเว้า 27.77% และพาราโบลาโค้งนูน 27.94% และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 80% ของครีบบ พบว่าครีบบลูมิเนียมสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 46.81% ครีบบสามเหลี่ยม 45.38% พาราโบลาโค้งเว้า 48.45% และพาราโบลาโค้งนูน 47.17% และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบบสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 52.84% ครีบบสามเหลี่ยม 50.50% พาราโบลาโค้งเว้า 52.34% และพาราโบลาโค้งนูน 52.04%

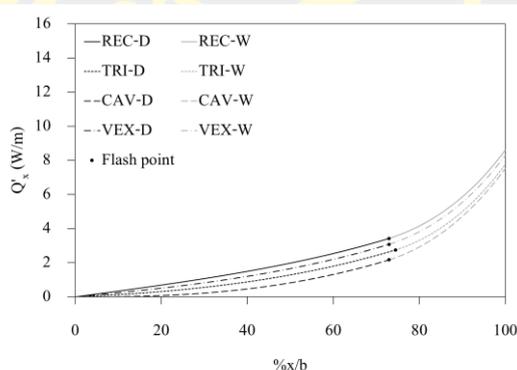
เมื่อเปรียบเทียบครีบบที่ทำจากวัสดุต่างกันที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดงในครีบบทุกรูปร่าง โดยครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 36.52% ในครีบบสีเหลือง 50.05% ในครีบบสามเหลี่ยม 65.09% ในครีบบพาราโบลาโค้งเว้า และ 43.52% ในพาราโบลาโค้งนูน และในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง 80% ครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 41.04% ในครีบบสีเหลือง 39.75% ในครีบบสามเหลี่ยม 40.24% ในครีบบพาราโบลาโค้งเว้า และ 40.46% ในพาราโบลาโค้งนูน



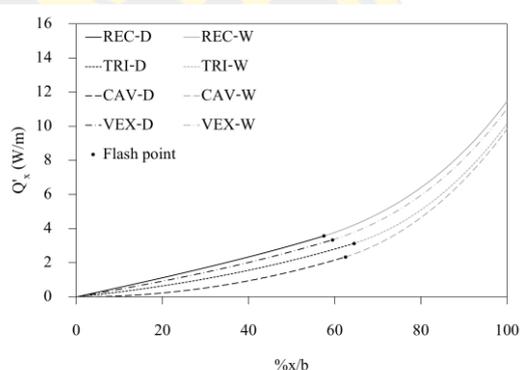
(a) ครีบอลูมิเนียมที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0.90



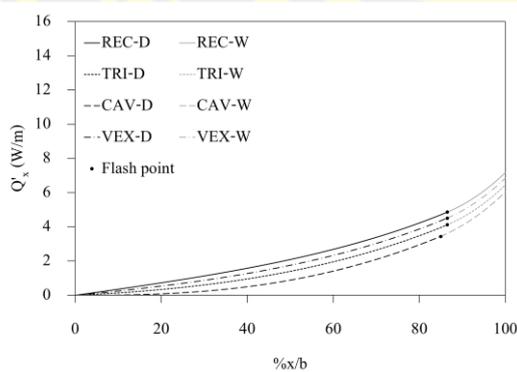
(b) ครีบทองแดงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0.90



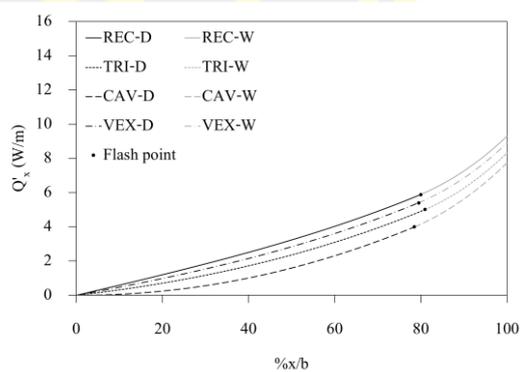
(d) ครีบอลูมิเนียมที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0.85



(e) ครีบทองแดงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0.85



(f) ครีบอลูมิเนียมที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0.80



(g) ครีบทองแดงที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0.80

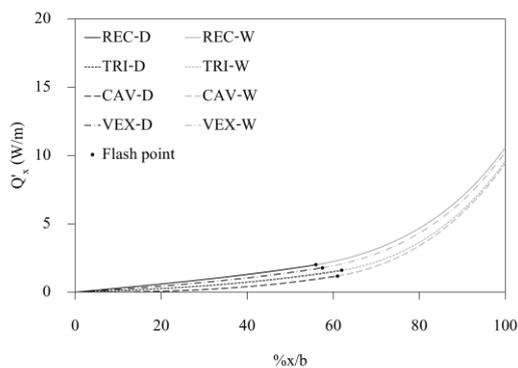
ภาพที่ 39 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบนแต่ละตำแหน่ง

จากภาพที่ 39 เส้นสีดำที่ปรากฏในกราฟจะเป็นครีบบนส่วนที่แห้ง เส้นสีเทาจะเป็นครีบบนส่วนที่เปียก และจุดสีดำจะแสดงตำแหน่งที่ครีบบริเริ่มเปียก และพบว่าครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด จากนั้นจะเป็นครีบบาราโบลาคั้งนูน ครีบบสามเหลี่ยม และครีบบาราโบลาคั้งเว้า ตามลำดับ

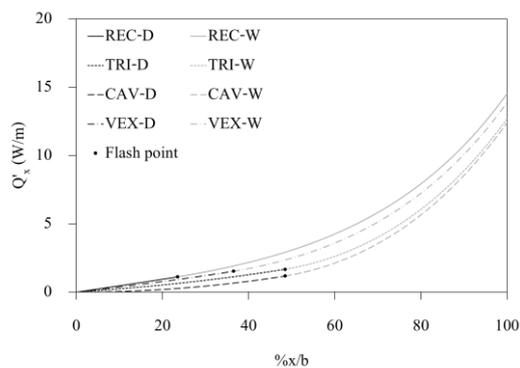
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ จากค่าเริ่มต้น 0.90 และปรับลดลงพบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้นในช่วงแห้ง เนื่องจากการที่ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงส่งผลให้อุณหภูมิหยดน้ำค้างของอากาศลดลงด้วยเช่นกันตามแผนภูมิไซโครเมตริก (ภาพที่ 18) ทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิหยดน้ำค้างกับอากาศเพิ่มขึ้น (θ_{dp} ตามสมการที่ 3-7) จึงส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะตรงกันข้ามกับในช่วงเปียก การที่ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศลดลง ทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิฐานครีบบกับอากาศลดลง (γ_b ในสมการที่ 3-14) จึงส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.80 ในส่วนที่แห้งของครีบบลูมิเนียมที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น 21.75% ครีบบสามเหลี่ยม 30.24% พาราโบลาคั้งเว้า 24.97% และพาราโบลาคั้งนูน 22.47% และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น 26.85% ครีบบสามเหลี่ยม 35.42% พาราโบลาคั้งเว้า 26.94% และพาราโบลาคั้งนูน 25.83% และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 90% ของครีบบ พบว่าครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 24.58% ครีบบสามเหลี่ยม 24.05% พาราโบลาคั้งเว้า 29.50% และพาราโบลาคั้งนูน 25.84% และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 32.41% ครีบบสามเหลี่ยม 29.45% พาราโบลาคั้งเว้า 34.14% และพาราโบลาคั้งนูน 31.98%

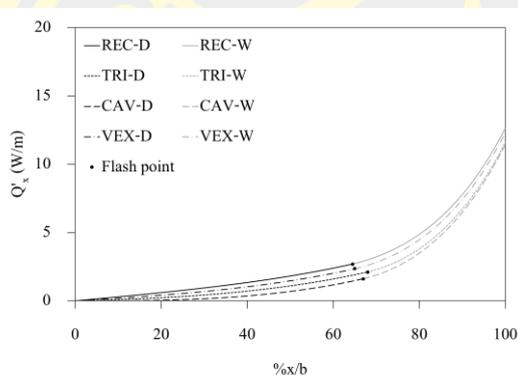
เมื่อเปรียบเทียบครีบบที่ทำจากวัสดุต่างกันที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.90 ที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดงในครีบบทุกรูปร่าง โดยครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 36.52% ในครีบลี้น 50.05% ในครีบบสามเหลี่ยม 65.09% ในครีบบพาราโบลาคั้งเว้า และ 43.52% ในพาราโบลาคั้งนูน และในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง 90% ครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 34.71% ในครีบลี้น 32.56% ในครีบบสามเหลี่ยม 32.32% ในครีบบพาราโบลาคั้งเว้า และ 33.80% ในพาราโบลาคั้งนูน



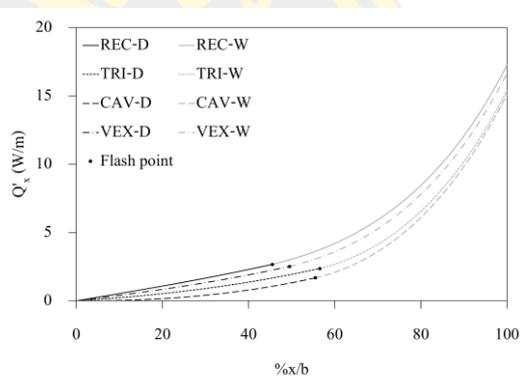
(a) ครีบอลูมิเนียมที่ความเร็วอากาศ 5 m/s



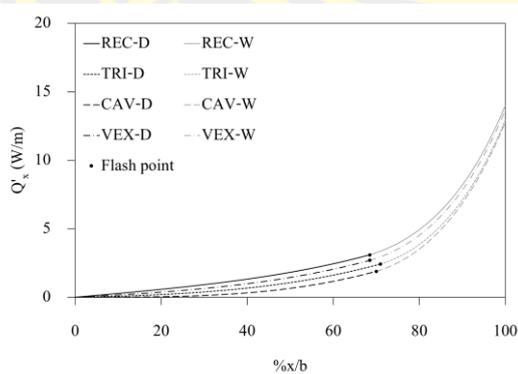
(b) ครีบทองแดงที่ความเร็วอากาศ 5 m/s



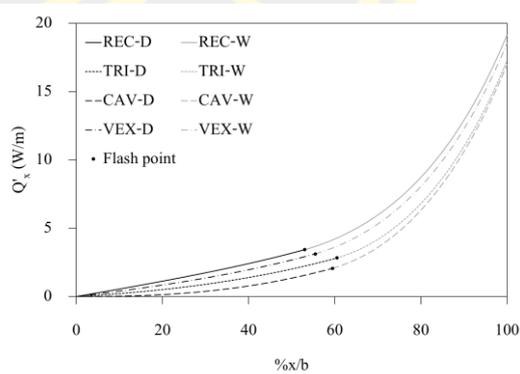
(d) ครีบอลูมิเนียมที่ความเร็วอากาศ 10 m/s



(e) ครีบทองแดงที่ความเร็วอากาศ 10 m/s



(f) ครีบอลูมิเนียมที่ความเร็วอากาศ 15 m/s



(g) ครีบทองแดงที่ความเร็วอากาศ 15 m/s

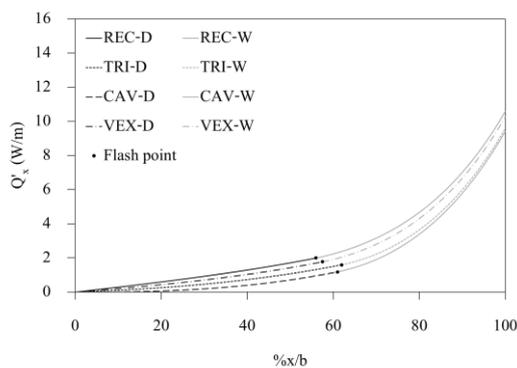
ภาพที่ 40 อิทธิพลของความเร็วอากาศต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบนแต่ละตำแหน่ง

จากภาพที่ 40 เส้นสีดำที่ปรากฏในกราฟจะเป็นครีบบนส่วนที่แห้ง เส้นสีเทาจะเป็นครีบบนส่วนที่เปียก และจุดสีดำจะแสดงตำแหน่งที่ครีบบริเริ่มเปียก และพบว่าครีบบีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด จากนั้นจะเป็นครีบบาราโบลาค้างนอน ครีบบสามเหลี่ยม และครีบบาราโบลาค้างเว้า ตามลำดับ

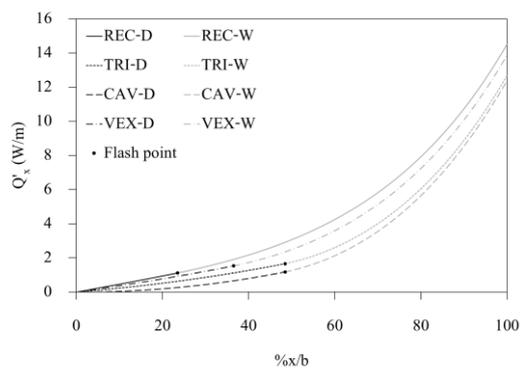
จากสมการที่ 3-3 จะเป็นการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ที่เป็นฟังก์ชันของ Reynolds number และ Prandtl number ในการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ Reynold number จะแปรผันตรงกับความเร็วมวลอากาศ การเพิ่มขึ้นของ Reynolds number จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวแปร M_T ที่อยู่ในสมการการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 40

เมื่อพิจารณาที่การเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศจาก 5 เป็น 10 m/s บนครีบบลูมิเนียม พบว่าในช่วง 21% แรกของครีบบีเหลือง สภาวะที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 5 m/s จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าครีบบภายใต้ความเร็วอากาศ 10 m/s และหลังจากจุดที่ 21.0% เป็นต้น ไปจนถึงที่ฐานครีบบ ครีบบีเหลืองในสภาวะความเร็วอากาศ 10 m/s จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าสภาวะ 5 m/s และเช่นเดียวกันในครีบบลูมิเนียมรูปร่างอื่น ๆ ที่ความเร็วอากาศ 5 m/s ในช่วง 47.5% แรกในครีบบสามเหลี่ยม 55.0% แรกในครีบบาราโบลาค้างเว้า และ 43.0% แรกในครีบบาราโบลาค้างนอน ในสภาวะ 5 m/s จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าที่ 10 m/s และหลังจากจุดที่กล่าวมา ครีบบที่อยู่ในสภาวะ 10 m/s จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าที่ 5 m/s และเมื่อพิจารณาที่การเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศจาก 5 เป็น 15 m/s บนครีบบทองแดง พบว่าในช่วง 55.5-64.0% ของครีบบีเหลือง ช่วง 0-24.5% ของครีบบสามเหลี่ยม ช่วง 0-43.0% และ 59.5-68.0 ของครีบบาราโบลาค้างเว้า จะเป็นช่วงที่ครีบบที่อยู่ภายใต้ความเร็วอากาศ 5 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าเล็กน้อย และส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่ครีบบภายใต้ความเร็วอากาศ 15 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่า

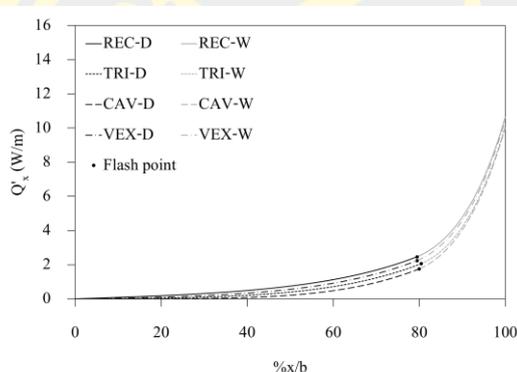
เมื่อเปรียบเทียบครีบบที่ทำจากวัสดุต่างกันที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 5 m/s ที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดงในครีบบทุกรูปร่าง โดยครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 36.52% ในครีบบีเหลือง 50.05% ในครีบบสามเหลี่ยม 65.09% ในครีบบาราโบลาค้างเว้า และ 43.52% ในพาราโบลาค้างนอน และที่ตำแหน่ง 90% จะเป็น 34.71% ในครีบบีเหลือง 32.56% ในครีบบสามเหลี่ยม 32.32% ในครีบบาราโบลาค้างเว้า และ 33.80% ในพาราโบลาค้างนอน



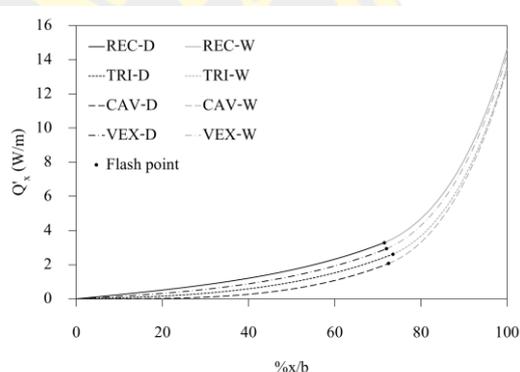
(a) วัสดุฉนวนที่ความยาวครีป 3 cm



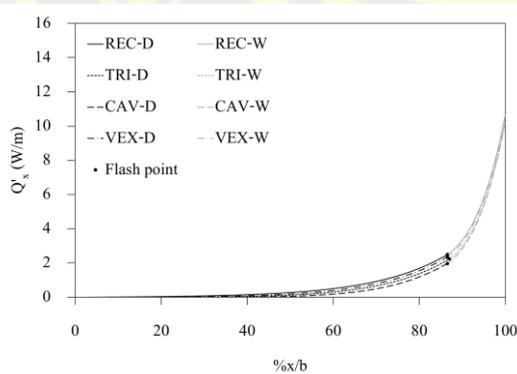
(b) วัสดุทองแดงที่ความยาวครีป 3 cm



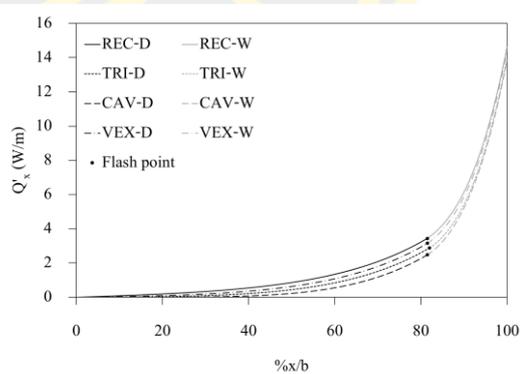
(c) วัสดุฉนวนที่ความยาวครีป 6 cm



(d) วัสดุทองแดงที่ความยาวครีป 6 cm



(e) วัสดุฉนวนที่ความยาวครีป 9 cm



(f) วัสดุทองแดงที่ความยาวครีป 9 cm

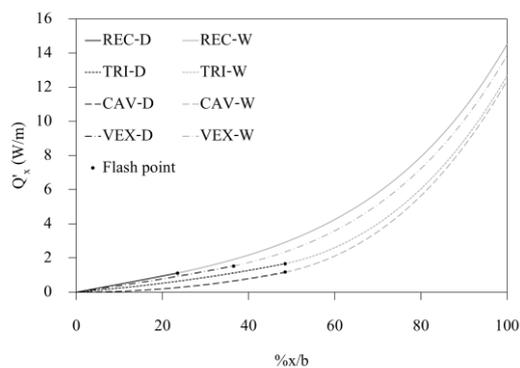
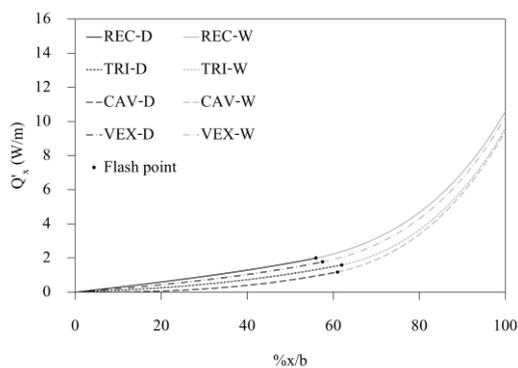
ภาพที่ 41 อิทธิพลของความยาวครีปต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีปในแต่ละตำแหน่ง

จากภาพที่ 41 เส้นสีดำที่ปรากฏในกราฟจะเป็นครีบบนส่วนที่แห้ง เส้นสีเทาจะเป็นครีบบนส่วนที่เปียก และจุดสีดำจะแสดงตำแหน่งที่ครีบบริเริ่มเปียก และพบว่าครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด จากนั้นจะเป็นครีบบาราโบลาคั้งนูน ครีบบสามเหลี่ยม และครีบบาราโบลาคั้งเว้า ตามลำดับ

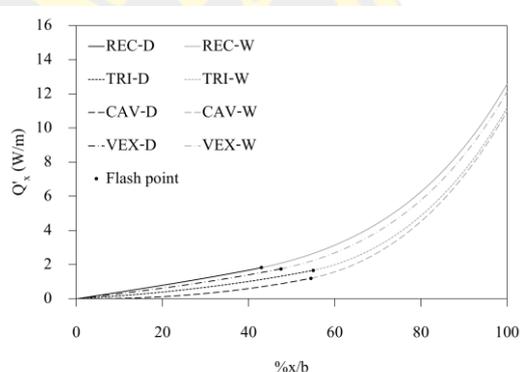
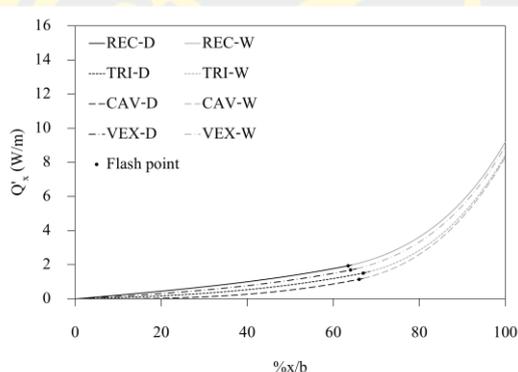
เมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของความยาวครีบบ จากค่าเริ่มต้น 3 cm พบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ฐานครีบบจะเพิ่มขึ้น แต่ที่ตำแหน่งใด ๆ พบว่าครีบบที่ยาวมากกว่าจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่า เนื่องจากการที่ครีบบยาวขึ้นจะส่งผลให้ครีบบสัมผัสกับอากาศมากขึ้น ทำให้การกระจายอุณหภูมิโน้มไปใกล้กับอุณหภูมิของอากาศ ทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิและเอนทัลปีของอากาศกับครีบบลดลง ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในแต่ละตำแหน่งน้อยลง แต่เมื่อคิดอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบบทั้งชิ้น ครีบบที่ยาวกว่าจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่า

เมื่อพิจารณาที่ความยาวครีบบเท่ากับ 6 cm ในส่วนที่แห้งของครีบบลูมิเนียมที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 69.58% ครีบบสามเหลี่ยม 85.68% บาราโบลาคั้งเว้า 95.10% และบาราโบลาคั้งนูน 78.74% และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 45.59% ครีบบสามเหลี่ยม 70.02% บาราโบลาคั้งเว้า 87.37% และบาราโบลาคั้งนูน 59.09% และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 90% ของครีบบ พบว่าครีบบลูมิเนียมลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 31.91% ครีบบสามเหลี่ยม 29.74% บาราโบลาคั้งเว้า 30.10% และบาราโบลาคั้งนูน 31.45% และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 24.53% ครีบบสามเหลี่ยม 20.45% บาราโบลาคั้งเว้า 20.24% และบาราโบลาคั้งนูน 23.15%

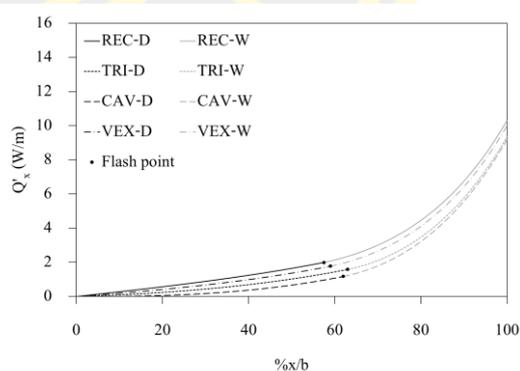
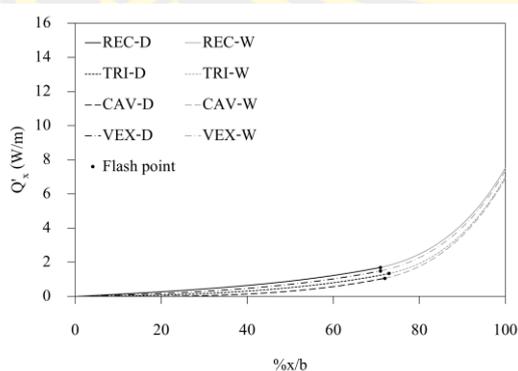
เมื่อเปรียบเทียบครีบบที่ทำจากวัสดุต่างกันที่ความยาวครีบบเท่ากับ 3 cm ที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดงในครีบบทุกรูปร่าง โดยครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 36.52% ในครีบลี้น 50.05% ในครีบบสามเหลี่ยม 65.09% ในครีบบบาราโบลาคั้งเว้า และ 43.52% ในบาราโบลาคั้งนูน และในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง 90% ครีบบลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 34.71% ในครีบลี้น 32.56% ในครีบบสามเหลี่ยม 32.32% ในครีบบบาราโบลาคั้งเว้า และ 33.80% ในบาราโบลาคั้งนูน



(a) คีร์บอคูมิเนียมความหนาฐานคีร์บ 0.100 mm (b) คีร์บทองแดงความหนาฐานคีร์บ 0.100 mm



(c) คีร์บอคูมิเนียมความหนาฐานคีร์บ 0.075 mm (d) คีร์บทองแดงความหนาฐานคีร์บ 0.075 mm



(e) คีร์บอคูมิเนียมความหนาฐานคีร์บ 0.050 mm (f) คีร์บทองแดงความหนาฐานคีร์บ 0.050 mm

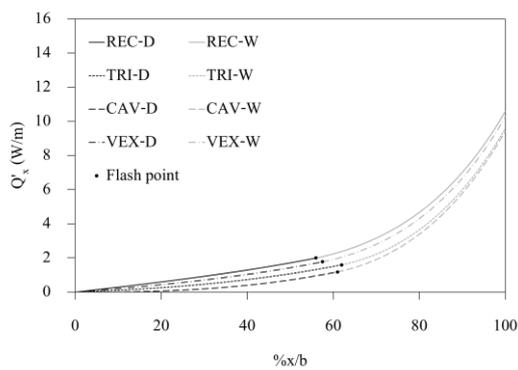
ภาพที่ 42 อิทธิพลของความหนาฐานคีร์บต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของคีร์บในแต่ละตำแหน่ง

จากภาพที่ 42 เส้นสีดำที่ปรากฏในกราฟจะเป็นครีบในส่วนที่แห้ง เส้นสีเทาจะเป็นครีบในส่วนที่เปียก และจุดสีดำจะแสดงตำแหน่งที่ครีบเริ่มเปียก และพบว่าครีบสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด จากนั้นจะเป็นครีบพาราโบลาโค้งนูน ครีบสามเหลี่ยม และครีบพาราโบลาโค้งเว้า ตามลำดับ

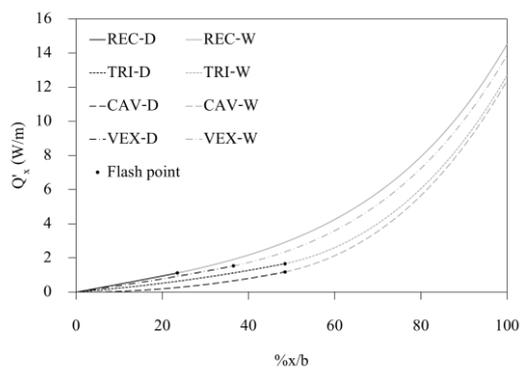
เมื่อปรับความหนาของฐานครีบลง จากค่าเริ่มต้น 0.1 mm พบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ จะลดลง รวมถึงอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบทั้งชิ้น เนื่องจากการที่ฐานครีบบางลง ทำให้พื้นที่ในการนำความร้อนจากฐานครีบสู่ครีบลดลง ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบในแต่ละตำแหน่ง และอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมลดลง ตามสมการการถ่ายโอนความร้อนที่ 3-20 3-30 3-42 และ 3-54

เมื่อพิจารณาที่ความหนาฐานครีบเท่ากับ 0.075 mm ในส่วนที่แห้งของครีบอลูมิเนียมที่ตำแหน่ง 20% ของครีบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 24.69% ครีบสามเหลี่ยม 33.54% พาราโบลาโค้งเว้า 44.49% และพาราโบลาโค้งนูน 29.01% และในทำนองเดียวกันในครีบทองแดง ครีบสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 16.09% ครีบสามเหลี่ยม 24.35% พาราโบลาโค้งเว้า 35.29% และพาราโบลาโค้งนูน 20.31% และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 90% ของครีบ พบว่าครีบอลูมิเนียมสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 18.35% ครีบสามเหลี่ยม 17.61% พาราโบลาโค้งเว้า 17.60% และพาราโบลาโค้งนูน 18.16% และในทำนองเดียวกันในครีบทองแดง ครีบสีเหลืองจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 17.34% ครีบสามเหลี่ยม 15.81% พาราโบลาโค้งเว้า 15.62% และพาราโบลาโค้งนูน 16.58%

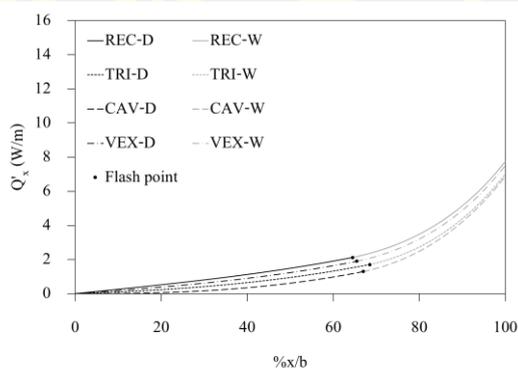
เมื่อเปรียบเทียบครีบที่ทำจากวัสดุต่างกันที่ความหนาฐานครีบเท่ากับ 0.1 mm ที่ตำแหน่ง 20% ของครีบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบอลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบทองแดงในครีบทุกรูปร่าง โดยครีบอลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบทองแดง 36.52% ในครีบสีเหลือง 50.05% ในครีบสามเหลี่ยม 65.09% ในครีบพาราโบลาโค้งเว้า และ 43.52% ในพาราโบลาโค้งนูน และในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง 90% ครีบอลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบทองแดง 34.71% ในครีบสีเหลือง 32.56% ในครีบสามเหลี่ยม 32.32% ในครีบพาราโบลาโค้งเว้า และ 33.80% ในพาราโบลาโค้งนูน



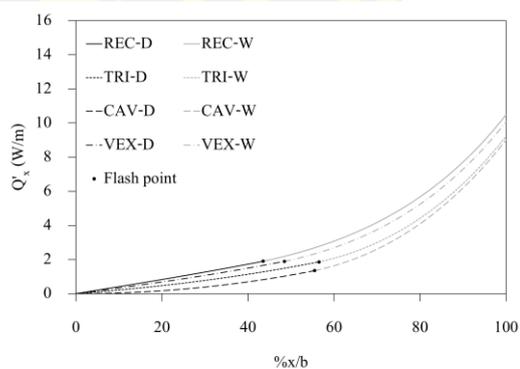
(a) ครีบบลูมึนเข้มที่อุณหภูมิฐานครีบบ 25 °C



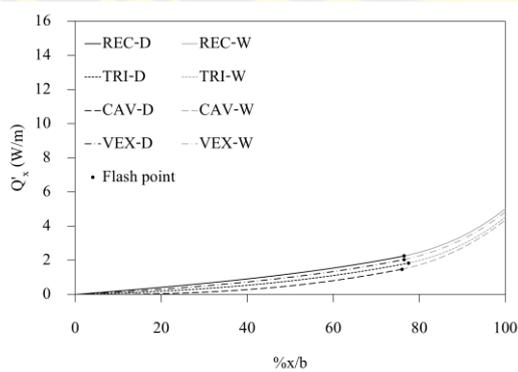
(b) ครีบทองแดงที่อุณหภูมิฐานครีบบ 25 °C



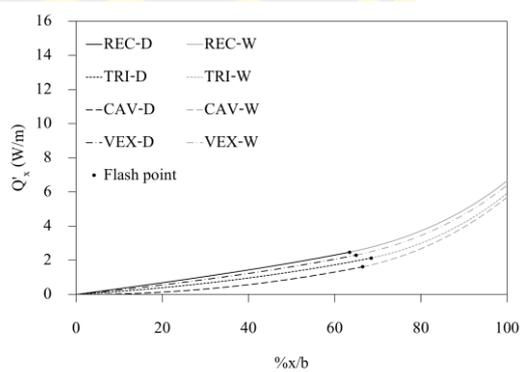
(c) ครีบบลูมึนเข้มที่อุณหภูมิฐานครีบบ 26 °C



(d) ครีบทองแดงที่อุณหภูมิฐานครีบบ 26 °C



(e) ครีบบลูมึนเข้มที่อุณหภูมิฐานครีบบ 27 °C



(f) ครีบทองแดงที่อุณหภูมิฐานครีบบ 27 °C

ภาพที่ 43 อิทธิพลของอุณหภูมิฐานครีบบต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบในแต่ละตำแหน่ง

จากภาพที่ 43 เส้นสีดำที่ปรากฏในกราฟจะเป็นครีบบนส่วนที่แห้ง เส้นสีเทาจะเป็นครีบบนส่วนที่เปียก และจุดสีดำจะแสดงตำแหน่งที่ครีบบริเริ่มเปียก และพบว่าครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด จากนั้นจะเป็นครีบบาราโบลาค้างนอน ครีบบสามเหลี่ยม และครีบบาราโบลาค้างเว้า ตามลำดับ

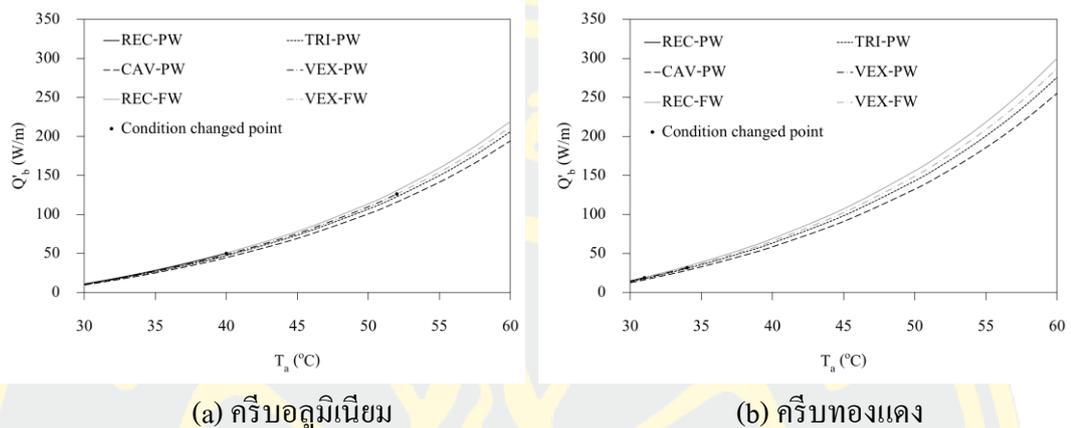
เมื่อปรับอุณหภูมิที่ฐานครีบบให้สูงขึ้น จากค่าเริ่มต้น 25°C พบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ตำแหน่งใด ๆ จะลดลง รวมถึงอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบบทั้งชิ้น เนื่องจากการที่อุณหภูมิของฐานครีบบเข้าใกล้อุณหภูมิของอากาศ จะทำให้ผลต่างอุณหภูมิและผลต่างของเอนทัลปีระหว่างฐานครีบบกับอากาศ (γ_b) ลดลง ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีบบในแต่ละตำแหน่ง และอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมลดลง

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิฐานครีบบเท่ากับ 26°C ของครีบบอลูมิเนียมที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 13.59% ครีบบสามเหลี่ยม 11.90% บาราโบลาค้างเว้า 13.07% และบาราโบลาค้างนอน 13.50% และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 11.99% ครีบบสามเหลี่ยม 10.77% บาราโบลาค้างเว้า 12.69% และบาราโบลาค้างนอน 12.57% และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 90% ของครีบบ พบว่าครีบบอลูมิเนียมลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 26.64% ครีบบสามเหลี่ยม 26.71% บาราโบลาค้างเว้า 27.19% และบาราโบลาค้างนอน 26.76% และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบลี้นจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนลดลง 28.18% ครีบบสามเหลี่ยม 27.36% บาราโบลาค้างเว้า 27.47% และบาราโบลาค้างนอน 27.59%

เมื่อเปรียบเทียบครีบบที่ทำจากวัสดุต่างกันที่อุณหภูมิฐานครีบบเท่ากับ 25°C ที่ตำแหน่ง 20% ของครีบบแต่ละรูปร่าง พบว่าครีบบอลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดงในครีบบทุกรูปร่าง โดยครีบบอลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 36.52% ในครีบลี้น 50.05% ในครีบบสามเหลี่ยม 65.09% ในครีบบบาราโบลาค้างเว้า และ 43.52% ในบาราโบลาค้างนอน และในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง 90% ครีบบอลูมิเนียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าครีบบทองแดง 34.71% ในครีบลี้น 32.56% ในครีบบสามเหลี่ยม 32.32% ในครีบบบาราโบลาค้างเว้า และ 33.80% ในบาราโบลาค้างนอน

2. อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบทั้งขึ้น

เมื่อนำพารามิเตอร์ตามที่กล่าวข้างต้น ในบทที่ 4 เข้าไปในโปรแกรมคำนวณ แล้วปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังนี้



ภาพที่ 44 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม

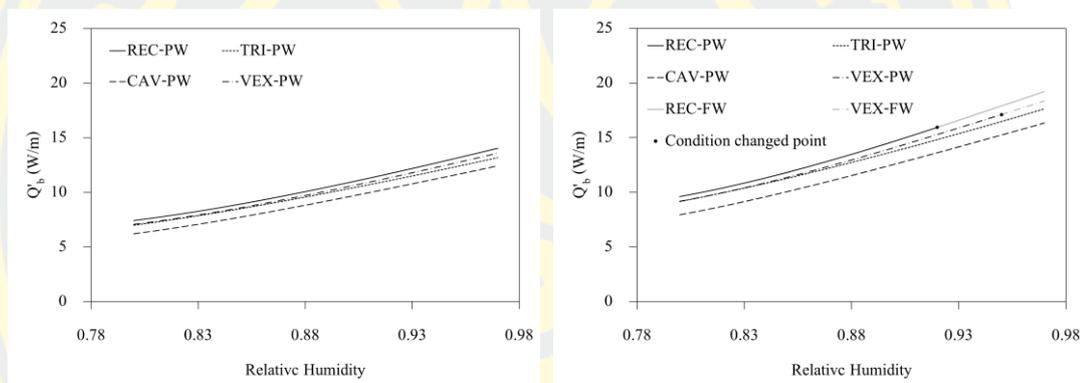
จากภาพที่ 44 เส้นสีดำจะเป็นครีบในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบเปลี่ยนสภาวะจากครีบเปียกบางส่วนเป็นครีบเปียกทั้งหมด โดยครีบที่สามารถเปลี่ยนเป็นสภาวะผิวเปียกบางส่วนจะมีครีบสี่เหลี่ยม และครีบพาราโบลาโค้งนูน และพบว่าที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ 35°C ครีบทองแดงจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมดในขณะที่ครีบอลูมิเนียมเป็นผิวเปียกบางส่วน เนื่องจากครีบทองแดงกระจายอุณหภูมิได้ดีกว่า

เมื่อปรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขึ้นเรื่อย ๆ พบว่าผลต่างของอุณหภูมิกับแอนทัลปีของอากาศและครีบจะต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 44

จากกราฟของครีบอลูมิเนียม พบว่าที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ 30°C ครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 3.41% 5.49% และ 13.46% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ 60°C ครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 3.45% 6.48% และ 12.94% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในครีบทองแดง ที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ 30°C ครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม

และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 4.17% 6.71% และ 16.94% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ 60 °C ครีบลีเหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบาราโบลาค้างนอน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 4.65% 9.00% และ 17.69% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบครีบลีเหลี่ยมที่มีรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ 30 °C ครีบลีเหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาค้างเว้า และพาราโบลาค้างนอน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 34.97% 33.43% 30.95% และ 33.98% ตามลำดับ และอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 60 °C ครีบลีเหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาค้างเว้า และพาราโบลาค้างนอน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 36.88% 33.72% 31.36% และ 35.31% ตามลำดับ



(a) ครีบอลูมิเนียม

(b) ครีบทองแดง

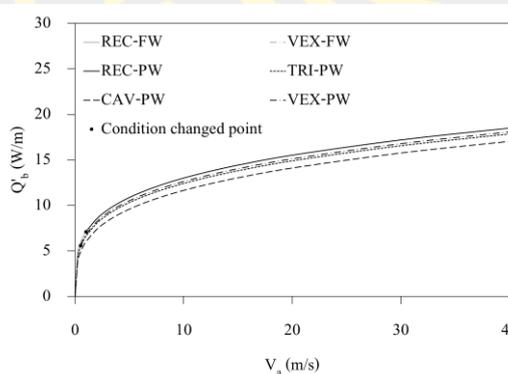
ภาพที่ 45 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม

จากภาพที่ 45 เส้นสีดำจะเป็นครีบลีเหลี่ยมในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบลีเหลี่ยมเปลี่ยนสภาวะจากครีบลีเหลี่ยมเปียกบางส่วนเป็นครีบลีเหลี่ยมเปียกทั้งหมด โดยครีบลีเหลี่ยมที่สามารถเปลี่ยนเป็นสภาวะผิวเปียกบางส่วนจะมีครีบลีเหลี่ยม และครีบบาราโบลาค้างนอน ที่ทำจากทองแดงเท่านั้น เนื่องจากครีบทองแดงกระจายอุณหภูมิได้ดีกว่า

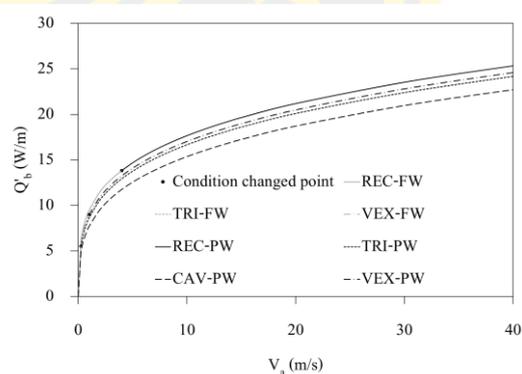
จากแผนภูมิไซโครเมตริก (ภาพที่ 18) จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิอากาศเท่าเดิม แต่มีความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้อากาศมีเอนทัลปีเพิ่มขึ้น หากให้การกระจายอุณหภูมิที่ครีบลีเหลี่ยมเดิม หรือก็คือมีเอนทัลปีเท่าเดิม แต่เอนทัลปีของอากาศเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้ผลต่างของเอนทัลปี (γ) ระหว่างครีบลีเหลี่ยมกับอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเพิ่มขึ้น ตามสมการที่

จากกราฟของครีบอลูมิเนียม พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.80 ครีบลีเยียมจะมี อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบาราโบล่าโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบล่าโค้งเว้า เป็น 4.82% 6.25% และ 19.52% ตามลำดับ และที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.90 ครีบลีเยียมจะมี อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบาราโบล่าโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบล่าโค้งเว้า เป็น 3.41% 5.49% และ 13.46% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในครีบทองแดง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 0.80 ครีบลีเยียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบาราโบล่าโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบล่าโค้งเว้า เป็น 4.57% 4.85% และ 21.16% ตามลำดับ และที่ความชื้น สัมพัทธ์เท่ากับ 0.90 ครีบลีเยียมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบาราโบล่าโค้ง นูน สามเหลี่ยม และพาราโบล่าโค้งเว้า เป็น 4.17% 6.71% และ 16.94% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบครีบลีเยียมที่มีรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่ความชื้น สัมพัทธ์เท่ากับ 0.80 ครีบลีเยียม สามเหลี่ยม พาราโบล่าโค้งเว้า และพาราโบล่าโค้งนูน ที่ทำจาก ทองแดง จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 29.53% 31.26% 27.84% และ 29.84% ตามลำดับ และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.90 ครีบลีเยียม สามเหลี่ยม พาราโบล่าโค้งเว้า และพาราโบล่าโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการถ่ายโอน ความร้อนมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 34.97% 33.43% 30.95% และ 33.98% ตามลำดับ



(a) ครีบอลูมิเนียม



(b) ครีบทองแดง

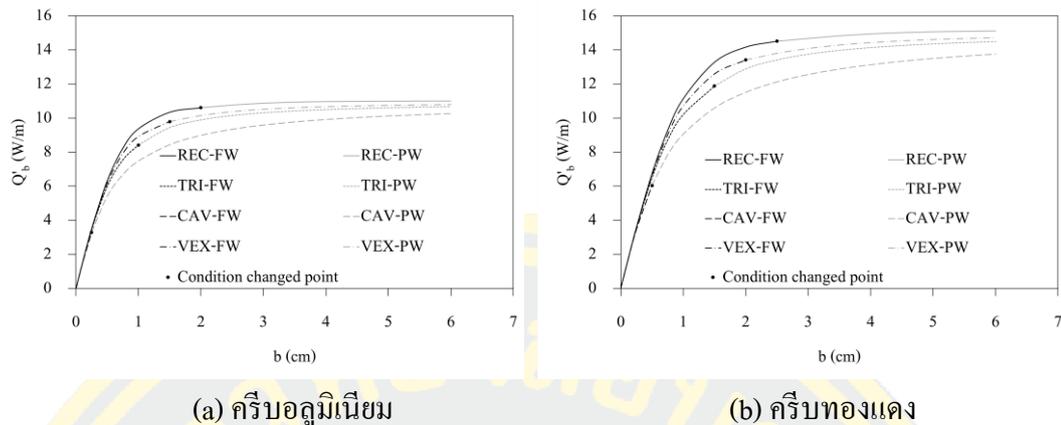
ภาพที่ 46 อิทธิพลของความเร็วของอากาศที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม

จากภาพที่ 46 เส้นสีดำจะเป็นครีบบนสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบบเปลี่ยนสภาวะจากครีบบเปียกบางส่วนเป็นครีบบเปียกทั้งหมด

จากสมการที่ 3-3 จะเห็นได้ว่าหากเพิ่มความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบ จะทำให้ Reynolds number เพิ่มขึ้น การที่ Reynolds number เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเพิ่มขึ้น และทำให้ตัวแปร M_T ที่อยู่ในสมการที่ 3-20 3-30 3-42 และ 3-54 ที่เป็นสมการการถ่ายโอนความร้อนรวมเพิ่มขึ้น หรือก็คือ หากเพิ่มความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านครีบบ จะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบบเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 46

จากกราฟของครีบบลูมิเนียม พบว่าที่ความเร็วเท่ากับ 5 m/s ครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 3.41% 5.49% และ 13.46% ตามลำดับ และที่ความเร็วเท่ากับ 10 m/s ครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 3.05% 4.90% และ 11.75% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ที่ความเร็วเท่ากับ 5 m/s ครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 4.17% 6.71% และ 16.94% ตามลำดับ และที่ความเร็วเท่ากับ 10 m/s ครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 3.71% 5.97% และ 14.95% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบครีบบที่มีรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่เร็วเท่ากับ 5 m/s ครีบบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 34.97% 33.43% 30.95% และ 33.98% ตามลำดับ และความเร็วเท่ากับ 10 m/s ครีบบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 35.68% 34.3% 31.90% และ 34.82% ตามลำดับ



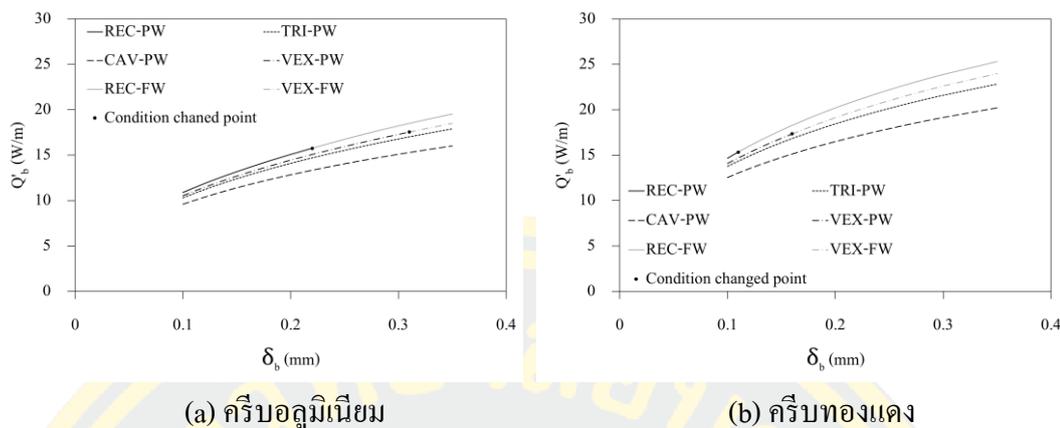
ภาพที่ 47 อิทธิพลของความยาวครีบบที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม

จากภาพที่ 47 ส่วนที่เป็นเส้นสีเทาเป็นส่วนที่ครีบบจะเป็นสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีดำเป็นแบบเปียกทั้งหมด และจุดสีดำเป็นจุดครีบบเปลี่ยนสภาวะจากครีบบเปียกทั้งหมดเป็นครีบบเปียกบางส่วน

จากภาพพบว่าเมื่อครีบบเปลี่ยนจากสภาวะเปียกทั้งหมดเป็นเปียกบางส่วน พบว่าความชันของครีบบจะลดลง และพบว่าครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากที่สุด จากนั้นเป็นครีบบพาราโบลาโค้งนูน ครีบบสามเหลี่ยม และครีบบพาราโบลาโค้งเว้า ตามลำดับ

ในช่วง 0 ถึง 0.5 cm อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบบจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความยาวของครีบบค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าความชันของครีบบพาราโบลาโค้งเว้าจะลดลงก่อนเป็นครีบบแรก เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของครีบบลดลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นเป็นครีบบสามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งนูน และสี่เหลี่ยมตามลำดับ เป็นไปตามสมการการนำความร้อน (สมการที่ 2-1)

เมื่อเปรียบเทียบครีบบสี่เหลี่ยมที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าเมื่อครีบบมีความยาว 0.5 cm ครีบบทองแดงจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบอลูมิเนียม 6.40% และเมื่อครีบบมีความยาว 6 cm ครีบบทองแดงจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบอลูมิเนียม 37.31% และเมื่อเปรียบเทียบครีบบที่ทำจากวัสดุเดียวกันครีบบสี่เหลี่ยมที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดกับครีบบพาราโบลาโค้งเว้าที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมต่ำสุด พบว่าครีบบสี่เหลี่ยมอลูมิเนียมมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งเว้าอลูมิเนียม 13.27% โดยเฉลี่ย และในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ครีบบสี่เหลี่ยมมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าพาราโบลาโค้งเว้า 14.40%

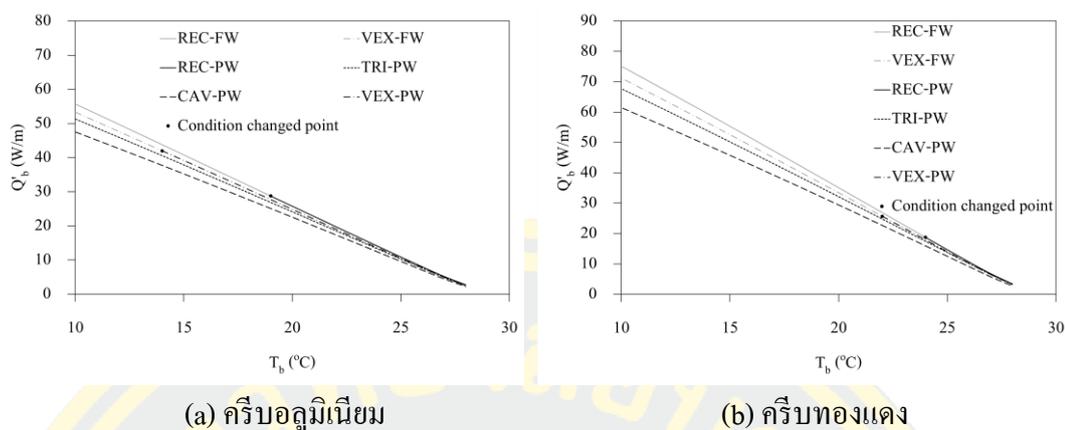


ภาพที่ 48 อิทธิพลของความหนาของฐานครีปที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม

จากภาพที่ 48 เส้นสีดำจะเป็นครีปในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำ จะเป็นจุดที่ครีปเปลี่ยนสภาวะจากครีปเปียกบางส่วนเป็นครีปเปียกทั้งหมด

พบว่าจะมีแค่ครีปสี่เหลี่ยม และครีปพาราโบลาโค้งนูนเท่านั้น ที่สามารถเปลี่ยนสภาวะเป็นผิวเปียกทั้งหมดได้ และครีบทองแดงจะเปลี่ยนเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมดได้ก่อนครีบอลูมิเนียมที่มีความหนาของฐานครีปเท่ากัน เนื่องจากทองแดงมีค่าการนำความร้อนสูงกว่า ทำให้อุณหภูมิของครีปมีค่าไม่ต่างจากอุณหภูมิที่ฐานครีปมากนัก

ในครีปที่ทำจากวัสดุเดียวกัน อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีปสี่เหลี่ยมจะลดลงช้ากว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนของครีปอื่น ๆ ที่พื้นที่หน้าตัดค่อย ๆ ลดลง ถึงแม้ว่าความหนาของฐานครีปจะเท่ากัน แต่หากพื้นที่หน้าตัดของครีปค่อย ๆ ลดลง อัตราการนำความร้อนจากฐานครีปสู่ครีปก็จะน้อยลงเรื่อย ๆ ตามสมการที่ 3-20 3-30 3-42 และ 3-54 พบว่าในครีบอลูมิเนียมที่มีความหนาของฐานครีป 0.1 mm ครีปสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีปพาราโบลาโค้งเว้าเพียง 13.46% และ 16.94% ในครีบทองแดง ส่วนที่ความหนาฐานครีป 0.3 mm ครีปสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีปพาราโบลาโค้งเว้าเพียง 21.79% และ 25.14% ในครีบทองแดง และที่ความหนา 0.1 mm ในครีปที่ใช้วัสดุต่างกัน ครีบทองแดงจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าครีบอลูมิเนียม 34.97% และ 31.19% ที่ความหนาของฐานครีปเท่ากับ 0.3 mm



ภาพที่ 49 อิทธิพลของอุณหภูมิฐานcribที่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม

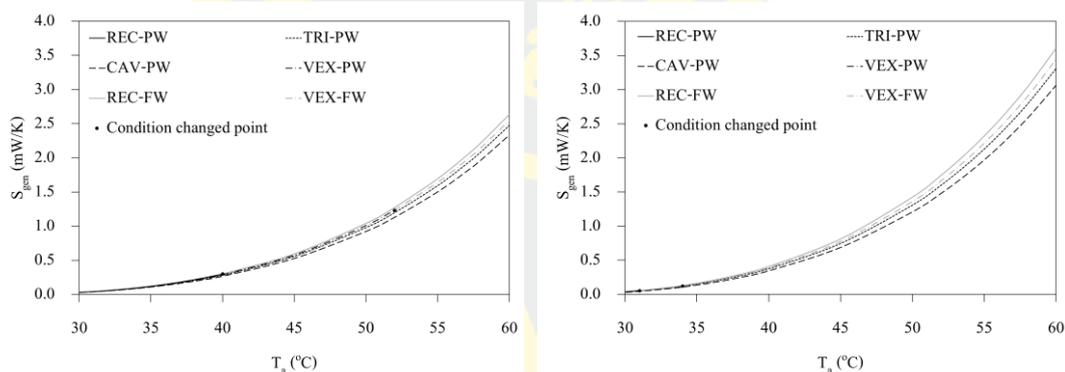
จากภาพที่ 49 เส้นสีดำจะเป็นcribในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำ จะเป็นจุดที่cribเปลี่ยนสภาวะจากcribเปียกบางส่วนเป็นcribเปียกทั้งหมด โดยcribที่สามารถเปลี่ยนเป็นสภาวะผิวเปียกบางส่วนจะมีcribสีเหลือง และcribพาราโบลาค้างนอน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างcribที่ทำจากวัสดุเดียวกัน cribsีเหลืองที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมสูงสุด ที่อุณหภูมิฐานcribเท่ากับ 10°C จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมกว่าcribพาราโบลาค้างนอนที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมต่ำสุดอยู่ที่ 17.17% และ 13.46% ที่อุณหภูมิฐานcribเท่ากับ 25°C และอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมจะเข้าใกล้ 0 เมื่ออุณหภูมิฐานcribเข้าใกล้อุณหภูมิอากาศ เนื่องจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิและเอนทัลปีเข้าใกล้ 0

เมื่อเปรียบเทียบcribที่ทำจากวัสดุต่างกัน ที่อุณหภูมิฐานcrib 10°C ในcribsีเหลืองที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมสูงสุด criบทองแดงจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าcriบอลูมิเนียม 48.79% และที่อุณหภูมิฐานcrib 25°C criบทองแดงจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าcriบอลูมิเนียม 34.97% ในขณะที่เดียวกัน ในcriบพาราโบลาค้างนอนที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมต่ำสุด ที่อุณหภูมิฐานcrib 10°C criบทองแดงจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าcriบอลูมิเนียม 42.21% และที่อุณหภูมิฐานcrib 25°C criบทองแดงจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมากกว่าcriบอลูมิเนียม 30.95%

อัตราการเกิดเอนโทรปี (ENTROPY GENERATION RATE)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี โดยใช้สมการที่ 3-61 ในกริบทุกรูปร่าง แต่ใช้สมการที่คำนวณอัตราถ่ายโอนความร้อนรวม (\dot{Q}'_b) ต่างกันตามแต่ละรูปร่าง โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นดังนี้



(a) กริบอลูมิเนียม

(b) กริปทองแดง

ภาพที่ 50 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี

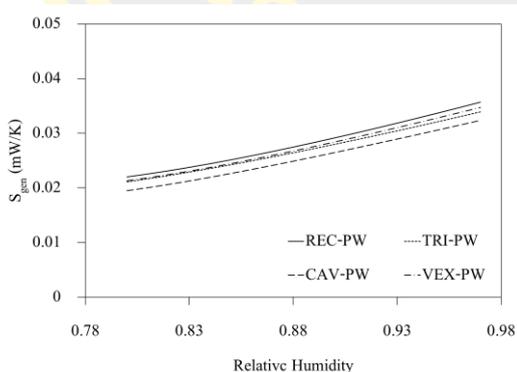
จากภาพที่ 50 เส้นสีดำจะเป็นกริบในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่กริบเปลี่ยนสภาวะจากกริบเปียกบางส่วนเป็นกริบเปียกทั้งหมด

จากภาพที่ 44 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเพิ่มขึ้นด้วย จากนั้นพิจารณาสมการที่ 3-61 ถึง 3-64 จะพบว่าอุณหภูมิของอากาศจะส่งผลโดยตรงกับหลายตัวแปร เริ่มจากตัวเลขเรย์โนลด์์ในสมการที่ 3-64 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศจะส่งผลให้ตัวเลขเรย์โนลด์์ลดลง การลดลงของตัวเลขเรย์โนลด์์จะทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่พื้นผิวเพิ่มขึ้น เมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงต้านอากาศเพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดลง การลดลงของความหนาแน่นอากาศทำให้แรงต้านอากาศลดลง โดยรวมแล้วแรงต้านอากาศจะมีค่าลดลงจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และเมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 ในพจน์ที่ 1 การลดลงของแรงต้านอากาศจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศ ส่งผลให้ผลรวมของพจน์ที่ 1 ของสมการที่ 3-61 ลดลง และเมื่อพิจารณาในพจน์ที่ 2 อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของกริบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้นตามที่กล่าวไปข้างต้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิอากาศที่เป็นตัวหารจะเพิ่มขึ้น แต่ผลรวมของพจน์ที่ 2 จะยังเพิ่มขึ้นเมื่อ

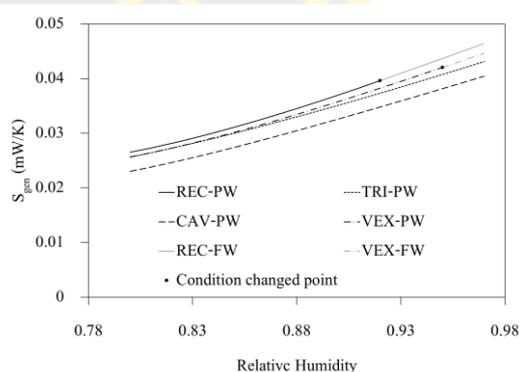
อุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น และพบว่าค่า θ_b จะมีค่าเป็นลบเสมอ ทำให้สมการที่ 3-61 อยู่ในรูปของผลรวมของพจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 ทำให้โดยรวมแล้วอัตราการเกิดเอนโทรปีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศเพิ่มขึ้น

จากกราฟของครีบอลูมิเนียม พบว่าที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครีบลีเยียมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบาราโบลาคังนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาคังเว้า เป็น 3.41% 4.19% และ 10.07% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครีบลีเยียมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบาราโบลาคังนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาคังเว้า เป็น 3.44% 6.47% และ 12.91% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในครีบทองแดง ที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครีบลีเยียมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบาราโบลาคังนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาคังเว้า เป็น 3.40% 5.43% และ 13.48% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครีบลีเยียมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบาราโบลาคังนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาคังเว้า เป็น 4.64% 8.99% และ 17.66% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบครีบลีเยียมที่มีรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครีบลีเยียม สามเหลี่ยม พาราโบลาคังเว้า และพาราโบลาคังนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 26.98% 25.47% 23.16% และ 26.01% ตามลำดับ และอุณหภูมิอากาศเท่ากับ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ครีบลีเยียม สามเหลี่ยม พาราโบลาคังเว้า และพาราโบลาคังนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 36.80% 33.64% 31.28% และ 35.23% ตามลำดับ



(a) ครีบอลูมิเนียม



(b) ครีบทองแดง

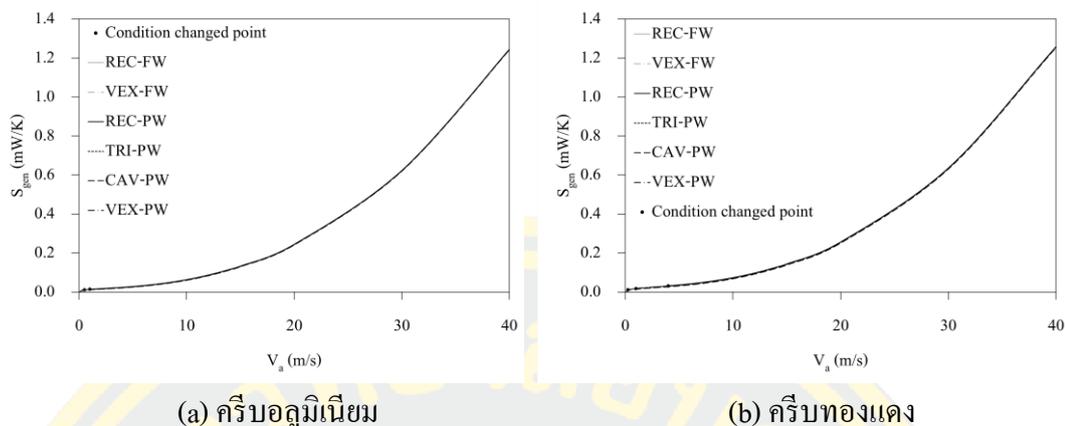
ภาพที่ 51 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 51 เส้นสีดำจะเป็นครีบบนสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบบเปลี่ยนสภาวะจากครีบบเปียกบางส่วนเป็นครีบบเปียกทั้งหมด โดยครีบบที่สามารถเปลี่ยนเป็นสภาวะผิวเปียกบางส่วนจะมีครีบบสีเหลือง และครีบบพาราโบลาค้างนูน ที่ทำจากทองแดงเท่านั้น

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 พบว่าความชื้นสัมพัทธ์จะมีผลกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ทำให้ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์มีรูปร่างคล้ายกับภาพที่ 45 และเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความชื้นสัมพัทธ์ จะแปรผันตรงกับอัตราการเกิดเอนโทรปี

จากกราฟของครีบบอลูมิเนียม พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.80 ครีบบสีเหลืองจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบพาราโบลาค้างนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาค้างเว้า เป็น 3.31% 4.28% และ 12.89% ตามลำดับ และที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.90 ครีบบสีเหลืองจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบพาราโบลาค้างนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาค้างเว้า เป็น 2.61% 4.18% และ 10.07% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.80 ครีบบสีเหลืองจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบพาราโบลาค้างนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาค้างเว้า เป็น 3.39% 3.59% และ 15.04% ตามลำดับ และที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.90 ครีบบสีเหลืองจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบพาราโบลาค้างนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาค้างเว้า เป็น 3.40% 5.43% และ 13.48% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบครีบบที่มีรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.80 ครีบบสีเหลือง สามเหลี่ยม พาราโบลาค้างเว้า และพาราโบลาค้างนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 20.58% 21.39% 18.32% และ 20.50% ตามลำดับ และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 0.90 ครีบบสีเหลือง สามเหลี่ยม พาราโบลาค้างเว้า และพาราโบลาค้างนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 26.98% 25.47% 23.16% และ 26.01% ตามลำดับ



ภาพที่ 52 อิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี

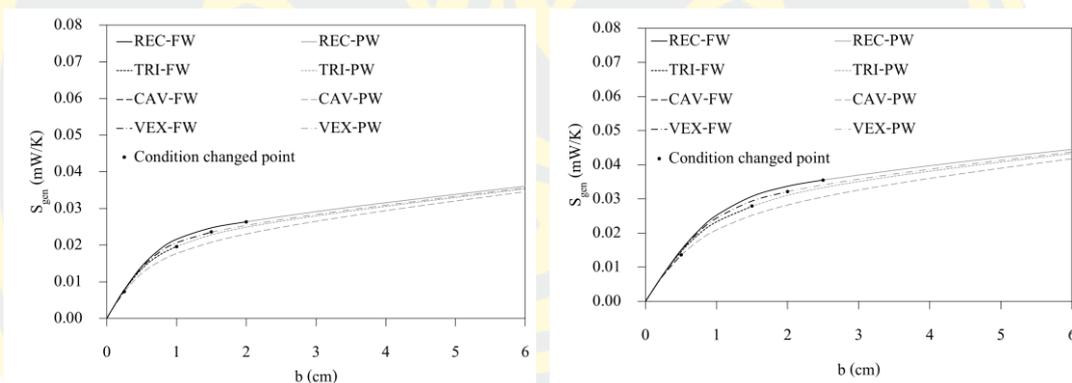
จากภาพที่ 52 เส้นสีดำจะเป็นครีบบนสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบบเปลี่ยนสภาวะจากครีบบเปียกบางส่วนเป็นครีบบเปียกทั้งหมด

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 ถึง 3-64 จะพบว่าความเร็วอากาศจะส่งผลโดยตรงกับหลายตัวแปร เริ่มจากตัวเลขเรย์โนลด์์ในสมการที่ 3-64 การเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศจะส่งผลให้ตัวเลขเรย์โนลด์์เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของตัวเลขเรย์โนลด์์จะทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่พื้นผิวลดลง เมื่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงจะส่งผลให้แรงต้านอากาศลดลง แต่การเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศจะส่งผลโดยตรงให้แรงต้านอากาศเพิ่มขึ้นอีกด้วยตามสมการที่ 3-62 โดยรวมแล้วแรงต้านอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศ และเมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 ในพจน์ที่ 1 การเพิ่มขึ้นของแรงต้านอากาศจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศ ส่งผลให้ผลรวมของพจน์ที่ 1 ของสมการที่ 3-61 เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาในพจน์ที่ 2 อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 46 และพบว่าค่า θ_b จะมีค่าเป็นลบเสมอ ทำให้สมการที่ 3-61 อยู่ในรูปของผลรวมของพจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 ทำให้โดยรวมแล้วอัตราการเกิดเอนโทรปีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น

จากกราฟของตรีบลูมิเนียม พบว่าที่ความเร็วเท่ากับ 5 m/s ครีบบีเหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบาราโบลาคึ่งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาคึ่งเว้า เป็น 2.61% 4.18% และ 10.07% ตามลำดับ และที่ความเร็วเท่ากับ 10 m/s ครีบบีเหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบาราโบลาคึ่งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาคึ่งเว้า เป็น 1.25% 1.98% และ 4.58% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในตรีบทองแดง ที่ความเร็วเท่ากับ 5 m/s ครีบบีเหลี่ยมจะมีอัตราการ

เกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบาราโบลาคั้งนู่น สามเหลี่ยม และพาราโบลาคั้งเว้า เป็น 3.40% 5.43% และ 13.48% ตามลำดับ และที่ความเร็วเท่ากับ 10 m/s ครีบลี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบาราโบลาคั้งนู่น สามเหลี่ยม และพาราโบลาคั้งเว้า เป็น 1.79% 2.85% และ 6.83% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบครีบบัรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่ความเร็วเท่ากับ 5 m/s ครีบลี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาคั้งเว้า และพาราโบลาคั้งนู่น ที่ทำจากทองแดงจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่รูปร่างเดียวกัน เป็น 26.98% 25.47% 23.16% และ 26.01% ตามลำดับ และความเร็วเท่ากับ 10 m/s ครีบลี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาคั้งเว้า และพาราโบลาคั้งนู่น ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่รูปร่างเดียวกัน เป็น 14.86% 13.89% 12.43% และ 14.25% ตามลำดับ



(a) ครีบอลูมิเนียม

(b) ครีบทองแดง

ภาพที่ 53 อิทธิพลของความยาวครีบบัที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี

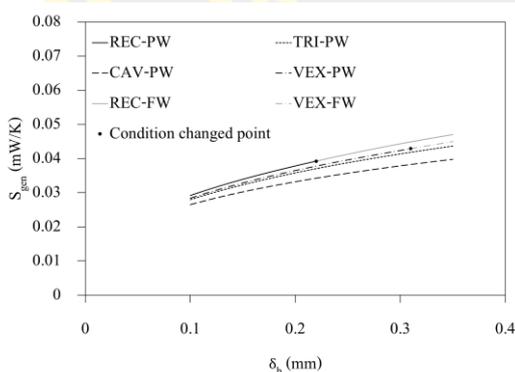
จากภาพที่ 53 เส้นสีดำจะเป็นครีบบในสถานะผิวเปียกทั้งหมด เส้นสีเทาจะเป็นสถานะผิวเปียกบางส่วน และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบบเปลี่ยนสถานะจากครีบบเปียกบางส่วนเป็นครีบบเปียกทั้งหมด

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 จะพบว่าความยาวครีบบจะส่งผลกับตัวแปร 2 ตัว คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และแรงต้านอากาศ จากสมการที่ 3-63 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความยาวครีบบ จะทำให้พื้นที่ที่เป็นพื้นผิวในการถ่ายโอนความร้อนจะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแรงต้านอากาศในสมการที่ 3-62 เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 ในพจน์ที่ 1 การเพิ่มขึ้นของแรงต้านอากาศจะส่งผลให้ผลรวมของพจน์ที่ 1 ของสมการที่ 3-61 เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาในพจน์ที่ 2 อัตราการ

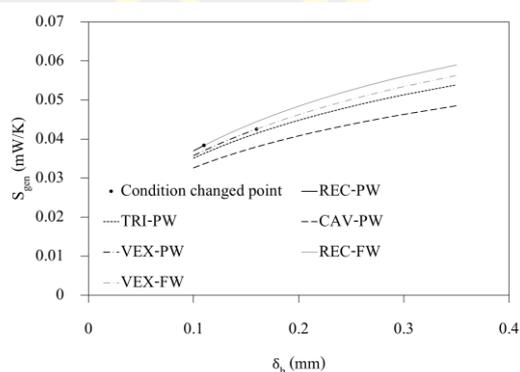
ถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวครีบบเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 47 และพบว่าค่า θ_b จะมีค่าเป็นลบเสมอ ทำให้สมการที่ 3-61 อยู่ในรูปของผลรวมของพจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 ทำให้โดยรวมแล้วอัตราการเกิดเอนโทรปีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวครีบบเพิ่มขึ้น

จากกราฟของครีบบอลูมิเนียม พบว่าที่ความยาวครีบบเท่ากับ 3 cm ครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 2.61% 4.18% และ 10.07% ตามลำดับ และที่ความยาวครีบบเท่ากับ 6 cm ครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 1.21% 1.91% และ 4.46% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในครีบบทองแดง ที่ความยาวครีบบเท่ากับ 3 cm ครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 3.40% 5.43% และ 13.48% ตามลำดับ และที่ความยาวครีบบเท่ากับ 6 cm ครีบบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 1.82% 2.89% และ 6.72% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบครีบบที่มีรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่ความยาวครีบบเท่ากับ 3 cm ครีบบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 26.98% 25.47% 23.16% และ 26.01% ตามลำดับ และความยาวครีบบเท่ากับ 6 cm ครีบบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 23.52% 22.36% 20.91% และ 22.78% ตามลำดับ



(a) ครีบบอลูมิเนียม



(b) ครีบบทองแดง

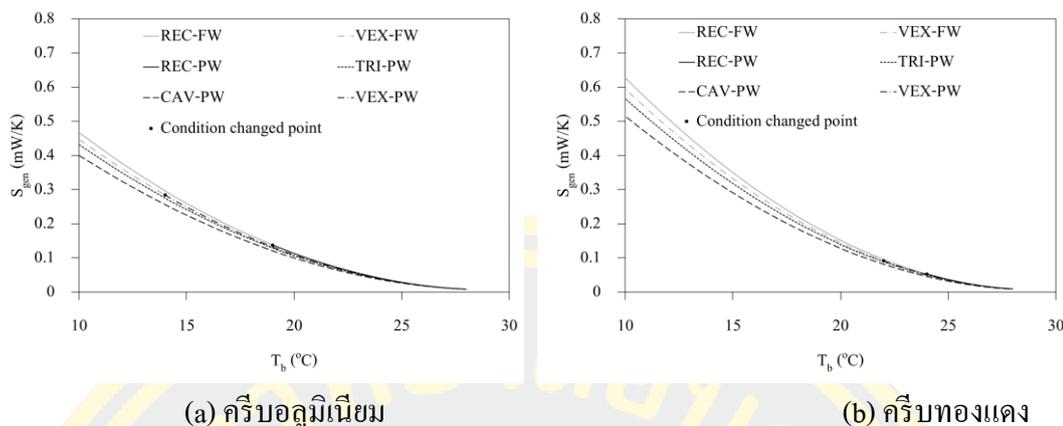
ภาพที่ 54 อิทธิพลของความหนาของฐานครีบบที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 54 เส้นสีดำจะเป็นครีบในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบเปลี่ยนสภาวะจากครีบเปียกบางส่วนเป็นครีบเปียกทั้งหมด

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 พบว่าความหนาของฐานครีบจะมีผลกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ทำให้ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์มีรูปร่างคล้ายกับภาพที่ 48 และเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความหนาของฐานครีบ จะแปรผันตรงกับอัตราการเกิดเอนโทรปี

จากกราฟของครีบอลูมิเนียม พบว่าที่ความหนาของฐานครีบเท่ากับ 0.1 mm ครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 2.61% 4.18% และ 10.07% ตามลำดับ และที่ความหนาของฐานครีบเท่ากับ 0.3 mm ครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 4.50% 7.20% และ 16.97% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในครีบทองแดง ที่ความหนาของฐานครีบเท่ากับ 0.1 mm ครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 3.40% 5.43% และ 13.48% ตามลำดับ และที่ความหนาของฐานครีบเท่ากับ 0.3 mm ครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าครีบพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 4.91% 9.16% และ 21.09% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบครีบที่มีรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่ความหนาของฐานครีบเท่ากับ 0.1 mm ครีบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 26.98% 25.47% 23.16% และ 26.01% ตามลำดับ และความหนาของฐานครีบเท่ากับ 0.3 mm ครีบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 26.50% 24.22% 22.20% และ 26.00% ตามลำดับ



ภาพที่ 55 อิทธิพลของอุณหภูมิฐานครีบบที่มีผลต่ออัตราการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 55 เส้นสีดำจะเป็นครีบบในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบบเปลี่ยนสภาวะจากครีบบเปียกบางส่วนเป็นครีบบเปียกทั้งหมด

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 จะพบว่าอุณหภูมิฐานครีบบจะส่งผลกับตัวแปร 2 ตัว คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศและฐานครีบบ (θ_b) เมื่อพิจารณาสมการที่ 3-61 ในพจน์ที่ 1 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิฐานครีบบจะไม่ส่งผลใด ๆ กับตัวแปรในพจน์นี้ เมื่อพิจารณาในพจน์ที่ 2 อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของครีบบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิฐานครีบบเพิ่มขึ้นตามภาพที่ 49 และพบว่าค่า θ_b จะมีค่าสัมบูรณ์มากขึ้นและมีค่าเป็นลบเสมอ ทำให้สมการที่ 3-61 อยู่ในรูปของผลรวมของพจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 โดยรวมแล้วอัตราการเกิดเอนโทรปีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิฐานครีบบลดลง

จากกราฟของเครื่องทำความชื้น พบว่าที่อุณหภูมิฐานครีบบเท่ากับ 25°C เครื่องทำความชื้นจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าเครื่องพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 2.61% 4.18% และ 10.07% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิฐานครีบบเท่ากับ 10°C เครื่องทำความชื้นจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าเครื่องพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 4.47% 8.34% และ 16.88% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันในเครื่องทำความแห้ง ที่อุณหภูมิฐานครีบบเท่ากับ 25°C เครื่องทำความชื้นจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าเครื่องพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 3.40% 5.43% และ 13.48% ตามลำดับ และที่อุณหภูมิฐานครีบบเท่ากับ 10°C เครื่องทำความชื้นจะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าเครื่องพาราโบลาโค้งนูน สามเหลี่ยม และพาราโบลาโค้งเว้า เป็น 5.43% 10.74% และ 21.85% ตามลำดับ

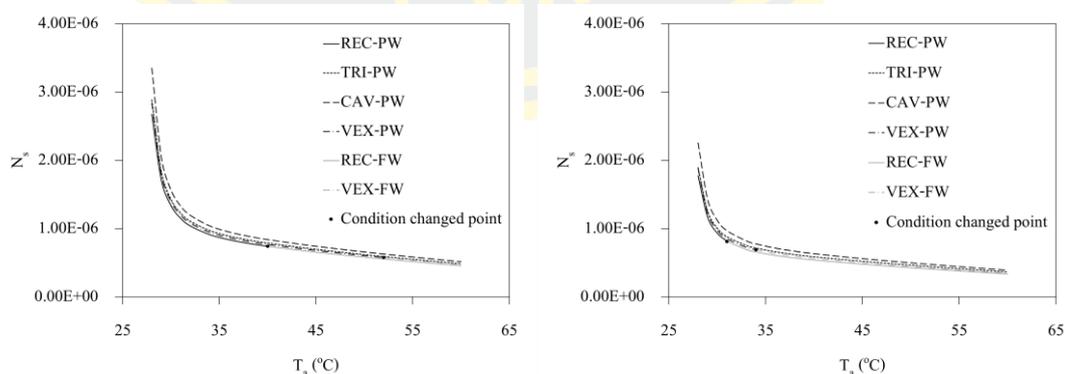
เมื่อเปรียบเทียบครีบริบที่มีรูปร่างเดียวกันที่ทำจากอลูมิเนียมและทองแดง พบว่าที่อุณหภูมิฐานครีบริบเท่ากับ 25 °C ครีบริบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 26.98% 25.47% 23.16% และ 26.01% ตามลำดับ และอุณหภูมิฐานครีบริบเท่ากับ 10 °C ครีบริบสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม พาราโบลาโค้งเว้า และพาราโบลาโค้งนูน ที่ทำจากทองแดง จะมีอัตราการเกิดเอนโทรปีมากกว่าอลูมิเนียมที่มีรูปร่างเดียวกัน เป็น 34.39% 31.47% 28.91% และ 33.17% ตามลำดับ

ตัวเลขการเกิดเอนโทรปี (ENTROPY GENERATION NUMBER)

ในการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมกับอัตราการเกิดเอนโทรปี จะใช้วิธีของ Poulikakos and Bejan, 1982 คือ การสร้างตัวแปรไร้มิติที่มีชื่อว่า ตัวเลขการเกิดเอนโทรปี (Entropy Generation number, N_S) โดยให้อัตราการเกิดเอนโทรปีเป็นตัวเศษ และให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเป็นตัวส่วน จากนั้นนำตัวแปรที่เกี่ยวข้องและมีหน่วยที่สัมพันธ์กันมาเป็นตัวคูณหรือหาร เพื่อสร้างตัวแปรไร้มิติขึ้นมา โดยตัวแปรไร้มิติที่ได้จะเป็น

$$N_S = S_{gen} / \frac{Q_b^2 V_a}{k_a v_a T_{K,a}^2} \tag{4-1}$$

ใช้สมการที่ 4-1 ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการปรับพารามิเตอร์บางตัว จะไม่พบตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดด้วยข้อจำกัดบางอย่าง โดยผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดจะเป็นดังนี้



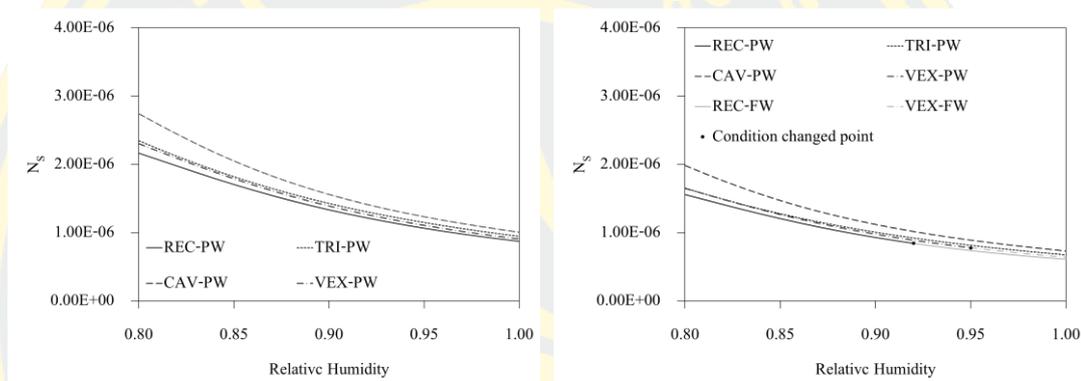
(a) ครีบริบอลูมิเนียม

(b) ครีบริบทองแดง

ภาพที่ 56 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 56 เส้นสีดำจะเป็นครีปในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีปเปลี่ยนสภาวะจากครีปเปียกบางส่วนเป็นครีปเปียกทั้งหมด

เมื่อค่อย ๆ ปรับอุณหภูมิอากาศจาก 30 °C เป็น 60 °C พบว่าตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจะลดลงในลักษณะคล้ายกันทั้ง 4 รูปร่าง ทั้งอลูมิเนียมและทองแดง และมีแนวโน้มว่าจะลดลงเรื่อย ๆ แต่คุณสมบัติของอากาศที่นำมาใช้ในงานนี้ สามารถใช้ได้ในช่วง 0 ถึง 60 °C จากข้อจำกัดนี้ ทำให้ไม่พบจุดต่ำสุดจากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศ



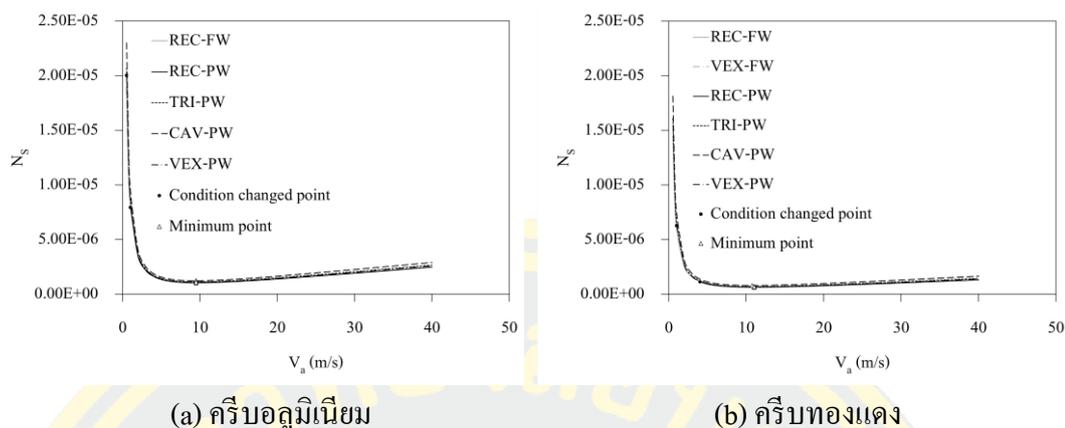
(a) ครีปอลูมิเนียม

(b) ครีปทองแดง

ภาพที่ 57 อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 57 เส้นสีดำจะเป็นครีปในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีปเปลี่ยนสภาวะจากครีปเปียกบางส่วนเป็นครีปเปียกทั้งหมด

เมื่อค่อย ๆ ปรับความชื้นสัมพัทธ์จาก 0.80 เป็น 1.00 พบว่าตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจะลดลงในลักษณะคล้ายกันทั้ง 4 รูปร่าง ทั้งอลูมิเนียมและทองแดง และมีแนวโน้มว่าจะลดลงเรื่อย ๆ แต่เนื่องจากค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่ามากที่สุดได้แค่ 1.00 ทำให้ไม่พบจุดต่ำสุดจากการปรับเปลี่ยนความชื้นสัมพัทธ์

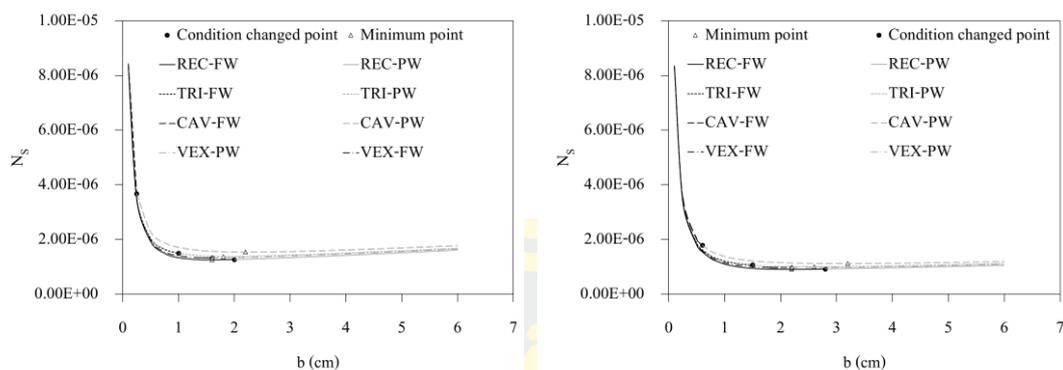


ภาพที่ 58 อิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 58 เส้นสีดำจะเป็นครีบในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด จุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีบเปลี่ยนสภาวะจากครีบเปียกบางส่วนเป็นครีบเปียกทั้งหมด และสัญลักษณ์สามเหลี่ยมจะเป็นจุดที่มีตัวเลขการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุด

ในครีบอลูมิเนียมพบว่า จุดที่มีตัวเลขการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุด คือจุดที่มีความเร็วอากาศประมาณ 9.50 m/s และเป็นจุดเดียวกันในครีบทั้ง 4 รูปร่าง โดยในครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 12.8 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.060 mW/K ครีบสามเหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 12.2 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.058 mW/K ครีบพาราโบลาโค้งเว้าจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 11.5 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.057 mW/K ครีบพาราโบลาโค้งนูนจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 12.6 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.059 mW/K และทั้งหมดอยู่ภายใต้สภาวะผิวเปียกบางส่วน

ในครีบทองแดงพบว่า จุดที่มีตัวเลขการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุด คือจุดที่มีความเร็วอากาศประมาณ 11.00 m/s ในครีบสี่เหลี่ยม ครีบสามเหลี่ยม ครีบพาราโบลาโค้งนูน และเป็นจุดที่มีความเร็ว 10.75 m/s ในครีบพาราโบลาโค้งเว้า โดยในครีบสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 18.1 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.085 mW/K ครีบสามเหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 17.1 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.083 mW/K ครีบพาราโบลาโค้งเว้าจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 15.7 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.078 mW/K ครีบพาราโบลาโค้งนูนจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 17.5 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.084 mW/K และทั้งหมดอยู่ภายใต้สภาวะผิวเปียกบางส่วน



(a) ครีบอลูมิเนียม

(b) ครีบทองแดง

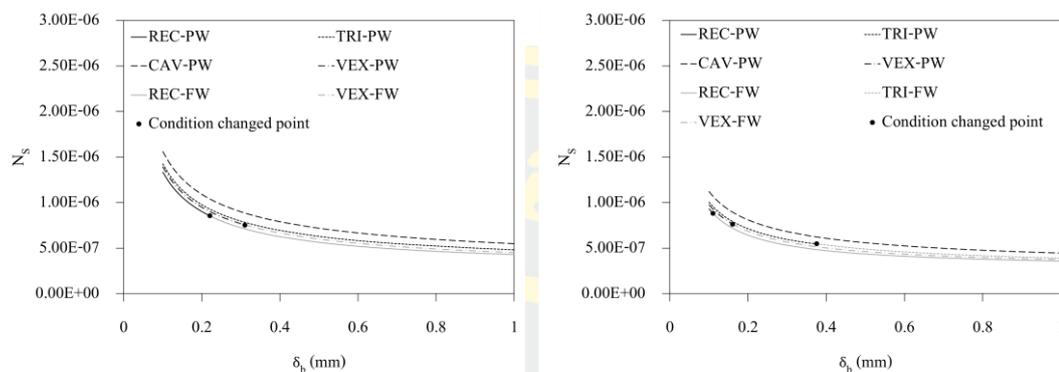
ภาพที่ 59 อิทธิพลของความยาวครีปที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 59 เส้นสีดำจะเป็นครีปในสภาวะผิวเปียกทั้งหมด เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกบางส่วน จุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีปเปลี่ยนสภาวะจากครีปเปียกบางส่วนเป็นครีปเปียกทั้งหมด และสัญลักษณ์สามเหลี่ยมจะเป็นจุดที่มีตัวเลขการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุด

ในครีบอลูมิเนียม จุดที่มีตัวเลขการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุด คือจุดที่ความยาวครีปประมาณ 1.6 cm ในครีปสี่เหลี่ยมและพาราโบลาโค้งนูน 1.8 cm ในครีปสามเหลี่ยม และ 2.2 cm ในครีปพาราโบลาโค้งเว้า โดยในครีปสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 10.4 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.025 mW/K อยู่ในสภาวะผิวเปียกทั้งหมด ครีปสามเหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 9.74 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.024 mW/K อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน ครีปพาราโบลาโค้งเว้าจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 9.14 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.024 mW/K อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน ครีปพาราโบลาโค้งนูนจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 9.89 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.024 mW/K อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน

ในครีบทองแดง จุดที่มีตัวเลขการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุด คือจุดที่ความยาวครีปประมาณ 2.2 cm ในครีปสี่เหลี่ยมและพาราโบลาโค้งนูน 2.6 cm ในครีปสามเหลี่ยม และ 3.2 cm ในครีปพาราโบลาโค้งเว้า โดยในครีปสี่เหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 14.4 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.035 mW/K อยู่ในสภาวะผิวเปียกทั้งหมด ครีปสามเหลี่ยมจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 13.5 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.034 mW/K อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน ครีปพาราโบลาโค้งเว้าจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 12.7 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.033 mW/K อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน ครีปพาราโบลา

โค้งนูนจะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 13.6 W/m มีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.033 mW/K อยู่ในสภาวะผิวเปียกบางส่วน



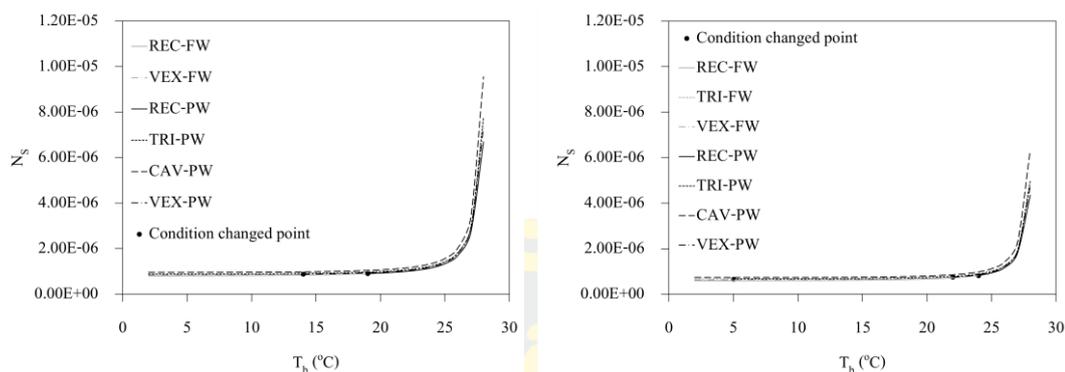
(a) ครีบอลูมิเนียม

(b) ครีบทองแดง

ภาพที่ 60 อิทธิพลของความหนาของฐานครีที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 60 เส้นสีดำจะเป็นครีในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่ครีเปลี่ยนสถานะจากครีเปียกบางส่วนเป็นครีเปียกทั้งหมด

เมื่อค่อย ๆ ปรับความหนาของฐานครีจาก 0.10 mm เป็น 1.00 mm พบว่าตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจะลดลงในลักษณะคล้ายกันทั้ง 4 รูปร่าง ทั้งอลูมิเนียมและทองแดง และมีแนวโน้มว่าจะลดลงเรื่อย ๆ แต่เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการแก้สมการกำหนดไว้ว่า การถ่ายโอนความร้อนที่ปลายครีจะน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ ของครี จึงให้การถ่ายโอนความร้อนที่ปลายครีเท่ากับศูนย์ ดังนั้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ จึงจำเป็นต้องควบคุมไม่ให้ครีมีความหนาจนเกินไป เพื่อให้เงื่อนไขขอบเขตยังคงเป็นจริง จึงทำให้ไม่พบจุดต่ำสุดจากการปรับเปลี่ยนความหนาของฐานครี



(a) คิริบอคูมิเนียม

(b) คิริบทองแดง

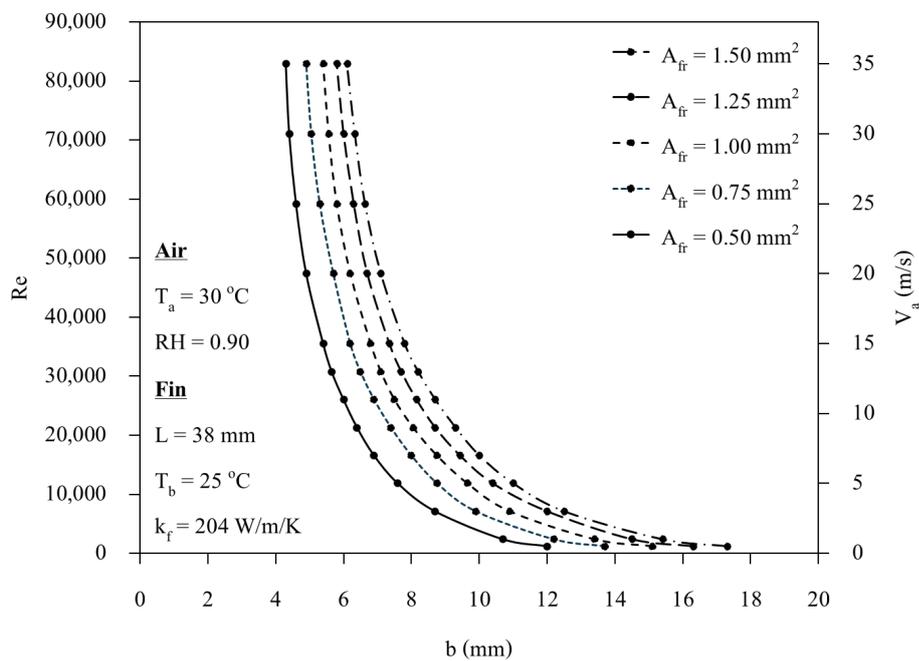
ภาพที่ 61 อิทธิพลของอุณหภูมิฐานคิริบที่มีผลต่อตัวเลขการเกิดเอนโทรปี

จากภาพที่ 61 เส้นสีดำจะเป็นคิริบในสภาวะผิวเปียกบางส่วน เส้นสีเทาจะเป็นสภาวะผิวเปียกทั้งหมด และจุดสีดำจะเป็นจุดที่คิริบเปลี่ยนสภาวะจากคิริบเปียกบางส่วนเป็นคิริบเปียกทั้งหมด

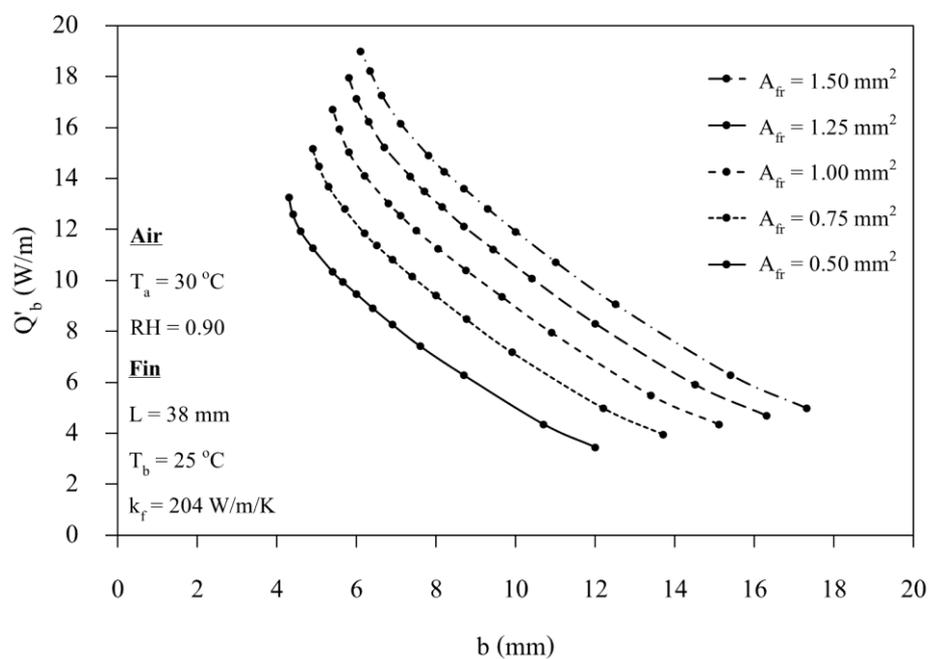
เมื่อค่อย ๆ ปรับอุณหภูมิฐานคิริบจาก 28 °C ถึง 2 °C พบว่าตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจะลดลงในลักษณะคล้ายกันทั้ง 4 รูปร่าง ทั้งอคูมิเนียมและทองแดง และมีแนวโน้มว่าจะลดลงเรื่อย ๆ แต่เนื่องจากคิริบต้องอยู่ในสภาวะเปียกบางส่วนหรือเปียกทั้งหมด อุณหภูมิของคิริบจึงต้องอยู่ระหว่าง 0 °C ถึงอุณหภูมิอากาศ จึงทำให้ไม่พบจุดต่ำสุดจากการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิฐานคิริบ

แผนภูมิสำหรับออกแบบ (SELECTION CHART)

จากหัวข้อที่ 4.4 สามารถนำมาสร้างแผนภูมิสำหรับออกแบบ โดยการปรับความเร็วของอากาศขึ้นเรื่อย ๆ จากนั้นปรับความยาวคิริบและความหนาของฐานคิริบโดยควบคุมพื้นที่ด้านข้างของคิริบให้คงที่ จากนั้นพิจารณาตัวเลขการเกิดเอนโทรปีเพื่อหาว่า ที่ความเร็วอากาศนั้น ๆ คิริบจะต้องมีขนาดเท่าใดจึงจะเหมาะสม โดยสามารถนำเสนอได้ 2 แบบ ดังนี้



ภาพที่ 62 แผนภูมิสำหรับออกแบบในรูปแบบของตัวเลขเรย์โนลด์และความเร็วอากาศ



ภาพที่ 63 แผนภูมิสำหรับออกแบบในรูปแบบของอัตราถ่ายโอนความร้อนรวม

บทที่ 5

สรุปผลการวิเคราะห์

จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าไม่มีงานวิจัยใดที่นำเสนองานในลักษณะเดียวกันนี้ จึงไม่สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ กับงานวิจัยอื่น ๆ ได้ รวมไปถึงงานวิจัยของ Pirompugd and Wongwises, 2013b ที่ใช้วิธีการคำนวณเดียวกัน เนื่องจากมีเป้าหมายในการนำเสนอ งานต่างกัน และจากผลลัพธ์ที่ได้จากบทที่ 4 สามารถสรุปได้ ดังนี้

อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และอัตราการเกิดเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ทั้งในครีบอลูมิเนียมและทองแดง โดยเพิ่มขึ้นในลักษณะกราฟาราโบลาคึ่ง หายตามภาพที่ 44 และภาพที่ 50 ในครีบลีเหล็กทองแดงที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด ที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 14.68 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.037 mW/K และที่อุณหภูมิอากาศเท่ากับ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 300.1 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 3.603 mW/K โดยไม่สามารถหาจุดต่ำสุดของตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจากการปรับค่าอุณหภูมิอากาศ

อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และอัตราการเกิดเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ทั้งในครีบอลูมิเนียมและทองแดง โดยเพิ่มขึ้นในลักษณะใกล้เคียงกับกราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็นบวกตามภาพที่ 45 และภาพที่ 51 ในครีบลีเหล็กทองแดงที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด ที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 0.80 จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 9.609 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.027 mW/K และที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 0.90 จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 14.68 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.037 mW/K โดยไม่สามารถหาจุดต่ำสุดของตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจากการปรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

อิทธิพลของความเร็วอากาศ

การเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และอัตราการเกิดเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ทั้งในครีบอลูมิเนียมและทองแดง โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นในลักษณะกราฟพาราโบลาตะแคงขวา และอัตราการเกิดเอนโทรปีจะเพิ่มขึ้นในลักษณะกราฟพาราโบลาโค้งหงายตามภาพที่ 46 และภาพที่ 52 ในครีบลีเหล็กทองแดงที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมสูงสุด ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 5 m/s จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 14.68 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.037 mW/K และที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 40 m/s จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 25.33 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 1.259 mW/K โดยตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจะมีค่าน้อยที่สุดที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 11 m/s

อิทธิพลของความยาวครีบลี

การเพิ่มขึ้นของความยาวครีบลีส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และอัตราการเกิดเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ทั้งในครีบอลูมิเนียมและทองแดง โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และอัตราการเกิดเอนโทรปี จะเพิ่มขึ้นในลักษณะกราฟพาราโบลาตะแคงขวา ตามภาพที่ 47 และภาพที่ 53 ในครีบลีพาราโบลาโค้งเว้าลูมิเนียมที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมต่ำสุด ที่ความยาวครีบลีเท่ากับ 3 cm จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 9.586 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.027 mW/K และที่ความยาวครีบลีเท่ากับ 6 cm จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 10.26 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.035 mW/K โดยตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจะมีค่าน้อยที่สุดที่ความยาวครีบลีเท่ากับ 2.2 cm ตามเงื่อนไขตั้งต้นตามข้างต้นของบทที่ 4

อิทธิพลของความหนาของฐานครีบลี

การเพิ่มขึ้นของความหนาของฐานครีบลีส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และอัตราการเกิดเอนโทรปีเพิ่มขึ้น ทั้งในครีบอลูมิเนียมและทองแดง โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และอัตราการเกิดเอนโทรปี จะเพิ่มขึ้นในลักษณะกราฟพาราโบลาตะแคงขวา ตามภาพที่ 48 และภาพที่ 54 ในครีบลีพาราโบลาโค้งเว้าลูมิเนียมที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมต่ำสุด ที่ความหนาของฐานครีบลีเท่ากับ 0.1 mm จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 9.586 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.026 mW/K และที่ความหนาของฐานครีบลีเท่ากับ 1 mm จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 23.20 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.055 mW/K โดยไม่สามารถหาจุดต่ำสุดของตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจากการปรับค่าความหนาของฐานครีบลี

อิทธิพลของอุณหภูมิฐานครีบบ

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิฐานครีบบส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวม และอัตราการเกิดเอนโทรปีลดลง ทั้งในครีบบอลูมิเนียมและทองแดง โดยการลดลงของอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมจะลดลงในลักษณะกราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็นลบ และอัตราการเกิดเอนโทรปีจะลดลงในลักษณะกราฟพาราโบลาโค้งหงาย ตาม

ภาพที่ 49 และภาพที่ 55 ในครีบบพาราโบลาโค้งเว้าอลูมิเนียมที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมต่ำสุด ที่อุณหภูมิฐานครีบบเท่ากับ 2°C จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 66.77 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.001 mW/K และที่อุณหภูมิฐานครีบบเท่ากับ 25°C จะมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมเท่ากับ 9.586 W/m และมีอัตราการเกิดเอนโทรปีเท่ากับ 0.026 mW/K โดยไม่สามารถหาจุดต่ำสุดของตัวเลขการเกิดเอนโทรปีจากการปรับค่าอุณหภูมิฐานครีบบ

จากผลลัพธ์ที่ได้ จึงใช้ความเร็วลมและความยาวครีบบในการออกแบบครีบบตามแนวยาวในสภาวะผิวเปียกบางส่วน โดยการหาค่ากำหนดความเร็วของอากาศแล้วจากนั้นทำการปรับขนาดของครีบบจนกว่าจะพบค่าตัวเลขการเกิดเอนโทรปีต่ำที่สุด ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนและอัตราการเกิดเอนโทรปีเหมาะสมที่สุด

บรรณานุกรม

- Abdeldjalil, Belazreg, Animasaun, Isaac Lare, Abderrahmane, Aissa, Mohammed, Sahnoun, Guedri, Kamel, Fadhl, Bandar M, Al-Mdallal, Qasem M, and Dhabhi, UNITED ARAB. (2023). Insight into latent heat thermal energy storage: RT27 phase transition material conveying copper nanoparticles experiencing entropy generation with four distinct stepped fin surfaces. *International Journal of Thermofluids*, 100368.
- Baslem, Abeer, Sowmya, Ganeshappa, Gireesha, Bijjanal Jayanna, Prasannakumara, Ballajja Chandrappa, Rahimi-Gorji, Mohammad, and Hoang, Nguyen Minh. (2020). Analysis of thermal behavior of a porous fin fully wetted with nanofluids: convection and radiation. *Journal of Molecular Liquids*, 307, 112920.
- Bluecold. (2023). *Single Fan Condensing Unit*. Retrieved October 5, 2023 from <https://www.bluecoldref.com/blue-cold-products/emerson-condensing-unit>
- Cengel, Yunus A, Boles, Michael A, and Kanoğlu, Mehmet. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach* (Vol. 5). McGraw-hill New York.
- Cengel, Yunus A, and Ghajar, Afshin J. (2015). *Heat and Mass Transfer Fundamental and Applications*. McGraw-Hill Education.
- Das, Ranjan, and Kundu, Balaram. (2019). Forward and inverse nonlinear heat transfer analysis for optimization of a constructal T-shape fin under dry and wet conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 461-475.
- Energyvanguard. (2023). Retrieved October 5, 2023 from <https://www.energyvanguard.com/blog/it-s-called-an-air-conditioner-not-an-air-cooler/attachment/attachment-the-latent-cooling-load-is-removed-by-water-vapor-condensing-on-the-evaporator-coil/>
- Engineers, American Society of Heating; Refrigerating and Air-Conditioning. (2001). *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. ASHRAE.
- Hazarika, Saheera Azmi, Bhanja, Dipankar, and Nath, Sujit. (2020). Fork-shaped constructal fin array design a better alternative for heat and mass transfer augmentation under dry, partially wet and fully wet conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 152, 106329.
- Hosseinzadeh, Saman, Hosseinzadeh, Khashaya, Hasibi, Alireza, and Ganji, Davood Domeri.

- (2022). Thermal analysis of moving porous fin wetted by hybrid nanofluid with trapezoidal, concave parabolic and convex cross sections. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, 101757.
- Huang, Cheng-Hung, and Chung, Yun-Lung. (2015). An inverse problem in determining the optimum shapes for partially wet annular fins based on efficiency maximization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 364-375.
- Huang, Cheng-Hung, and Chung, Yun-Lung. (2016). A nonlinear fin design problem in determining the optimum shapes of fully wet annular fins. *Applied Thermal Engineering*, 103, 195-204.
- Ibrahiem, Emad Zedan, and Moawed, Mohammed A. (2009). Forced convection and entropy generation from elliptic tubes with longitudinal fins. *Energy Conversion and Management*, 50(8), 1946-1954.
- Keerthi, Motor Leela, Gireesha, Bijjanal Jayanna, and Sowmya, Ganeshappa. (2022). Numerical investigation of efficiency of fully wet porous convective-radiative moving radial fin in the presence of shape-dependent hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 138, 106341.
- Khatami, Seyyedmahan, and Rahbar, Nader. (2019). An analytical study of entropy generation in rectangular natural convective porous fins. *Thermal Science and Engineering Progress*, 11, 142-149.
- Kilitaraiyon. (2023). ชุดหม้อน้ำแผงแอร์ HYUNDAI H1. Retrieved October 5, 2023 from https://www.kilitaraiyon.com/information_Product?product=%E0%B8%8A%E0%B8%B8%E0%B8%94%E0%B8%AB%E0%B8%A1%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B9%81%E0%B8%9C%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%20HYUNDAI%20H1&item=5dec49d3e04ba852bc9d1704
- Kraus, Allan D, Aziz, Abdul, Welty, James, and Sekulic, DP. (2001). Extended surface heat transfer. *Appl. Mech. Rev.*, 54(5), B92-B92.
- Kraus, Allan D., Aziz, Abdul, and Welty, James. (2001). *Extended Surface Heat Transfer*.
- Made-in-china. (2023). 3 Phase DC Frequency Driver Air Conditioner Compressor Inverter PCB Control Circuit Board. Retrieved October 5, 2023 from <https://gdchico.en.made-in-china.com/product/COetrMYJZhWV/China-3-Phase-DC-Frequency-Driver-Air->

[Conditioner-Compressor-Inverter-PCB-Control-Circuit-Board.html](#)

- Meganathan, S, Arunkumar, R, and Ponshanmugakumar, A. (2021). Numerical analysis of passive heat sink for different shapes. *Materials Today: Proceedings*, 46, 3749-3755.
- Naphon, Paisarn. (2006). Study on the heat transfer characteristics of the annular fin under dry-surface, partially wet-surface, and fully wet-surface conditions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33(1), 112-121.
- Naphon, Paisarn. (2014). การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. *SWU Engineering Journal (2014)*, 9(1), 48-60.
- Pirompugd, Worachest, and Wongwises, Somchai. (2013a). Efficiencies for partially wetted spine fins: uniform cross section, conical, concave parabolic, and convex parabolic spines. *Journal of heat transfer*, 135(8), 081903.
- Pirompugd, Worachest, and Wongwises, Somchai. (2013b). Partially wet fin efficiency for the longitudinal fins of rectangular, triangular, concave parabolic, and convex parabolic profiles. *Journal of the Franklin Institute*, 350(6), 1424-1442.
- Poulikakos, Dimos, and Bejan, Adrian. (1982). Fin geometry for minimum entropy generation in forced convection. *JOURNAL OF HEAT TRANSFER-TRANSACTIONS OF THE ASME*, 104(4), 616-623. <https://doi.org/10.1115/1.3245176>
- Ramzan, Muhammad, Riasat, Saima, Ghazwani, Hassan Ali S, Pasha, Amjad Ali, Islam, Nazrul, and Aljurbua, Saleh Fahad. (2022). Performance comparison appraisal of a fully wetted longitudinal fin of different profiles with variable thermal conductivities. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 138, 106354.
- Shahsavari, Amin, Yari, Omid, and Askari, Ighball Baniasad. (2021). The entropy generation analysis of forward and backward laminar water flow in a plate-pin-fin heatsink considering three different splitters. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 120, 105026.
- Tavakoli, Ali, Farzaneh-Gord, Mahmood, and Ebrahimi-Moghadam, Amir. (2023). Using internal sinusoidal fins and phase change material for performance enhancement of thermal energy storage systems: Heat transfer and entropy generation analyses. *Renewable Energy*, 205, 222-237.
- Wankhade, Pramod A, Kundu, Balaram, and Das, Ranjan. (2018). Establishment of non-Fourier

heat conduction model for an accurate transient thermal response in wet fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 911-923.

YanwaidSakul, Panupong. (2012). แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานของอาคาร สำนักงานราชการขนาดใหญ่พิเศษด้วยการปรับปรุงวัสดุเปลือกอาคาร : กรณีศึกษาอาคาร สำนักงานกรมโยธาธิการและผังเมือง ถนนพระราม 6 กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Zhou, Jincheng, and Wang, Dan. (2023). Entropy generation analysis of a dual-height plate-fin heat sink with Nanofluid coolant applying two-phase mixture model. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 146, 895-909.



ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายทศพล จันทรละออ
วัน เดือน ปี เกิด	28 พฤษภาคม 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดสมุทรปราการ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	1447 ม.4 ต.ลำโรงเหนือ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270
ตำแหน่งและประวัติการทำงาน	(2565) วิศวกรผลิตภัณฑ์ บริษัท จีอาร์ เทค (ประเทศไทย) จำกัด (2564) วิศวกรบริการ บริษัท แอร์โค (ประเทศไทย) จำกัด (2564) ผู้เชี่ยวชาญด้านเครื่องทำน้ำเย็น บริษัท รักษาความปลอดภัย พีจีเอส และฟาซิลิตี้ เซอร์วิสเชส จำกัด (2561-2564) วิศวกรบริการ บริษัท สยามไดกินเซลล์ จำกัด (2560-2561) วิศวกรออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท ยูนิแอร์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
ประวัติการศึกษา	(2556-2560) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รางวัลหรือทุนการศึกษา	(2565) ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ตามโครงการส่งเสริมและยกระดับคุณภาพบัณฑิตศึกษาเพื่อพัฒนาผู้ช่วยนักวิจัยที่ยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ปีการศึกษา ๒๕๖๕ (2558) รางวัลเรียนดีกิจกรรมเด่น ประจำปีการศึกษา 2558 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา