



การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวน
แบบไซโคลนแผดเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล



โดย
นายณัฐวัฒน์ ไสภามาตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไอดีซ์เบดชนิดหมุนวน
แบบไซโคลนแฝดเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN TWIN-CYCLONIC
SWIRLING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR FIRING BIOMASS FUELS



By
MR. Nattawat SOPAMART

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (ENERGY ENGINEERING)
Department of MECHANICAL ENGINEERING
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2021
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไอส์เบดชนิด
หมุนวน
แบบไซโคลนแฝดเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล
โดย ญัฐวัฒน์ โสภามาตร
สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา ศิริสมบุญ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรเมศร์ อารมย์ดี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กษมา ศิริสมบุญ)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดาจันทร์ แสงสว่าง)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อิศเรศ รัชกาลยา)

620920057 : วิศวกรรมพลังงาน แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : บริเวณอนุภาคเบตหนาแน่น, บริเวณอนุภาคเบตเบาบาง

นาย ญัฐวัฒน์ โสภามาตร: การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบตชนิด หมุนวนแบบไซโคลนแฝดเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รอง ศาสตราจารย์ ดร. กษมา ศิริสมบูรณ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝดเมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสและเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับเปลือกถั่วลิสง (โดยใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงปฐมภูมิและเปลือกถั่วลิสงเป็นเชื้อเพลิงทุติยภูมิ) โดยทั้ง 2 รูปแบบการเผาไหม้ คือ การเผาไหม้แบบธรรมดา และการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้ใช้ทฤษฎีของวัตต์ลัมป์ ในส่วนของการทดลองได้ใช้สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมที่ (S/T) 0, 0.1, 0.3 และ 0.5 ปริมาณอากาศส่วนเกิน 20-80% (ทั้ง 2 รูปแบบการเผาไหม้) และที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ 22.5 kg/h สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดาและการใช้อากาศเป็นชั้น สำหรับการเผาไหม้แบบชีวมวลร่วมที่ความร้อนขาเข้า 72.55 kW_{th} ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) 0, 0.28, 0.53, 0.77 และ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะถูกวัดที่ตำแหน่งความสูง (Z) 0.46, 0.95, 1.47, 2.08 and 2.57 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ และตำแหน่งในแนวรัศมีที่ (r/R) 0, $\pm 1/3$, $\pm 2/3$ and ± 1 ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะทำใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local}) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็น ที่บริเวณกึ่งกลางของเตาเผา ($r/R = 0$) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local}) จะมีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ($r/R = \pm 1/3, \pm 2/3$ และ 1) เนื่องจากเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้ามาเผาไหม้ภายในเตา ที่บริเวณเบตหนาแน่น ($Z = 0.46$ m, dense zone) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่าบริเวณที่มีอนุภาคเบตเบาบาง ($Z = 2.08-2.57$ m, freeboard zone) เนื่องจากอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคเบตเป็นหลัก ขณะที่การลดสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบริเวณอนุภาคเบตเบาบางมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ต่ำ ทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนสามารถลอยขึ้นไปเผาไหม้บริเวณอนุภาคเบตเบาบาง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมจะเพิ่มขึ้นประมาณ 36% เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจาก 20% เป็น 80% เป็นผลมาจากความถี่ในการสัมผัสที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคเบตกับอุปกรณ์การวัด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมส่งผลให้กระบวนการการถ่ายเทความร้อนนั้นลดลง

620920057 : Major (ENERGY ENGINEERING)

Keyword : Dense zone, Freeboard zone

MR. NATTAWAT SOPAMART : INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN TWIN-CYCLONIC SWIRLING FLUIDIZED-BED COMBUSTOR FIRING BIOMASS FUELS THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR DR. KASAMA SIRISOMBOON

The objective of this study was to investigate the heat transfer coefficient in a twin-cyclonic fluidized-bed combustor (TS-FBC) for firing with eucalyptus bark and co-firing with eucalyptus bark (as a primary fuel) and peanut shells (as a secondary fuel). The two combustion modes such as conventional and air-staged combustion were investigated based on the lump analysis method. During the experiments, the ratio of secondary to total air (S/T) was varied from 0, 0.1, 0.3, and 0.5. The amount of excess air ranged from 20% to 80% (for each combustion mode) and fixed at the fuel feed rate of 22.5 kg/h for conventional and air-staged combustion. While co-firing was fixed heat input at 72.55 kW_{th} with the energy fraction of secondary fuel (EF_2) ranged from 0, 0.28, 0.53, 0.77, and 1. The heat transfer coefficients were observed at the level of 0.46, 0.95, 1.47, 2.08, and 2.57 m above the air distributor and radial directions (r/R) at 0, $\pm 1/3$, $\pm 2/3$, and ± 1 , respectively. The heat transfer coefficients were analyzed with 1) radial heat transfer coefficient, 2) average heat transfer coefficient, and 3) overall heat transfer coefficient, respectively. The experimental results showed that the value of the local heat transfer coefficient had slightly higher at the center of the combustor ($r/R = 0$) where it was nearby the fuel injection point. In the dense zone (at $Z = 0.46$ m), the heat transfer was significantly higher than in the freeboard region (at $Z = 2.08$ - 2.57 m), and the particle convection seemed to be the key parameter. While decreasing the energy fraction of secondary fuel, the average heat transfer coefficient was higher because of the burning of fine and low-density fuel in the freeboard zone. The overall heat transfer coefficient significantly increased by about 36% when excess air increased from 20% to 80% affected by the higher contact frequency of the bed to heat transfer probe. However, the heat transfer process was reduced when the secondary to total air ratio was increased.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำและช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากรองศาสตราจารย์ ดร. กษมา ศิริสมบูรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัยนี้ อีกทั้งขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเมศร์ อารมย์ดี ซึ่งเป็นประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. อิศเรศ รัชกุลยา ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธิบดีนทร์ แสงสว่าง ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิภายใน และอาจารย์ทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำและให้ความรู้เพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ตลอดการวิจัยนี้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ทั้งอุปกรณ์และสถานที่เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ นายปิยะณัฐ เจริญพร นายธนากร ศรีสำราญ และนายสุปรีชา หัสชู ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำเทคนิควิธีการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดไบทชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด พร้อมทั้งจัดหาสถานที่ซื้อเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ ร.ท.ณัฐชัย คำมัน นายพงษ์ศักดิ์ เหลาทอง และนายธีระชัย สุรโชติเวศย์ ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการวัดค่าการยกตัวของอนุภาคและการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไบทชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตระหว่างการศึกษาที่มหาวิทยาลัยศิลปากรแห่งนี้ ขอขอบคุณ นายปิยะวัฒน์ เดชทองคำ นายพรชัย เลี้ยงบำรุง นายทรงวุฒิ ฤทธิ์ประเสริฐ นางสาวทิพานัน พลพิทักษ์ นายภีร์พัฒน์ จอกสมุทร นายเจษฎากร เชิดศิริกาญจน์ และนายบรรพต ชัมเจริญ ซึ่งเป็นนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่นที่ 14, 15 และ 16 ที่คอยช่วยเหลือต่าง ๆ ในระหว่างการทดลองสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ท้ายที่สุด ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว และผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ อีกหลายท่านที่ไม่อาจเอ่ยนามได้ครบ ที่คอยรับฟังปัญหาและเป็นกำลังใจเสมอมา ความสำเร็จใด ๆ ที่เกิดขึ้นขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดประโยชน์แก่การพัฒนาทางด้านพลังงานในอนาคตสืบต่อไป

ณัฐวัฒน์ โสภามาตร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พฤติกรรมของฟลูอิดเบดแบบอากาศหมุนวน.....	4
2.1.1 เบดนิ่ง (Fixed-bed regime).....	5
2.1.2 เบดเริ่มเคลื่อนตัว (Partial fluidized-bed regime).....	6
2.1.3 เบดฟองอากาศ (Fully fluidized-bed regime with partial swirl motion).....	7
2.1.4 เบดหมุนวนอย่างสมบูรณ์ (Fully swirling fluidized-bed regime)	7
2.2 การแบ่งกลุ่มอนุภาคเบดด้วยวิธีของ Geldart.....	7
2.2.1 กลุ่ม A.....	8
2.2.2 กลุ่ม B.....	8
2.2.3 กลุ่ม C.....	8

2.2.4	กลุ่ม D.....	9
2.3	การถ่ายเทความร้อนในเตาเผาฟลูอิดซ์เบด	9
2.3.1	การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค (Particle convection heat transfer, h_{pc}).....	10
2.3.2	การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนของก๊าซ (Gas convection heat transfer, h_{gc})	12
2.3.3	การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน (Radiation, h_r).....	13
2.4	ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	13
2.4.1	ผลของอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน	13
2.4.2	ผลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน	16
2.4.3	ผลของตำแหน่งความสูงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน	17
2.4.4	ผลของตำแหน่งการวัดในแนวรัศมีที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน.....	19
2.4.5	ผลของขนาดอนุภาคเบดที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน	20
2.4.7	ผลของแผ่นกระจายอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน	24
2.5	วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	24
2.5.1	การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้หลักการนำความร้อน 1 มิติ	24
2.5.2	การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยวิเคราะห์แบบลัมพ์ (Lump analysis).....	26
2.5.3	การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้เครื่องมือตอบสนองความเร็วสูง.....	27
2.6	การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงร่วม (co-firing).....	29
2.7	การสร้างสมการเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา [31].....	32
2.8	การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ [31]	33
2.8.1	Nusselt Number (Nu).....	33
2.8.2	Archimedes Number (Ar)	33
2.8.3	Prandtl Number (Pr)	34
2.8.4	Reynolds Number (Re).....	34

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 36

3.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 36

3.2 กำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์..... 36

3.3 เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 37

3.3.1 เตาเผาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด (TS-FBC)..... 37

3.3.2 แผ่นกระจายอากาศแบบใบพัด (Air distributor) 39

3.3.3 พัดลมป้อนอากาศปฐมภูมิ (Primary blower) 39

3.3.4 พัดลมป้อนอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ (Secondary and tertiary blower)..... 40

3.3.5 สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง (Screw Feeder)..... 41

3.3.6 ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone Collector) 41

3.3.7 หัวเผาเชื้อเพลิง (Burner) 42

3.3.8 วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)..... 42

3.3.9 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer probe)..... 43

3.3.10 เครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊ส (Testo-350 New XL) 45

3.3.11 สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Thermocouple type-K)..... 45

3.3.12 เครื่องมือเก็บข้อมูล (Data logger) 46

3.3.13 วัสดุเบด (Bed materials)..... 46

3.3.14 ชีวมวล (Biomass)..... 47

3.4 ทำการทดลอง 50

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 53

3.5.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมี (h_{local})..... 54

3.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z)..... 55

3.5.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) 55

3.5.4 การสร้างสมการเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 56

3.6 สรุปผลการทดลอง	57
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	58
4.1 ผลการทดลองการเผาไหม้แบบธรรมดา (Conventional combustion) และการใช้อากาศเป็นขั้น (Air-staged combustion) เมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	58
4.1.1 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาที่อัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ	58
4.1.2 ผลกระทบของสัดส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ.....	60
4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local}) ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ... 61	
4.1.4 ผลกระทบของความสูง (Z) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) ที่อัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ.....	63
4.1.5 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) ที่อัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ.....	64
4.1.6 ผลกระทบของสัดส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ	66
4.2 ผลการทดลองการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วม (Biomass co-firing) ระหว่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (เชื้อเพลิงปฐมภูมิ) และเปลือกถั่วลิสง (เชื้อเพลิงหุติยภูมิ).....	67
4.2.1 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงหุติยภูมิต่าง ๆ	67
4.2.2 ผลกระทบของสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงหุติยภูมิ (EF_2) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ.....	68
4.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local}) ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ... 69	
4.2.4 ผลกระทบของความสูง (Z) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงหุติยภูมิต่าง ๆ.....	71
4.2.5 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงหุติยภูมิต่าง ๆ.....	73

4.2.6 ผลกระทบของสัดส่วนเชื้อเพลิงฟอสซิล (EF ₂) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ.....	76
4.3 การสร้างสมการเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	77
4.3.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติต่าง ๆ	77
4.3.2 สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	82
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	84
5.1 สรุปผลการทดลอง	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
รายการสัญลักษณ์.....	87
ภาคผนวก ก การทดสอบเพื่อหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสม (fuel feeder calibration) ...	90
ภาคผนวก ข การหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด (Uncertainty).....	92
ภาคผนวก ค การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา TS-FBC	93
ภาคผนวก ง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาที่สภาวะต่าง ๆ.....	102
ภาคผนวก จ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่สภาวะต่าง ๆ.....	104
ภาคผนวก ฉ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงที่สภาวะต่าง ๆ	113
ภาคผนวก ช ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมที่สภาวะต่าง ๆ.....	115
ภาคผนวก ซ ค่าความคลาดเคลื่อนของสมการ Nu	116
รายการอ้างอิง	119
ประวัติผู้เขียน.....	124

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงความเร็วอากาศในการทำฟลูอิดไดเซชันและช่องว่างภายในเบดที่บริเวณต่าง ๆ....	35
ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขของงานวิจัย	36
ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุถมพ์	43
ตารางที่ 3.3 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง	48
ตารางที่ 3.4 แสดงการวิเคราะห์แบบ Proximate analysis และ Ultimate analysis บนฐาน as-received ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและเปลือกถั่วลิสง	48
ตารางที่ 3.5 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่สัดส่วนโดยพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ	49
ตารางที่ 3.6 อัตราการไหลและความเร็วของอากาศที่สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ...	52
ตารางที่ 3.7 อัตราการไหลและความเร็วของอากาศที่สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงต่าง ๆ.....	52



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน [6]	5
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์การเกิดฟลูอิดไชน์เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ [6]	7
รูปที่ 2.3 การแบ่งกลุ่มอนุภาคเบดด้วยวิธี Geldart [9]	8
รูปที่ 2.4 กลไกในการถ่ายเทความร้อนของส่วนที่เกิดฟลูอิดไชน์ในบริเวณ Dense bed [12]	10
รูปที่ 2.5 ผลของความเร็วฟลูอิดไชน์ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [14].....	14
รูปที่ 2.6 ผลกระทบของความเร็วก๊าซต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย.....	15
รูปที่ 2.7 ผลของความเร็วก๊าซที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับอนุภาคขนาด.....	15
รูปที่ 2.8 ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา (1) ท่ออากาศปฐมภูมิ (2) กล่องดักอากาศปฐมภูมิ (3) ห้องฟลูอิดไชน์เบด (4) แผ่นกั้นให้เกิดการแปรปรวนของเบด (5) ตำแหน่งวัดค่า (6) หัวกระจายอากาศแบบ Nozzle (7) ท่ออากาศทุติยภูมิ (8) ตำแหน่งวัดความดันตกคร่อม (9) ตำแหน่งวัด (10) ท่อทางออก [17].....	16
รูปที่ 2.9 ผลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [17].....	17
รูปที่ 2.10 ผลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [18]....	17
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงผลของความเร็วอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	18
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ [19]	18
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงผลของความเร็วอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	19
รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในแนวรัศมี.....	19
รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี.....	20
รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณกลางเตาที่ความสูงต่าง ๆ และขนาดของอนุภาคเบดที่ความเร็วต่าง ๆ [16].....	20
รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณกลางเตาที่ความสูงต่าง ๆ และขนาดของอนุภาคเบดที่ความเร็วต่าง ๆ [16].....	21

รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับขนาดอนุภาคเบด [23]	21
รูปที่ 2.19 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าการถ่ายเทความร้อน [14]	22
รูปที่ 2.20 ผลกระทบของมุมที่ใช้ในการวัดต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [14]	22
รูปที่ 2.21 แสดงผลกระทบของมุมที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มุมต่าง ๆ และ ที่ขนาดเบด ก) 275 μm , ข) 475 μm และ ค) 625 μm [24]	23
รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและแผ่นกระจายอากาศ [19]	24
รูปที่ 2.23 อุปกรณ์สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [25]	25
รูปที่ 2.24 แสดงอุปกรณ์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [26]	25
รูปที่ 2.25 เครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบใช้หลักการ 1 มิติ [26]	26
รูปที่ 2.26 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ MicroFoil™ heat transfer sensor ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์การวัด (ก) 0.0127 m (ข) 0.0254 m [28]	28
รูปที่ 2.27 อุปกรณ์การวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [21]	28
รูปที่ 2.28 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการวัด [21]	29
รูปที่ 2.29 แสดงเชื้อเพลิงร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวลอัดแท่ง	29
รูปที่ 2.30 การปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับฟางข้าวอัดแท่งที่สัดส่วนโดยมวลต่าง ๆ ก) CO ข) NO _x และ ค) SO ₂ [29]	30
รูปที่ 2.31 แสดงการปลดปล่อยมลพิษของ NO ทางออกของเตาที่สัดส่วนโดยพลังงานต่าง ๆ [4]....	31
รูปที่ 2.32 แสดงการปลดปล่อยของ NO _x บริเวณทางออกของเตาที่สัดส่วนต่าง ๆ [30].....	31
รูปที่ 3.1 เตาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด	37
รูปที่ 3.2 ลักษณะเตาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด	38
รูปที่ 3.3 ขนาดของเตาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด (TS-FBC)	38
รูปที่ 3.4 แผ่นกระจายอากาศแบบ 11 ใบ 14 องศา.....	39
รูปที่ 3.5 พัดลมปฐมภูมิ (Primary blower)	40
รูปที่ 3.6 พัดลมทุติยภูมิและตติยภูมิ (Secondary and tertiary blower).....	40

รูปที่ 3.7 เครื่องป้อนเชื้อเพลิง (Screw Feeder).....	41
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะด้านบนและด้านล่างของไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone Collector).....	41
รูปที่ 3.9 หัวเผาเชื้อเพลิง (Burner).....	42
รูปที่ 3.10 เกทวาล์ว (Gate valve).....	42
รูปที่ 3.11 วัสดุลัมพ์ (Lump).....	43
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [18].....	44
รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊สอัตโนมัติ (Testo-350 New XL).....	45
รูปที่ 3.14 สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Thermocouple type-K).....	46
รูปที่ 3.15 เครื่องเก็บข้อมูล (Data logger).....	46
รูปที่ 3.16 ทรายซิสิกานาขนาด 450-550 μm	47
รูปที่ 3.17 ซิวมวลที่ใช้ในการทดลอง ก) เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ข) เปลือกถั่วลิสง.....	47
รูปที่ 3.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวสัมผัส (T_s) กับเวลา (t).....	54
รูปที่ 3.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(T_s - T_b / T_i - T_b)$ กับเวลา (t).....	55
รูปที่ 3.20 แสดงพื้นที่หน้าตัดวงแหวนรอบจุดการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมี	56
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC.....	59
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนอากาศหตุยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ย	60
รูปที่ 4.3 ผลกระทบของตำแหน่งต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่ $r/R = 0, \pm 1/3, \pm 2/3$ และ ± 1 ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $S/T = \text{ก) } 0 \text{ ข) } 0.1 \text{ ค) } 0.3 \text{ และ ง) } 0.5$.62	
รูปที่ 4.4 ผลกระทบของความสูง (Z) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $S/T = \text{ก) } 0 \text{ ข) } 0.1 \text{ ค) } 0.3 \text{ และ ง) } 0.5$	63
รูปที่ 4.5 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $S/T = \text{ก) } 0 \text{ ข) } 0.1 \text{ ค) } 0.3 \text{ และ ง) } 0.5$	65
รูปที่ 4.6 ผลกระทบของความเร็วของอากาศที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 40-80\%$ และที่สัดส่วนอากาศหตุยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ.....	65

รูปที่ 4.7 ผลกระทบของอัตราส่วนอากาศทุกุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) ที่ EA = 20-80 และ S/T = 0, 0.1, 0.3 และ 0.5 66

รูปที่ 4.8 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC 67

รูปที่ 4.9 ผลกระทบของสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุกุติยภูมิ (EF_2) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา.... 69

รูปที่ 4.10 ผลกระทบของตำแหน่งที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่ $r/R = 0, \pm 1/3, \pm 2/3$ และ ± 1 ที่ $EF_2 = 0, 0.28, 0.53, 0.77$ และ 1 และที่ EA = ก) 40%, ข) 60% และ ค) 80% 70

รูปที่ 4.11 ผลกระทบของความสูง (Z) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $EF_2 =$ ก) 0, ข) 0.28, ค) 0.53, ง) 0.77 และ จ) 1 72

รูปที่ 4.12 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $EF_2 =$ ก) 0 ข) 0.28 ค) 0.53 ง) 0.77 และ จ) 1 74

รูปที่ 4.13 ผลกระทบของความเร็วของอากาศที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน EA = 40-80% และที่สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุกุติยภูมิต่าง ๆ 75

รูปที่ 4.14 ผลกระทบของความสูงต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ EA = ก) 40%, ข) 60% และ ค) 80% 75

รูปที่ 4.15 ผลกระทบของสัดส่วนเชื้อเพลิงทุกุติยภูมิ (EF_2) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) ที่ EA = 40-80% 76

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pr กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุกุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone ข) splash zone และ ค) freeboard zone 77

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ar กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุกุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone และ ข) splash zone 78

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุกุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone และ ข) splash zone และ ค) freeboard zone 79

รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1-S/T$ กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุกุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone และ ข) splash zone และ ค) freeboard zone 80

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง u/u_{mf} กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุกุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone ข) splash zone และ ค) freeboard zone 80

รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง EF_2 กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone ข) splash zone และ ค) freeboard zone 81

รูปที่ 4.22 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Nusselt number ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองที่ ก) dense zone และ ข) splash zone 82

รูปที่ 4.23 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Nusselt number ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองที่บริเวณ freeboard zone ก) $EF_2 = 0$ และ ข) $0 < EF_2 \leq 1$ 83



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาและสร้างความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ในปัจจุบัน พลังงานส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น โดยพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนได้ จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จึงจำเป็นต้องมองหาพลังงานทางเลือก (Alternative energy) หรือพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เพื่อมาทดแทนพลังงานฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไป โดยพลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่พลังงานทางเลือกที่เหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานฟอสซิลสำหรับประเทศไทย คือ พลังงานจากชีวมวล (Biomass energy) เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกเป็นจำนวนมาก จึงทำให้ประชากรส่วนใหญ่ภายในประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก ในแต่ละปีประเทศไทยมีการส่งออกสินค้าทางเกษตรกรรมไปยังต่างประเทศเป็นจำนวนมาก โดยหลังจากการเก็บผลผลิตทางเกษตรมักจะมีของเหลือใช้จากการเกษตรที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกมากมาย ซึ่งของเหลือใช้จากการเกษตรเหล่านี้ต่างสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตความร้อนและผลิตไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลได้เป็นอย่างดี ประกอบกับการสนับสนุนตามนโยบายของภาครัฐที่มีส่งเสริมและสนับสนุนโครงการโรงไฟฟ้าชุมชนของกระทรวงพลังงาน ก่อให้เกิดการลงทุนในโครงการโรงไฟฟ้าชุมชนจำนวนมาก ซึ่งมีการใช้เทคโนโลยีเตาเผาและหม้อน้ำอย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์ ทั้งในด้านการผลิตไฟฟ้าและความร้อน (แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579) [1, 2]

การใช้เตาเผาฟลูอิดเบดสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง (สูงกว่า 98%) และมีการปลดปล่อยมลพิษ (CO , C_xH_y และ NO_x) ในปริมาณต่ำ [3-5] สำหรับการนำความร้อนจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ (แก๊สไอเสีย) มาใช้ประโยชน์จึงเป็นส่วนที่สำคัญในการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สไอเสียไปสู่ผนังน้ำร้อนหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในการออกแบบท่อความร้อนนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปการถ่ายเทความร้อนสำหรับการเผาไหม้

โดยตรง (ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 เฟส) อาจสามารถคำนวณได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนแบบทั่วไป แต่สำหรับการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเผาไหม้ฟลูอิดเบตจะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 เฟส และเกิดขึ้นจากหลายกลไก ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคและจากแก๊สทำฟลูอิดเซชันสู่พื้นผิวของการถ่ายเทความร้อน ส่วนกลไกสำหรับการถ่ายเทความร้อนจะประกอบไปด้วยการพาความร้อน (ของอนุภาคและแก๊ส) และการแผ่รังสีความร้อน [6] โดยกลไกดังกล่าวล้วนเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งในการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดเบตเมื่อเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วมนั้นมีค่อนข้างจำกัด จึงก่อให้เกิดแนวคิดที่จะศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในระบบฟลูอิดเบตโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วม (Biomass co-firing)

ดังนั้นเพื่อศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในเตาเผาฟลูอิดเบต โดยทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีในประเทศไทย อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันและเพิ่มขีดความสามารถในการออกแบบสำหรับผู้ผลิตหม้อไอน้ำสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลและผู้ประกอบกิจการโรงไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดเบตชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปดและสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของค่า Nu ที่เป็นฟังก์ชันกับตัวแปร Ar , Pr , Re , $1-S/T$, u/u_{mf} และ EF_2 โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาจะถูกวัดทั้งในแนวรัศมีและตลอดความสูงของเตาเผาเมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสและเปลือกถั่วลิสง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดเบตชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปด
2. เพื่อสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของค่า Nu ที่เป็นฟังก์ชันกับตัวแปร Ar , Pr , Re , $1-S/T$, u/u_{mf} และ EF_2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดเบตชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปด โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1.3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาวะอากาศในการเผาไหม้แบบธรรมดา (Conventional combustion) และการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น (Air-staged combustion) ประกอบด้วย

1.3.1.1 เชื้อเพลิงชีวมวล คือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

1.3.1.2 อัตราการป้อนคงที่ (fuel feed rate, FR) คือ 22.5 kg/h [7]

1.3.1.3 ปริมาณอากาศส่วนเกิน (excess air, EA) คือ 20%, 40%, 60% และ 80%

1.3.1.4 สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม (secondary to total air ratio, S/T) คือ 0, 0.1, 0.3 และ 0.5

1.3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วม (Biomass co-firing) ประกอบด้วย

1.3.2.1 เชื้อเพลิงปฐมภูมิ (primary fuel) คือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

1.3.2.2 เชื้อเพลิงทุติยภูมิ (secondary fuel) คือ เปลือกถั่วลิสงสับ

1.3.2.3 ความร้อนขาเข้าคงที่ (fixed heat input) 72.55 kW_{th}

1.3.2.4 ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) คือ 40%, 60% และ 80%

1.3.2.5 สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (energy fraction of secondary fuel, EF_2) คือ 0, 0.28, 0.53, 0.77 และ 1

โดยวัสดุเบดที่ใช้ คือ ทราบซิลิกาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 450–550 μm ที่ความสูงเบด 30 cm เหนือแผ่นกระจายอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะวัดในแนวรัศมี (r/R) เท่ากับ 0, $\pm 1/3$, $\pm 2/3$ และ ± 1 ที่ตำแหน่งระดับความสูงเท่ากับ 0.46, 0.95, 1.47, 2.08 และ 2.57 m เหนือแผ่นกระจายอากาศแบบวงแหวนเกลียวโดย Swirl Number เท่ากับ 2.76

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถอธิบายถึงผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) และสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด

1.4.2 สามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

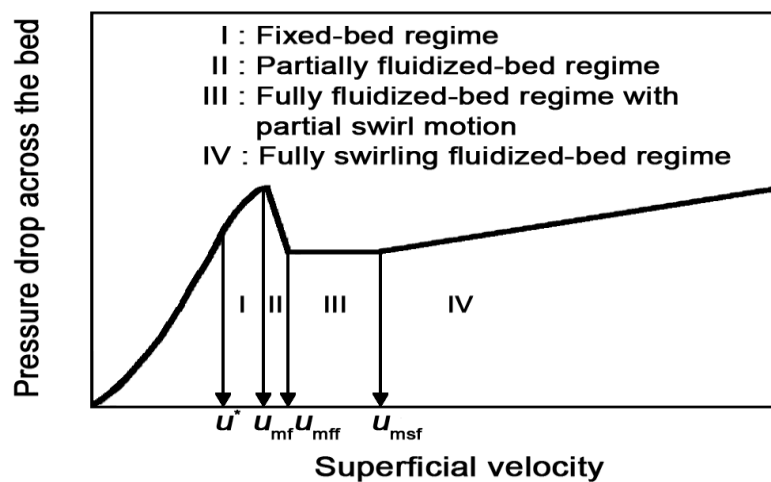
ฟลูอิดเซชัน เป็นการปฏิบัติการแบบหนึ่ง โดยอาศัยการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงและอนุภาคของแข็งที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ซึ่งวางตัวอยู่เหนือตะแกรง เรียกว่า แผ่นกระจายอากาศ (Air distributor) ทำหน้าที่กระจายอากาศสู่อนุภาคของแข็งที่อยู่ด้านบน โดยอากาศจะไหลสัมผัสผ่านอนุภาคของของแข็งในคอลัมน์นั้น ๆ โดยบริเวณที่อนุภาคของแข็งครอบครองอยู่ในคอลัมน์นั้น ๆ เรียกว่า เบด (Bed) ซึ่งเป็นสารเฉื่อย (Inert material) เช่น ทราย หรือสารที่ทำปฏิกิริยา (Reaction Material) เช่น หินปูน (Limestone) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาดภายในระบบฟลูอิดซ์เบดนี้ ลักษณะปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้โดยการอัดอากาศที่มีทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงให้ไหลผ่านแผ่นกระจายอากาศเพื่อสัมผัสกับเบดที่อยู่ด้านบน เมื่อความเร็วของของอากาศที่ถูกอัดที่ทำให้สภาวะสมดุลระหว่างแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักอนุภาคของของแข็งกับแรงยกตัวของอากาศ อนุภาคของของแข็งจะสามารถลอยตัวได้อย่างอิสระ ลักษณะเหมือนของไหล

ระบบเผาไหม้ด้วยเทคนิคฟลูอิดซ์เบดได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถเผาไหม้กับเชื้อเพลิงแข็งได้ทุกชนิด เพราะอุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าใกล้เคียงตลอดทั่วเตาเผา ทำให้อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงค่อนข้างสม่ำเสมอส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกันตลอดทั้งเตาเผา สามารถเผาเชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นสูงได้ดี อีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟคงที่และลดการปลดปล่อยมลพิษออกสู่ภายนอก [6]

2.1 พฤติกรรมของฟลูอิดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

พฤติกรรมในการเกิดฟลูอิดเซชันภายในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดชนิดหมุนวนนั้น ประกอบด้วย 4 ลักษณะ ดังนี้ 1) ในช่วงแรก อนุภาคเบดจะหยุดนิ่งซึ่งเป็นช่วงที่เบดไม่มีการขยับตัว (Fixed-bed) เมื่ออากาศไหลผ่านมายังเบดที่อยู่หนึ่งจะส่งผลให้ 2) เบดบางส่วนเริ่มขยับตัวบางส่วน (Partially fluidized-bed regime) ซึ่งความดันจะต่ำลงอย่างรวดเร็วตามการขยายตัวที่สูงขึ้นของเบด 3) จากนั้นเบดจะขยับตัวแบบฟองอากาศ โดยส่วนด้านล่างของเบดจะหมุนวนซึ่งในช่วงนี้ความดันจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Fully fluidized-bed regime with partial swirl motion) และ 4) อนุภาคของเบด

จะเกิดการหมุนวนอย่างสมบูรณ์ (Fully swirling fluidized-bed regime) โดยในช่วงนี้เบดจะเกิดการหมุนวนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.1-2.2



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน [6]

2.1.1 เบดนิ่ง (Fixed-bed regime)

เมื่ออากาศไหลผ่านเบดขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ๆ ของแฉ่งที่วางตัวอยู่บนแผ่นกระจายอากาศ (Air distributor) จะวางตัวนิ่งไม่มีการเคลื่อนไหว อากาศจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างระหว่างเบด เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านเบดที่วางนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหลกระทำต่ออนุภาคของแฉ่งในทิศทางการไหล เรียกแรงนี้ว่า *แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Draft force)* ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) ในขณะที่อากาศไหลผ่านเบดนั้นจะเกิดแรงเสียดทานซึ่งส่งผลให้พลังงานของของไหลลดลง และเมื่อวัดความดันตกคร่อมของเบด พบว่าความดันตกคร่อมนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun equation ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U(1-g)^2}{(\phi d_p)^2 g^3} + \frac{1.5\rho_g U^2(1-g)}{(\phi d_p)^2 g^3} \quad (2.1)$$

โดย ΔP คือ ความดันตกคร่อมระหว่างเบด (kPa)

μ คือ ความหนืดของตัวกลางทำฟลูอิด์เบด (m²/s)

- U คือ ความเร็วของอากาศของตัวกลางทำฟลูอิดเซชัน (m/s)
 g คือ ความพรุนของวัสดุเบด
 L คือ ความสูงเบด (m)
 φ คือ คุณสมบัติของวัสดุที่บรรจุ สามารถคำนวณได้จาก $\varphi = \pi^{1/3} (6V_p)^{2/3} / A_p$
โดย V_p คือ ปริมาตรของอนุภาค (m^3) และ A_p คือ พื้นที่ผิวของอนุภาค (m^2)

2.1.2 เบดเริ่มเคลื่อนตัว (Partial fluidized-bed regime)

เมื่อความเร็วของอากาศเคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ โดยความเร็ว ณ จุดนี้เรียกว่า *ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf})* ซึ่งเป็นสภาวะที่ความดันตกคร่อมระหว่างเบดจะมีค่าสูงสุดและเป็นจุดแรกที่เบดเริ่มเคลื่อนที่คล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบด ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด

จากงานวิจัยของ Kaewklum et al. (2009) ได้ทำการศึกษาหาสมการเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้น สำหรับ U_{mf} และ ΔP_{max} โดยความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันและความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาฟลูอิดเบดทรงกรวย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ตามลำดับ [8]

$$U_{mf} = 0.06 \frac{\mu}{d_p \rho_f} \left[\frac{\rho_f d_p^3 (\rho_s - \rho_f) g}{\mu} \right]^{0.61} \left(\frac{h}{D_o} \right)^{1.67} \quad (2.2)$$

$$\Delta P = 3.43 U_{mf}^{0.33} \left(\frac{h}{D_o} \right)^{1.03} \quad (2.3)$$

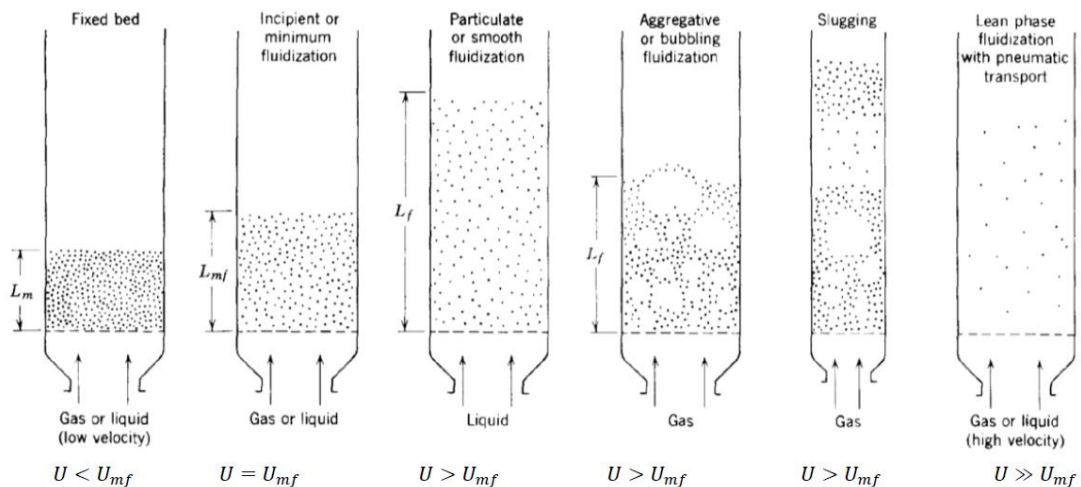
- โดย U_{mf} คือ ความเร็วของอากาศของตัวกลางทำฟลูอิดเซชัน (m/s)
 ρ_f, ρ_s คือ ความหนาแน่นของของไหลและวัสดุเบดตามลำดับ (kg/m^3)
 g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2
 h คือ ความสูงของเบด (m)
 D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางฐานทรงกรวย (m)

2.1.3 เบดฟองอากาศ (Fully fluidized-bed regime with partial swirl motion)

พฤติกรรมของเบดในช่วงนี้ จะพบที่ $U > U_{mff}$ ซึ่งจะเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ โดยด้านบนของเบดจะแสดงลักษณะของฟลูอิดเซชันแบบฟองอากาศแต่ยังไม่เกิดการหมุนวนของเบด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเร็วมากขึ้น ด้านล่างของเบดเกิดการหมุนของเบดอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการเพิ่มความเร็วเป็นการเพิ่มโมเมนตัมซึ่งจะส่งผลต่อการหมุนวนของอากาศ ในพฤติกรรมนี้ความดันตกคร่อมระหว่างเบดจะมีค่าคงที่ถึงแม้จะเพิ่มขึ้นของความเร็วในการทำฟลูอิดเซชันก็ตาม หรือ $d(\Delta P)/dU \approx 0$

2.1.4 เบดหมุนวนอย่างสมบูรณ์ (Fully swirling fluidized-bed regime)

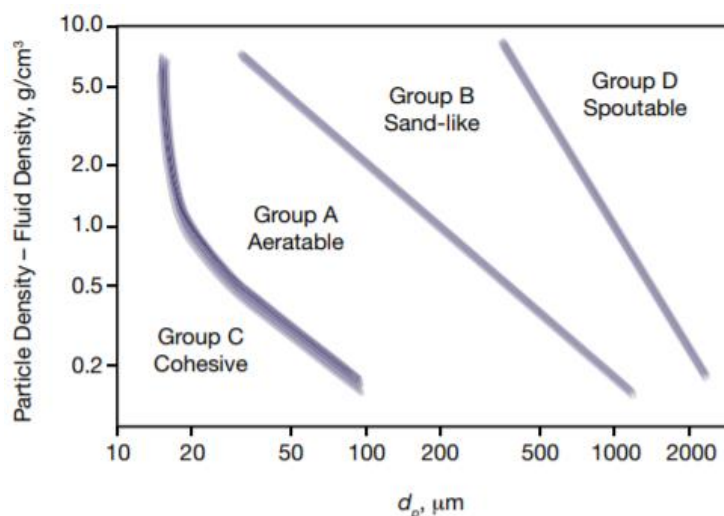
สำหรับพฤติกรรมการไหลเวียนแบบหมุนวนอย่างสมบูรณ์นั้น จะพบว่า $U \geq U_{msf}$ เมื่อทำการทดสอบกับเบดที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ (Coarse particle) จะพบว่าพฤติกรรมที่เบดหมุนวนอย่างสมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของเบดอย่างมีนัยสำคัญ โดย U_{msf} จะมีค่าสูงกว่า U_{mff} อยู่ประมาณ 30-60% สำหรับพฤติกรรมนี้ ความชันของกราฟจะเป็นบวก หรือ $d(\Delta P)/dU > 0$



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์การเกิดฟลูอิดเซชันเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ [6]

2.2 การแบ่งกลุ่มอนุภาคเบดด้วยวิธีของ Geldart

การจำแนกหมวดหมู่อนุภาคเบดของ Geldart คือ การคาดการณ์พฤติกรรมฟลูอิดเซชัน (Fluidization) ของอนุภาคเบดภายในเตาเผาฟลูอิดส์เบด โดยอาศัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคเบด และความหนาแน่นของอนุภาคเบดในการจำแนกหมวดหมู่อนุภาคเบดออกเป็น 4 กลุ่ม [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแบ่งกลุ่มอนุภาคเบตด้วยวิธี Geldart [9]

2.2.1 กลุ่ม A เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่าง 30-125 μm และมีความหนาแน่นต่ำ ($1,500 \text{ kg/m}^3$) ซึ่งเป็นกลุ่มที่อากาศสามารถผ่านอนุภาคได้ อนุภาคของแข็งนี้สามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายที่ความเร็วต่ำ อนุภาคของเบตจะมีลักษณะการเคลื่อนที่สม่ำเสมอเหมือนของไหลแบบราบเรียบ (Smooth fluidization) ที่แรงดันสูง ๆ อนุภาคกลุ่มนี้จะขยายตัวได้ทั้งหมด ถ้าเตาเผาฟลูอิดเซชันเบตไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับอนุภาคเบตกลุ่ม A จะทำให้อนุภาคเบตลอยหายไปจากตำแหน่งเบต (Bed zone)

2.2.2 กลุ่ม B เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยระหว่าง 150-1,000 μm โดยมีลักษณะคล้ายกับทราย (Sandlike particles) โดยอนุภาคในกลุ่มนี้ มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากความเร็วน้อยสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity) กับความเร็วน้อยสุดที่ทำให้เกิดฟองอากาศ (Minimum bubbling velocity) นั้นมีค่าใกล้เคียงกันส่งผลให้อนุภาคกลุ่มนี้เกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายและสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในรูปแบบฟองอากาศ (Bubbling action) และเมื่อความเร็วของก๊าซมากขึ้นก็จะยิ่งส่งผลให้เกิดฟองฟลูอิดเซชันมากขึ้นตามไปด้วย

2.2.3 กลุ่ม C เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีการยึดเกาะได้ดี มีขนาดเล็กมาก และมีความละเอียดที่สุด โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยน้อยกว่า 30 μm อนุภาคในกลุ่มนี้จะเกิดการฟลูอิดเซชันได้ยาก เนื่องจากแรงยึดเกาะของอนุภาคมีค่าสูงกว่าแรงดันของก๊าซของไหล และอนุภาคมักจะจับตัวกันเป็นก้อน

2.2.4 กลุ่ม D เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นมาก โดยอนุภาคเบตของกลุ่มนี้จะมีลักษณะฟองอากาศเกิดขึ้นได้ช้ากว่ากลุ่มอื่น ๆ เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้อากาศสามารถไหลพุ่งผ่านขึ้นมาได้ง่าย (Spouting fluidization) ถึงแม้ว่าวัสดุเบตจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ แต่ก็สามารถที่จะเกิดการฟลูอิดิเซชันได้เหมือนกัน เพียงแต่พฤติกรรมการเคลื่อนที่สำหรับอนุภาคในกลุ่มนี้จะมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนและควบคุมได้ยากเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของก๊าซที่ไหลผ่าน

2.3 การถ่ายเทความร้อนในเตาเผาฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชันเบตมักถูกนำไปใช้ในกระบวนการที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ๆ เช่น การผลิตไอน้ำเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า การอบแห้ง เป็นต้น เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเบตสูง โดยอยู่ในช่วง $200-500 \text{ W/m}^2\text{K}$ โดยทั่วไปการถ่ายเทความร้อนในเตาเผาชนิดฟลูอิดิเซชันเบตแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างของผสมภายในฟลูอิดิเซชันเบตกับพื้นผิวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนหรือผนังเตา และการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สกับของแข็งภายในฟลูอิดิเซชันเบต ซึ่งการถ่ายเทความร้อนทั้งสองลักษณะนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ คุณสมบัติทางความร้อนของแก๊สและของแข็ง เรือนไขทางพลศาสตร์ (Hydrodynamic) ภายในวัสดุเบตและการจัดรูปทรงทางเรขาคณิตของเตาฟลูอิดิเซชันเบต เช่น ผนังเตา ท่อน้ำรับความร้อนที่จมอยู่ในเบต และแผ่นกระจายอากาศ เป็นต้น

การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดิเซชันเบต ประกอบด้วยกลไกการถ่ายเทความร้อน 3 ส่วน คือ 1) การพาความร้อนของอนุภาคไปสู่พื้นผิว (Particle convection heat transfer, h_{pc}) 2) การพาความร้อนของแก๊สไปสู่พื้นผิว (Gas convection heat transfer, h_{gc}) 3) การแผ่รังสีความร้อน (Radiation, h_r) โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (h) สามารถประมาณได้จากผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดังในสมการที่ 2.4 [10, 11]

$$h = h_{pc} + h_{gc} + h_r \quad (2.4)$$

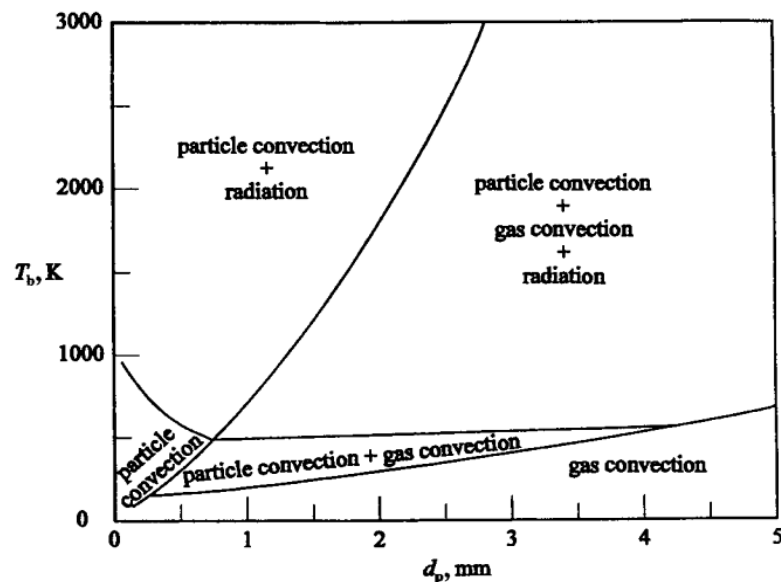
โดย	h_{pc}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค ($\text{W/m}^2\text{K}$)
	h_{gc}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซทำฟลูอิดิเซชัน ($\text{W/m}^2\text{K}$)
	h_r	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี ($\text{W/m}^2\text{K}$)

2.3.1 การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค (Particle convection heat transfer, h_{pc})

การหมุนเวียนของอนุภาคที่มีก๊าซและของแข็งอยู่ในระบบฟลูอิดเซชันอย่างหนาแน่นนั้นพบว่า เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากอนุภาค โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคจะมีค่าสูงขึ้นก็ต่อเมื่อมีการแลกเปลี่ยนระหว่างเบตกับพื้นผิว ซึ่งอิทธิพลการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเบตและอุณหภูมิของเบต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การพาความร้อนจากอนุภาคมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นที่อุณหภูมิเบตต่ำและอนุภาคเบตขนาดใหญ่ที่มีอิทธิพลจากการพาความร้อนจากก๊าซทำฟลูอิดเซชันดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอันเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$h_{pc} = \frac{1 - \alpha_b}{R_p} \quad (2.5)$$

โดย α_b คือ ค่าความพรุนของวัสดุ
 R_p คือ ค่าความต้านทานทางความร้อน (W/m^2K)



รูปที่ 2.4 กลไกในการถ่ายเทความร้อนของส่วนที่เกิดฟลูอิดเซชันในบริเวณ Dense bed [12]

สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคนั้น สามารถแบ่งการต้านทานความร้อนได้ 2 ส่วน ดังนี้ 1) ความต้านทานจากอนุภาค $1/h_p$ 2) ความต้านทานอันเกิดจากฟิล์มอากาศ $1/h_f$ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคจึงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6-2.8

$$h_{pc} = \frac{1 - \alpha_b}{1/h_p + 1/h_f} \quad (2.6)$$

โดย h_p คือ ค่าการพาความร้อนจากอนุภาค (W/m^2K) ส่วน h_p และ h_f สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$h_p = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{k_{em} \rho_p (1 - \alpha_{mf}) c f_b}{1 - \alpha_b} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

$$h_f = \frac{\xi k}{d_p} \quad (2.8)$$

ซึ่ง ξ คือ ค่าแฟกเตอร์อยู่ในช่วง 4 ถึง 10 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

โดย	k_{em}	คือ ค่าการนำความร้อนเมื่อเบตอยู่ในสถานะแขวนลอย (W/mK)
	c	คือ ค่าความจุความร้อนของอนุภาคเบต (kJ/kgK)
	f_b	คือ ความถี่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเบต (Hz)
	α_{mf}	คือ ค่าความพรุนของวัสดุเบตในช่วงที่เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน
	α_b	คือ ค่าความพรุนของวัสดุเบต
	k	คือ ค่าการนำความร้อนของอนุภาคเบต (W/mK)
	h_p	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอนุภาค (W/m^2K)
	h_f	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ (W/m^2K)

2.3.2 การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนของก๊าซ (Gas convection heat transfer, h_{gc})

การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนของก๊าซ เกิดจากก๊าซที่ทำให้เกิดการฟลูอิดเซชันไหลซึมผ่านอนุภาคของเบต จากนั้นเกิดการสัมผัสกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลต่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเกิดขึ้น สำหรับในกระบวนการฟลูอิดเซชันที่ใช้เบตที่มีอนุภาคเล็ก การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากก๊าซนั้นจะมีผลน้อยมากต่อส่วนที่เกิดฟลูอิดเซชันอย่างหนาแน่น แต่อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซจะมีอิทธิพลอย่างมากในส่วนที่มีอนุภาคเบาบาง (Freeboard zone) โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากก๊าซจะเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่ผิวที่ถูกแลกเปลี่ยนความร้อน แต่อย่างไรก็ตาม เราสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากก๊าซได้ โดยตัวแปรที่ไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Denloye และ Botterill (1978) แสดงดังสมการที่ 2.9 - 2.12 นอกจากนี้ยังพบว่า การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซจะมีบทบาทโดดเด่นต่อกระบวนการฟลูอิดเซชันก็ต่อเมื่ออนุภาคและความดันในการทำฟลูอิดเซชันเพิ่มขึ้น [13]

$$\frac{h_{gc} d_p}{k} = 0.009 Ar^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.9)$$

$$\frac{h_{gc} \sqrt{d_p}}{k} = 0.086 Ar^{0.29} \quad (2.10)$$

$$Pr = c_{p,g} \mu_g / k_g \quad (2.11)$$

โดย $c_{p,g}$ คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ (J/kgK)
 μ_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซ (kg/ms)
 k_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซ (W/mK)

$$Ar = d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g / \mu_g^2 \quad (2.12)$$

โดย d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (m)
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (kg/m³)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคเบต (kg/m^3)

2.3.3 การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน (Radiation, h_r)

การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนจะมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อกระบวนการฟลูอิดีเซชันเบตที่มีกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 600°C) [12] เมื่อฟลูอิดีเซชันเบตถูกกำหนดให้เป็น “วัตถุเทา” ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนระหว่างอุณหภูมิเบต (T_b) กับอุณหภูมิพื้นที่ผิวที่แลกเปลี่ยนความร้อน (T_s) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$h_r = \frac{J_r}{T_b - T_s} = \sigma_b \varepsilon_{bs} (T_b^2 - T_s^2)(T_b - T_s) \quad (2.13)$$

โดย J_r คือ สนามความร้อนในการแผ่รังสีความร้อน
 σ_b คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลส์แมน ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)
 T_b คือ อุณหภูมิเบต (K)
 T_s คือ อุณหภูมิผิวรับความร้อน (K)
 ε_{bs} คือ ค่าความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน (Emissivity) ขึ้นอยู่กับรูปร่างคุณสมบัติของวัสดุ และความสามารถในการดูดกลืนของวัตถุนั้น ๆ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.14

$$\varepsilon_{bs} = \left(\frac{1}{\varepsilon_b} + \frac{1}{\varepsilon_s} - 1 \right)^{-1} \quad (2.14)$$

โดย ε_b คือ ค่าความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของเบต
 ε_s คือ ค่าความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของผิว

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

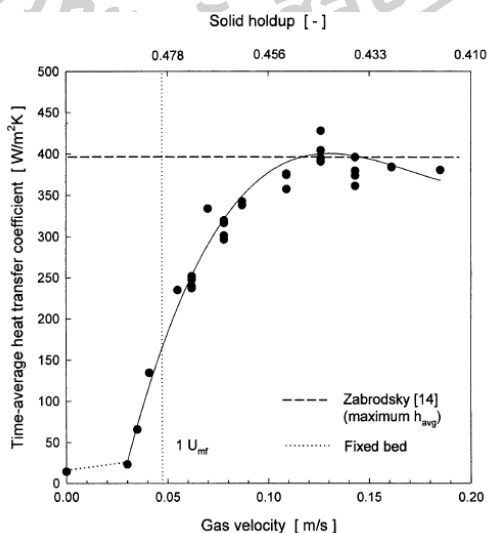
2.4.1 ผลของอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

ความเร็วในการทำฟลูอิดีเซชันมีผลอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยในงานวิจัยของ Kim et al. (2003) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างเบตกับพื้นผิว

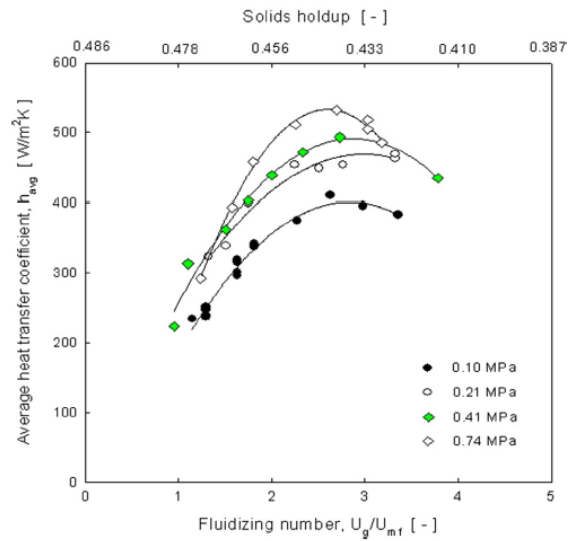
แลกเปลี่ยนความร้อนและพฤติกรรมการยกตัวของอนุภาคในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองอากาศ ซึ่งจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็วในการทำฟลูอิดไคซ์ชันจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วทำให้มีความถี่ของการเกิดฟองอากาศเพิ่มขึ้นและลดระยะเวลาในการสัมผัสของ Emulsion ดังแสดงในรูปที่ 2.5

Kim S.W. and Kim S.D. (2013) ได้มีการศึกษาผลกระทบของความเร็วของก๊าซและความดันที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยระหว่างท่อแนวนอนที่มีการสัมผัสกับอนุภาคเบดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed heat exchangers : FBHE) และพฤติกรรมการยกตัวของอนุภาคในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองอากาศ ซึ่งจากผลการทดลอง ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (h_{avg}) แสดงค่าสูงสุดที่ความดันสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นที่ fluidizing number (u_g/u_{mf}) ที่กำหนด อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างท่อและฟลูอิดไคซ์เบดเป็นฟังก์ชันของการยกตัวของของแข็งและเวลาของอนุภาคที่สัมผัสกับผิวท่อ ซึ่งบ่งบอกถึงการที่ h_{avg} จะสูงขึ้นได้ขึ้นอยู่กับเวลาของอนุภาคที่สัมผัสกับผิวท่อหรือการยกตัวของของแข็งที่เพิ่มขึ้นด้วยความเร็วก๊าซที่เพิ่มขึ้นระยะเวลาที่อนุภาคสัมผัสกับผิวท่อจะสั้นลง โดยพฤติกรรมของฟองอากาศที่รุนแรงและส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (h_{avg}) อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (h_{avg}) จะมีการลดลงได้ด้วยการเพิ่มความเร็วของก๊าซขึ้นไปอีกและจะส่งผลให้การยกตัวของของแข็งเกิดการลดลงเป็นสาเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (h_{avg}) ลดลงได้ดังแสดงในรูปที่

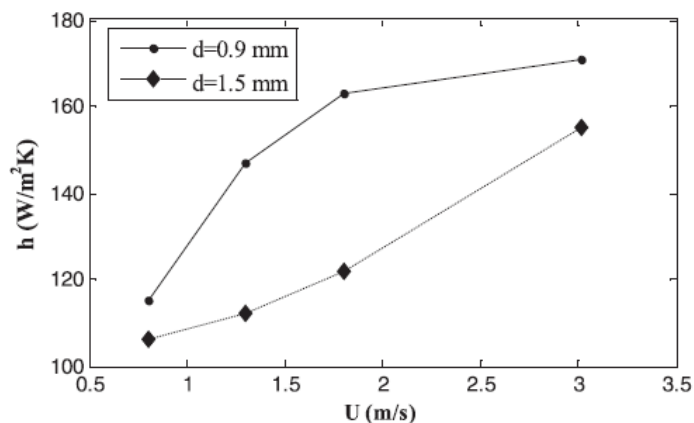
2.6



รูปที่ 2.5 ผลของความเร็วฟลูอิดไคซ์ชันที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [14]



รูปที่ 2.6 ผลกระทบของความเร็วก๊าซต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ที่ความดันแตกต่างกัน [15]

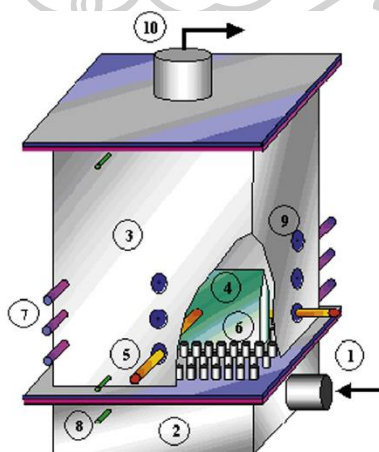


รูปที่ 2.7 ผลของความเร็วก๊าซที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับอนุภาคขนาด $d_p = 0.9 \text{ mm}$ และ $d_p = 1.5 \text{ mm}$ ตามลำดับ [16]

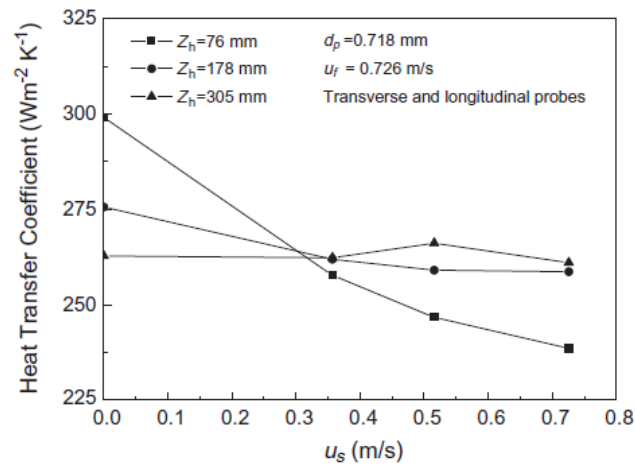
Tawfik et al. (2019) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดไรซ์เบด จากผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วของก๊าซส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคเคลื่อนที่ปั่นป่วนได้ดีทำให้อนุภาคของแข็งผสมกันได้ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคและช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เล็กลงล้วนส่งผลทำให้พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

2.4.2 ผลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

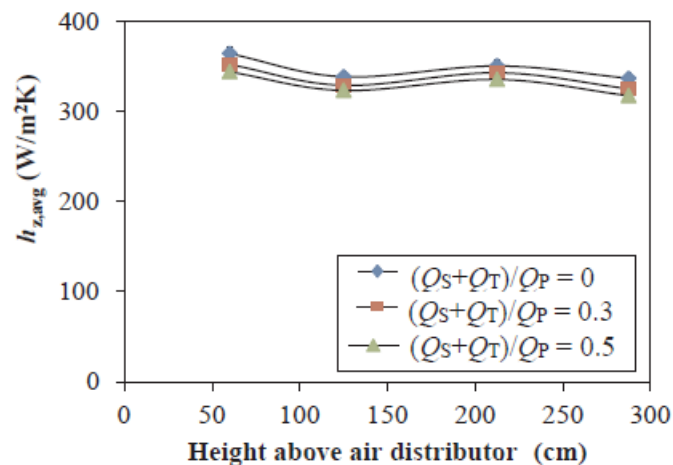
อากาศทุติยภูมิเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดย Lu et al. (2011) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน โดยใช้หัวกระจายอากาศแบบ Nozzle ซึ่งลักษณะของเตาฟลูอิดไคซ์เบดแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 จากผลการทดลองดังแสดงผลในรูปที่ 2.9 พบว่า ความเร็วอากาศทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณที่อยู่ใต้อากาศทุติยภูมิและบริเวณอากาศทุติยภูมิ ($Z_h = 78$ และ 178 mm) ลดลงเป็นผลเนื่องมาจาก 1) อากาศทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความปั่นป่วนในการเกิดฟลูอิดเซชันลดลง 2) อากาศทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เวลาในการสัมผัสกันระหว่างหัววัดและฟองอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งอากาศมีความต้านทานการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirisomboon และ Laowthong (2019) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฟต โดยใช้ทรายซิลิกาเป็นวัสดุเบดที่มีขนาดอนุภาค $300-500$, $600-710$ และ $710-1000$ μm ตามลำดับ ความสูงของเบดอยู่ที่ 30 cm ค่าความเร็วอากาศปฐมภูมิตั้งแต่ $U_{mf}-3U_{mf}$ และปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิต่ออัตราการไหลอากาศปฐมภูมิ $((Q_s+Q_t)/Q_p)$ เท่ากับ 0 , 0.3 และ 0.5 โดยใช้หัวกระจายอากาศแบบ $S_w = 2.76$ และ 2.98 จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออากาศทุติยภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงแต่ลดลงเพียงเล็กน้อย เป็นผลเนื่องมาจากการไหลวนของอากาศทุติยภูมิหยุดการขยายตัวของเบดจึงนำไปสู่การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา (1) ท่ออากาศปฐมภูมิ (2) กล่องดักอากาศปฐมภูมิ (3) ห้องฟลูอิดไคซ์เบด (4) แผ่นกั้นให้เกิดการแปรปรวนของเบด (5) ตำแหน่งวัดค่า (6) หัวกระจายอากาศแบบ Nozzle (7) ท่ออากาศทุติยภูมิ (8) ตำแหน่งวัดความดันตกคร่อม (9) ตำแหน่งวัด (10) ท่อทางออก [17]



รูปที่ 2.9 ผลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [17]

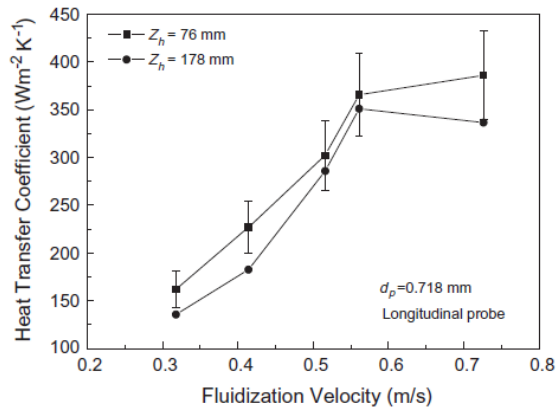


รูปที่ 2.10 ผลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [18]

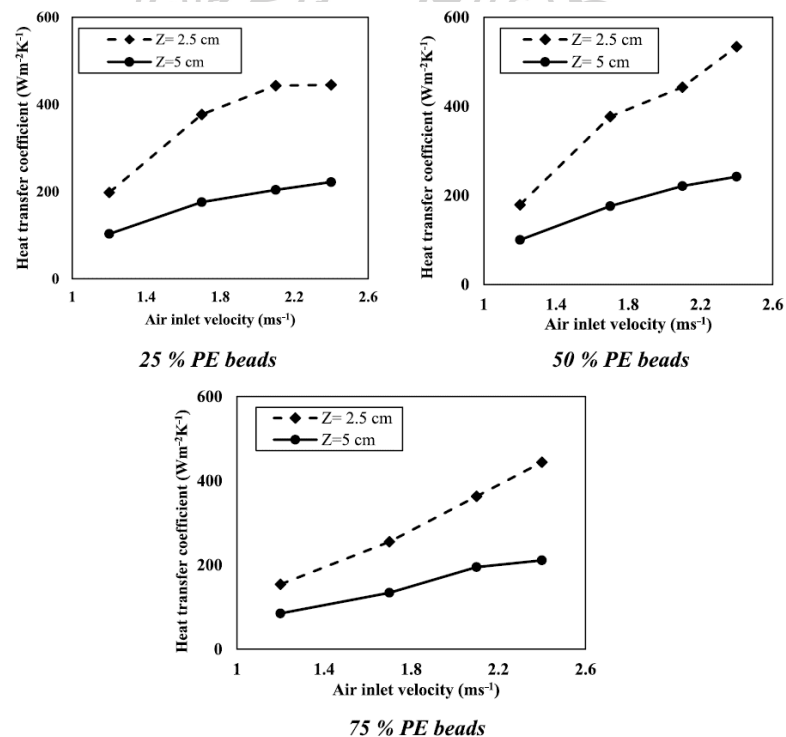
2.4.3 ผลของตำแหน่งความสูงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

ตำแหน่งความสูงภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบตเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยงานวิจัยของ Lu et al. (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอากาศทุติยภูมิและตำแหน่งภายในเตาเผาที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากผลการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 2.11 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำลง เมื่อตำแหน่งในการวัดค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tawfik et al. (2020) ที่ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยวัสดุเบตแบบผสมภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบต ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย Lu et al. (2011) ได้อธิบายว่า เป็นผลมาจากความถี่ในการเกิดฟองอากาศที่สูงขึ้นและขนาดของฟองอากาศเล็กลงที่บริเวณด้านล่างซึ่งติดกับตำแหน่งหัวกระจายอากาศ ทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสและมีความถี่ในการที่ฟองอากาศสัมผัสกับ

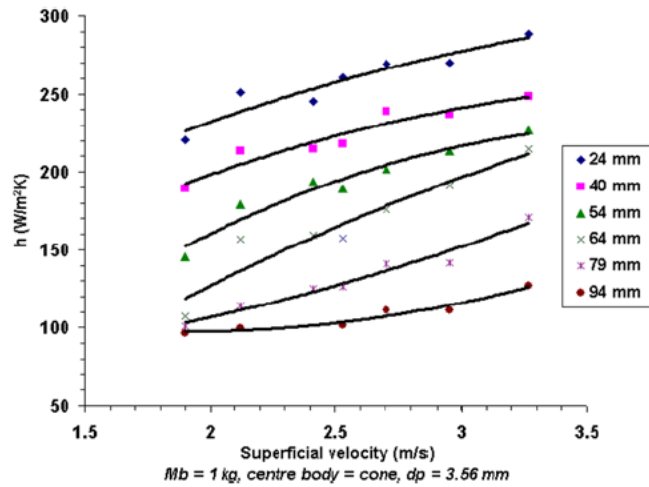
อุปกรณ์วัดมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mohideen et al. (2012) ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงผลของความเร็วอากาศป้อนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งความสูงแตกต่างกัน [17]



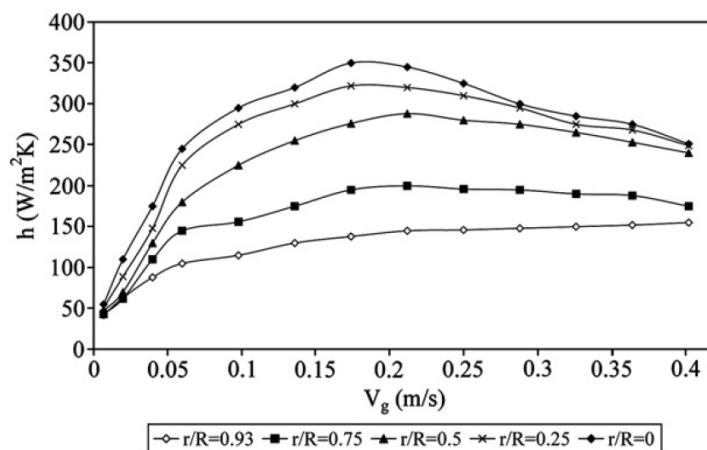
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศป้อนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ [19]



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงผลของความเร็วอากาศป้อนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งความสูงแตกต่างกัน [20]

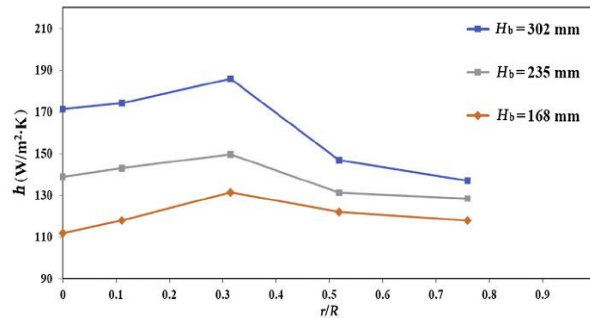
2.4.4 ผลของตำแหน่งการวัดในแนวรัศมีที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

Pisters และ Prakash (2011) ได้ทำการศึกษาระยะการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาฟลูอิดไอซ์เบด ผลการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่า ที่ตำแหน่งตรงกลางมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าตำแหน่งผนังเตาที่ความเร็วก๊าซต่ำ ๆ บ่งบอกได้ว่าที่ตำแหน่งตรงกลางเตามีความปั่นป่วนมากกว่าตำแหน่งผนังเตา และการที่ตำแหน่งของผนังเตามีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำเนื่องมาจากมีค่าความปั่นป่วนของเบดต่ำ และในบริเวณผนังเตามีฟองอากาศขนาดเล็กจึงทำให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำตามไปด้วย



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในแนวรัศมีกับความเร็วก๊าซ [21]

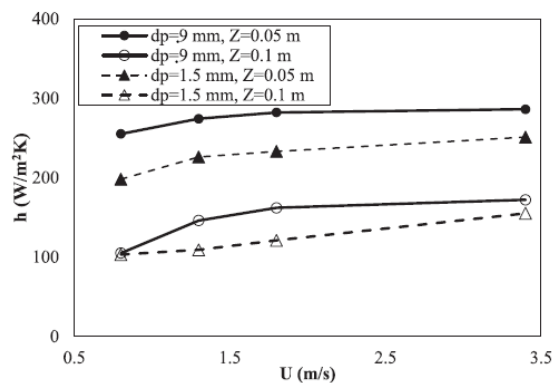
Yaman et al. (2019) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนด้วยอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบด โดยภายในเตาฟลูอิดไคซ์บรรจุอนุภาคเบดขนาด 1 mm และความสูงของเบด 302, 235 และ 168 mm ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่า ทุกความสูงของเบดต่าง ให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของเตาฟลูอิดไคซ์เบด ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี กับความสูงของเบด [22]

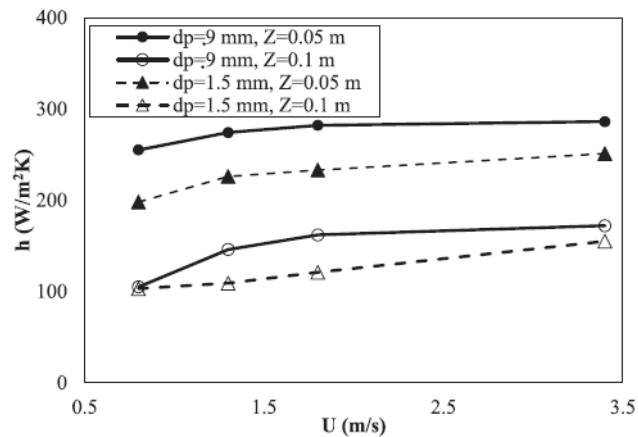
2.4.5 ผลของขนาดอนุภาคเบดที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

Tawfik et al. (2019) ได้ทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการเกิดฟลูอิดไคซ์ชันภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 mm ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าอนุภาคขนาด 1.5 mm ที่ความสูง 0.05 และ 0.1 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กจะทำให้ช่องว่างระหว่างเบดลดลงจึงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวหน้าสัมผัสเพิ่มมากขึ้นและเกิดการผสมกันระหว่างแก๊สร้อนกับอนุภาคเบดได้มากขึ้น

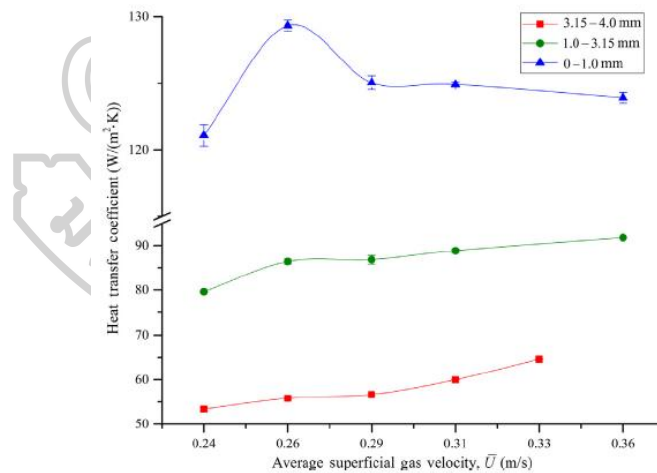


รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณกลางเตาที่ความสูงต่าง ๆ และขนาดของอนุภาคเบดที่ความเร็วต่าง ๆ [16]

อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดการหมุนวนมากกว่าอนุภาคเบดขนาดใหญ่กว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.16-2.17 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jia et al. (2019) ซึ่งได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนอนุภาคชีวมวลภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบด ดังแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณกลางเตาที่ความสูงต่าง ๆ และขนาดของอนุภาคเบดที่ความเร็วต่าง ๆ [16]

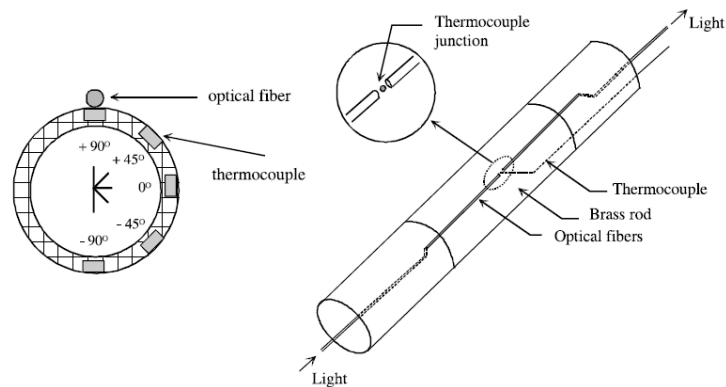


รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับขนาดอนุภาคเบด [23]

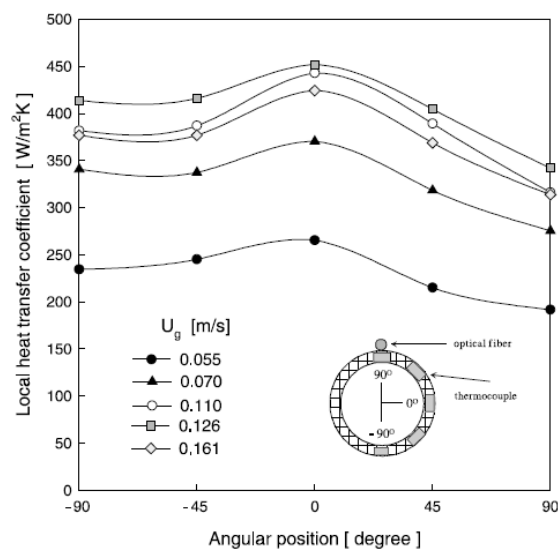
2.4.6 ผลของมุมที่ใช้ในการวัดที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

จากการศึกษาผลกระทบของมุมที่ใช้ในการวัดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคของแข็ง (ทรายซิลิกา) กับแก๊สร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของเตาฟลูอิดไคซ์เบด (FBHE) ที่มีขนาด $0.34 \times 0.50 \times 0.6$ m ของ Kim et al. (2003) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทำมาจากท่อทองแดงยาว

80 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 25.4 และ 19.4 mm ตามลำดับ ติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน (heater) อยู่ภายในท่อทองแดงพร้อมกับมีท่อเพลลอนเป็นวัสดุด้านทานความร้อนประกบทั้งสองข้าง โดยอุปกรณ์จะถูกควบคุมด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการทดลองที่มุมแตกต่างกันดังนี้ $+90^\circ$, $+45^\circ$, 0° , -45° และ -90° ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อุปกรณ์ในการวัดค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยมุม 0° จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงที่สุดที่ความเร็วต่าง ๆ สาเหตุมาจากเกิดการปั่นป่วนส่งผลให้อุณหภูมิเขตกับแก๊สร้อนนั้นผสมกันได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สจะส่งผลให้เขตเกิดฟลูอิดเซชัน เขตที่ลอยอยู่ด้านบนสามารถตกกระทบมายังอุปกรณ์การวัดได้ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.20

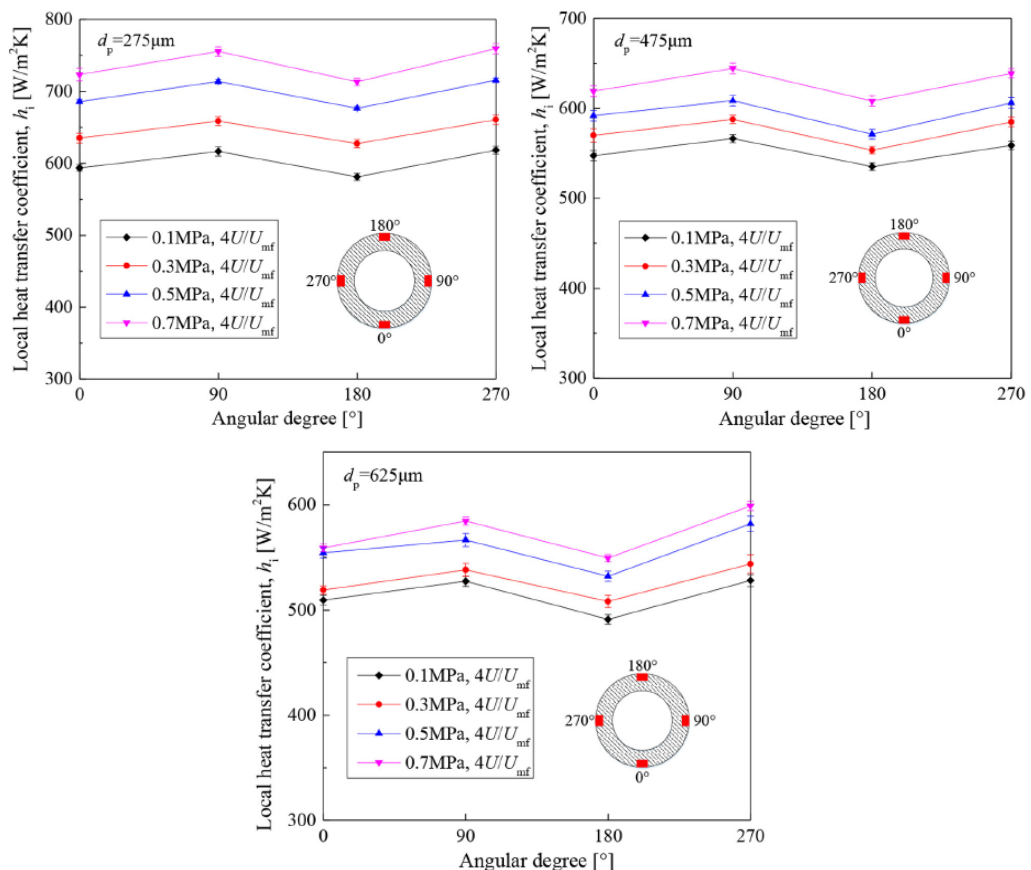


รูปที่ 2.19 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าการถ่ายเทความร้อน [14]



รูปที่ 2.20 ผลกระทบของมุมที่ใช้ในการวัดต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [14]

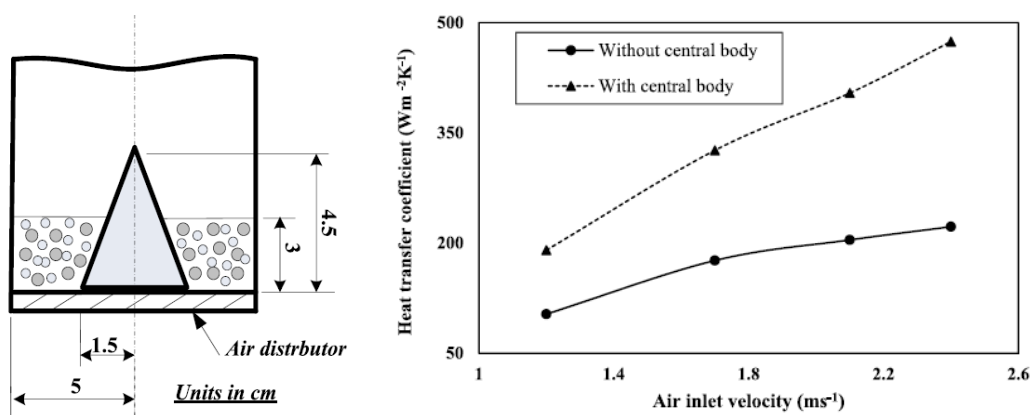
อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang et al. (2021) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลกระทบของมุมที่ใช้ในการวัดลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดซ์เบดที่ขนาดเบด 275 μm , 475 μm และ 625 μm ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มุมแตกต่างกัน ได้แก่ 0° , 90° , 180° และ 270° จากผลการทดลองพบว่าที่มุม 90° และ 270° ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงกว่ามุมอื่น ๆ เนื่องจากการเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบดและลักษณะการไหลของอนุภาคเบดด้านข้างของอุปกรณ์การวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากยิ่งขึ้น และการเพิ่มขึ้นของความดันและความเร็วของอากาศส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่มุม 180° ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะต่ำกว่ามุม 0° เมื่อวัดที่บริเวณอนุภาคเบดเบาบาง ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงผลกระทบของมุมที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มุมต่าง ๆ และที่ขนาดเบด ก) 275 μm , ข) 475 μm และ ค) 625 μm [24]

2.4.7 ผลของแผ่นกระจายอากาศที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

Tawfik et al. (2020) ที่ได้ศึกษาผลกระทบของแผ่นกระจายอากาศแบบหมุนวนภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบด ที่ความสูงของเบด 0.02 m โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างแผ่นกระจายอากาศแบบหมุนวนที่มีทรงกรวยอยู่ตรงกลางของแผ่นกระจายอากาศ (Using central body) แสดงให้เห็นว่าการที่แผ่นกระจายอากาศแบบหมุนวนที่มีทรงกรวยอยู่บริเวณกึ่งกลางของแผ่นกระจายอากาศ ส่งผลให้เกิดโมเมนตัมเชิงมุมของอากาศมากขึ้นและเกิดการหมุนวนของเบดได้ดียิ่งขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและแผ่นกระจายอากาศ [19]

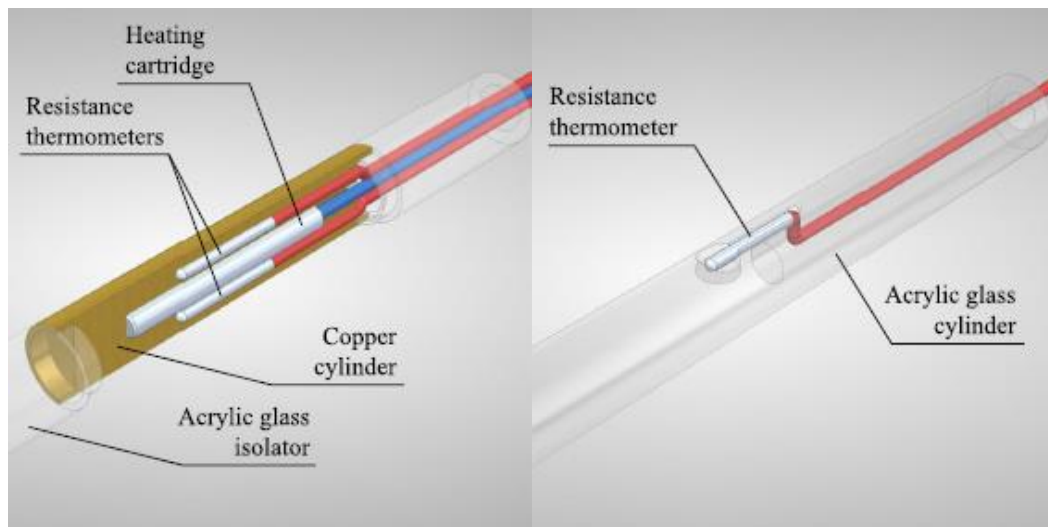
2.5 วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

2.5.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้หลักการนำความร้อน 1 มิติ

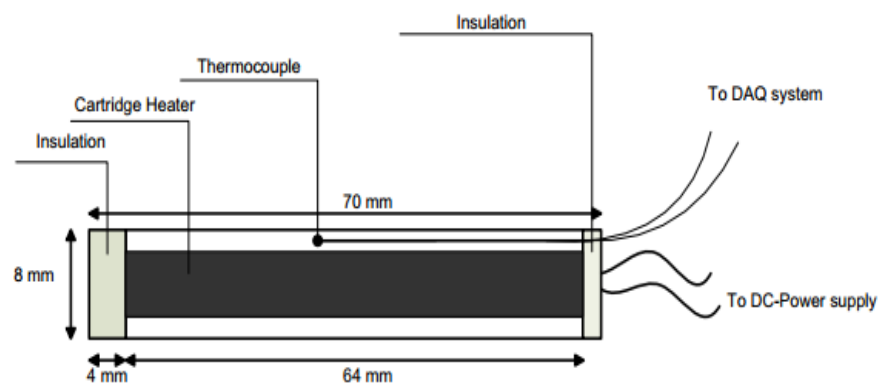
Eder et al. (2021) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดและผนังภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองอากาศ โดยใช้ทองแดงทรงกระบอกขนาด 100 mm ซึ่งถูกเชื่อมต่อกับสายเทอโมคัปเปิ้ลไปยังฮีตเตอร์แบบคาร์ทริดจ์ (Cartridge Heater) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่ทองแดง โดยอาศัยหลักการนำความร้อนในการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยมีท่ออะคริลิกทำหน้าที่เป็นฉนวนเพื่อป้องกันความร้อนจากภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.23

Masoumifard et al. (2008) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบดที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใช้ท่อทองแดงเป็นวัสดุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ความยาว 70 mm ทำการติดตั้งตัวต้านทานการทำความร้อน (Resistance heater) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 mm ความยาว 64 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.24 การเก็บค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะใช้เวลา 20 วินาที โดยจะมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์เข้าไปในอุปกรณ์วัด และจะทำซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง ซึ่ง

สอดคล้องกับการศึกษางานวิจัยของ Kim S. W. และ Kim S. D. (2013) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นทำมาจากแท่งทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm และยาว 80 mm โดยจะติดตั้งตัวต้านทานการทำความร้อน (Resistance heater) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm และยาว 50 mm โดยท่อเพลลอนยาว 60 mm ถูกติดตั้งทั้งสองข้างของแท่งทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 2.25 จากการทดลองสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากสมการที่ 2.15 ดังนี้



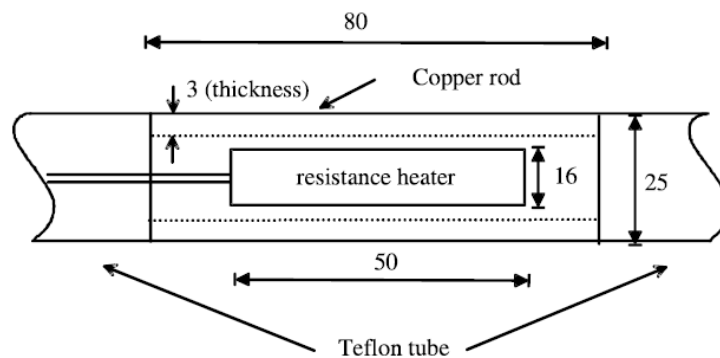
รูปที่ 2.23 อุปกรณ์สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [25]



รูปที่ 2.24 แสดงอุปกรณ์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [26]

$$h = \frac{Q}{A_s(T_s - T_b)} = \frac{IV}{A_s(T_s - T_b)} \quad (2.15)$$

โดย	Q	คือ ความร้อนที่ได้รับ (W)
	I	คือ กระแสไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อน (A)
	V	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อน (V)
	A_s	คือ พื้นที่ผิวที่รับความร้อน (m^2)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่พื้นผิวรับความร้อน ($^{\circ}C$)
	T_b	คือ อุณหภูมิที่เบต ($^{\circ}C$)



รูปที่ 2.25 เครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบใช้หลักการ 1 มิติ [26]

2.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยวิเคราะห์แบบลัมป์ (Lump analysis)

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุลัมป์และวัสดุเบตในกระบวนการฟลูอิดเซชันของ Sjosten et al. (2006) ได้กล่าวว่า การนำความร้อนของวัตถุในระบบลัมป์นั้น เป็นวัตถุที่มีการนำความร้อนที่ดี เมื่อเทียบกับค่าการพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อม จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าเท่ากันทั้งวัตถุ [18, 27] ทั้งนี้การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$\ln \frac{T_s - T_b}{(T_i - T_b)} = -\frac{hA_s}{\rho V c_p} t \quad (2.16)$$

โดย	h	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2K)
	A_s	คือ พื้นที่ผิวที่รับความร้อน (m^2)
	t	คือ เวลา (s)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของวัตถุลัมป์ (kg/m^3)

V	คือ ปริมาตรวัตถุ (m^3)
c_p	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kgK)
T_s	คือ อุณหภูมิที่พื้นผิวรับความร้อน ($^{\circ}C$)
T_b	คือ อุณหภูมิที่เบด ($^{\circ}C$)
T_i	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}C$)

อย่างไรก็ตามวิธีการของ Lump analysis ใช้สำหรับวิเคราะห์วัตถุที่มีการนำความร้อนภายในวัตถุสูง ๆ เท่านั้น โดยวิธีการดังกล่าวจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ ค่า Biot Number (Bi) ของวัตถุมีค่าน้อยกว่า 0.1 เท่านั้น โดยค่า Biot สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

$$Bi = \frac{hL_s}{k_s} < 0.1 \quad \text{โดยที่} \quad L_s = \frac{V}{A_s} \quad (2.17)$$

โดย	Bi	คือ Biot Number
	V	คือ ปริมาตรทรงกระบอก (m^3)
	L_s	คือ ค่าความยาวคุณลักษณะ (m)
	k_s	คือ ค่าการนำความร้อนของทองแดง (W/mK)
	A_s	คือ พื้นที่ผิวทรงกระบอกทั้งหมด (m^2)

2.5.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้เครื่องมือตอบสนองความเร็วสูง

Taofeeq et al. (2019) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเครื่องมือวัดแนวตั้งภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบสำเร็จรูปแนวตั้ง (Advanced fast response heat transfer probe technique) ภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบด อุปกรณ์การวัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0127 และ 0.0254 เมตร ความยาวอยู่ที่ 0.062 และ 0.095 m ตามลำดับ ซึ่งติดตั้งเซ็นเซอร์ MicroFoil™ heat transfer sensor (RdF Corp., model 27134-1) อยู่บนผิวท่อทองเหลือง ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pisters และ Prakash (2011) ที่แสดงดังรูปที่ 2.27-2.28 โดยอุปกรณ์การวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะถูกติดตั้งเซ็นเซอร์ MicroFoil™ (RdF, Model number 20453-1) ซึ่งตัวเซ็นเซอร์จะตอบสนองทุก ๆ 20 ms เป็นเวลา 180 s ที่ความถี่ 60 Hz โดยการนำเซ็นเซอร์ MicroFoil™ นับเป็นวิธีในการหาสัมประสิทธิ์

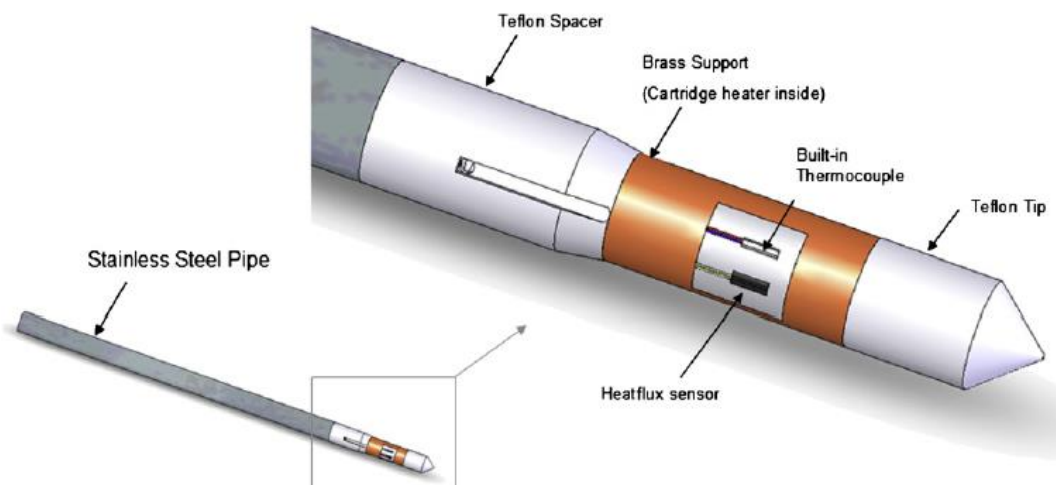
การถ่ายเทความร้อนที่มีความแม่นยำสูง ตอบสนองอย่างรวดเร็ว ความต้านทานต่ำ ขนาดเล็ก และมีช่วงในการวัดค่อนข้างกว้าง แต่ทั้งนี้การเลือกใช้วิธีนี้ก็ย่อมมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงตามไปด้วย



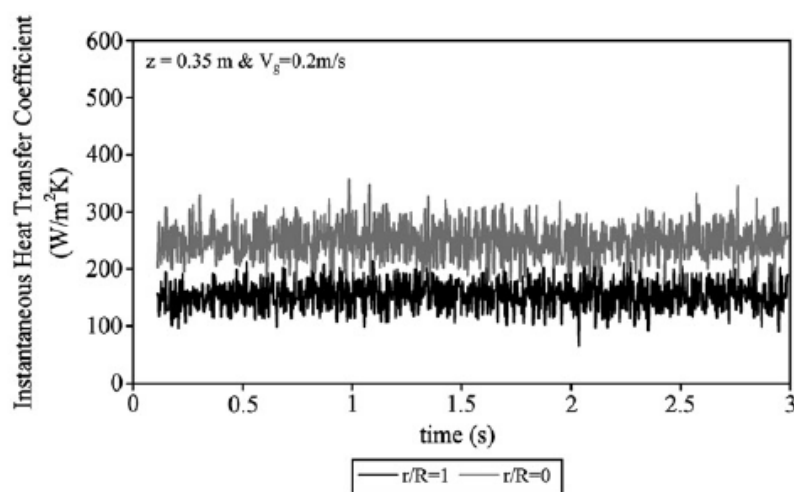
(ก)

(ข)

รูปที่ 2.26 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ MicroFoil™ heat transfer sensor ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์การวัด (ก) 0.0127 m (ข) 0.0254 m [28]



รูปที่ 2.27 อุปกรณ์การวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [21]



รูปที่ 2.28 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการวัด [21]

2.6 การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงร่วม (co-firing)

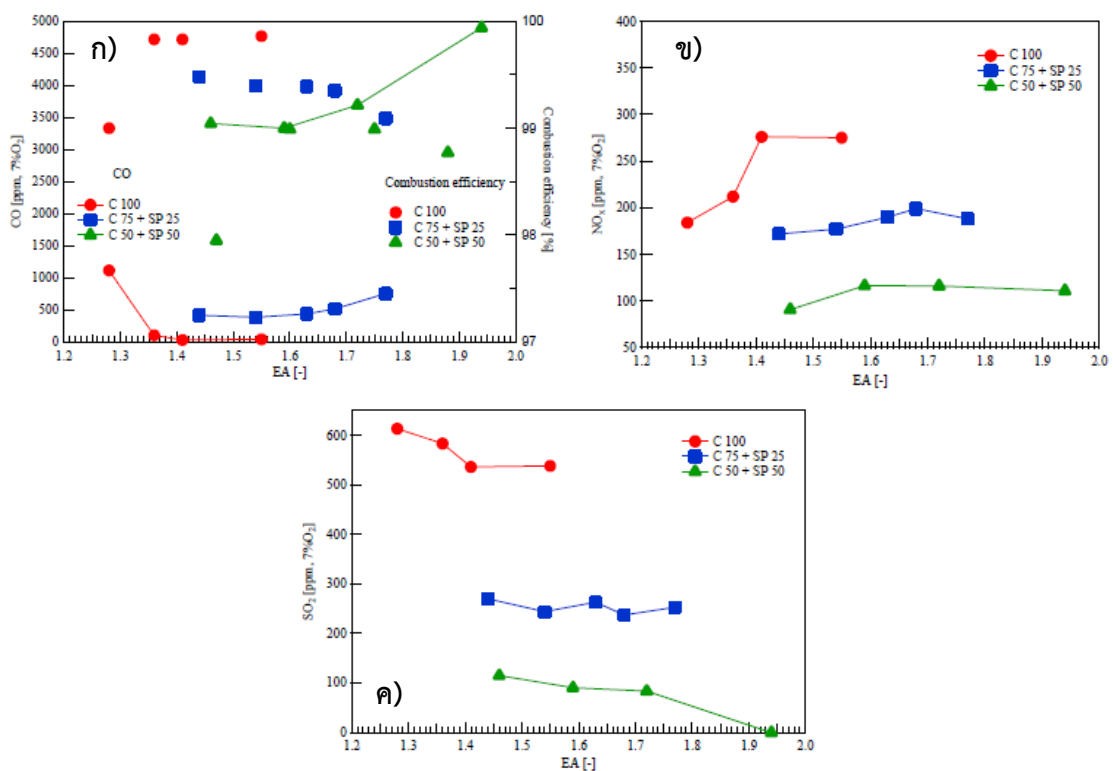
การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วม คือ การนำเชื้อเพลิงชีวมวลตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ประกอบไปด้วยเชื้อเพลิงหลักและเชื้อเพลิงรอง โดยสามารถนำเชื้อเพลิงทั้งชีวมวลร่วมกับชีวมวล และ ถ่านหินร่วมกับชีวมวลได้ เช่น การเผาไหม้ระหว่างเหง้ามันสำปะหลังกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส แกลบอัดแห้งกับแกลบขึ้น เปลือกทานตะวันกับทางมะพร้าวสับ ตลอดจนถ่านหินและชีวมวลอัดแห้งดังแสดงในรูปที่ 2.29 เป็นต้น เพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังเป็น การนำเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นสิ่งเหลือใช้ทางการเกษตรมาก่อให้เกิดประโยชน์ ตลอดจนลดการปลดปล่อยมลพิษสู่อากาศแทนการการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล



รูปที่ 2.29 แสดงเชื้อเพลิงร่วมระหว่างถ่านหินและชีวมวลอัดแห้ง

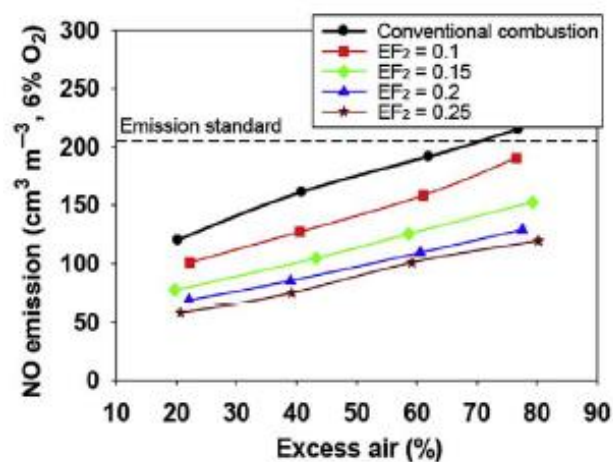
ที่มา : <http://biomassproject.blogspot.com/2021/03/biomass-cofiring-energy.html>

Unchaisri และ Fukuda (2017) ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยมลพิษในการเผาไหม้โดยใช้ ถ่านหินร่วมกับฟางข้าวอัดแท่ง (coal - rice straw pellet) ในเตาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวน โดยฟางข้าวอัดแท่งจะถูกผสมกับถ่านหินที่ 25% และ 50% โดยมวล อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 14 kg/hr และปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 1.28-1.94$ จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศส่วนเกินจะทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ไม่เพียงพอเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงฟางข้าวจะทำให้ CO สูงขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิในการเผาไหม้ที่ต่ำประกอบกับการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารระเหยของเชื้อเพลิงฟางข้าวอัดแท่ง อย่างไรก็ตามที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนโดยมวลของฟางข้าวอัดแท่งจะส่งผลทำให้การปลดปล่อย NO_x และ SO_2 ลดลง เนื่องจากสัดส่วนของไนโตรเจนและซัลเฟอร์ในฟางข้าวอัดแท่งที่มีค่าน้อยกว่าถ่านหินอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.30

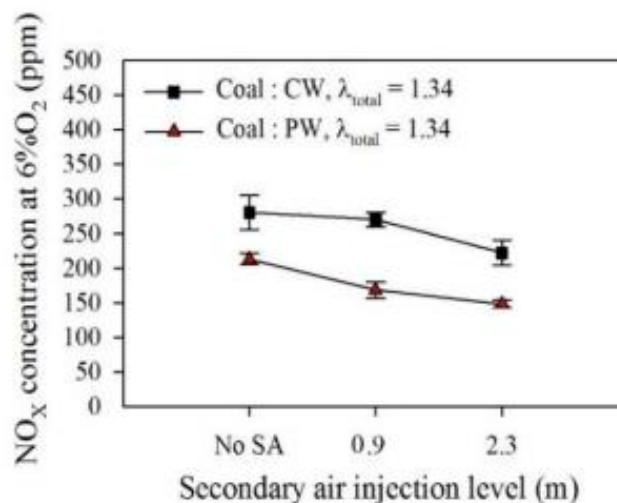


รูปที่ 2.30 การปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับฟางข้าวอัดแท่งที่สัดส่วนโดยมวลต่าง ๆ ก) CO ข) NO_x และ ค) SO_2 [29]

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ninduangdee และ Kruprianov (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของมลพิษโดยเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบอัดแท่งร่วมกับแกลบ ที่ค่าความร้อนขาเข้า $200 \text{ kW}_{\text{th}}$ สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) 0-0.25 ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) 20-80% สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม (SA/TA) 0.1-0.4 พบว่าการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้นสามารถลดปริมาณ NO_x ได้ถึง 37% ในขณะที่การเผาไหม้แบบธรรมดาสามารถลด NO_x ได้เพียง 13% เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบอัดแท่งร่วมกับแกลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงการปลดปล่อยมลพิษของ NO ทางออกของเตาที่สัดส่วนโดยพลังงานต่าง ๆ [4]



รูปที่ 2.32 แสดงการปลดปล่อยของ NO_x บริเวณทางออกของเตาที่สัดส่วนต่าง ๆ [30]

อีกทั้งยังมีการศึกษาการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับไม้ยางพาราสับ (Chipped Para-wood, CW) และไม้ยางพาราอัดเม็ด (Pelletized Para-wood, PW) ในเตาเผาฟลูอิดไชต์เบดแบบหมุนเวียน ที่อัตราส่วนไม้ยางพารา:ถ่านหิน 80:20 (โดยความร้อน) ที่อัตราส่วนอากาศเกินรวมที่ 1.34 และตำแหน่งการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่มีความสูง 0.9 m และ 23 m พบว่าการเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับไม้อัดเม็ดและไม้ยางพาราสับมีแนวโน้มให้ NO_x มีค่าต่ำลง อยู่ในช่วง 148-213 ppm และ 208-270 ppm ตามลำดับ และการจ่ายอากาศทุติยภูมิที่ระดับสูงขึ้นมีแนวโน้มในการลด NO_x เนื่องจากการลดปริมาณ O_2 ในเบดที่มีเชื้อเพลิงหนาแน่นส่งผลให้ NH_3 กลายเป็น NO_x ได้น้อยลง และการเกิด CO ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของ NO_x ดังแสดงในรูปที่ 2.32

จากการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การนำเชื้อเพลิงชีวมวลร่วมมาเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไชต์เบดนั้นจะศึกษาเพื่อลดการปลดปล่อยมลพิษเป็นหลัก ในขณะที่การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา นั้นมีอย่างจำกัด ด้วยเหตุนี้จึงได้เกิดแนวคิดที่จะทำการศึกษาถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไชต์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปดโดยใช้ชีวมวลร่วม (Biomass co-firing)

2.7 การสร้างสมการเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา [31]

ในการสร้างสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองและประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา โดยนำเอาความสัมพันธ์ของปริมาณทางฟิสิกส์ที่ได้จากการผลการทดลองมาวิเคราะห์และจัดให้อยู่ในฟังก์ชันของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีของ Buckingham's Pi โดยความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปริมาณไร้มิติกับตัวแปรต่าง ๆ จะเท่ากับจำนวนตัวแปรที่เกี่ยวข้อง (n) ลบด้วยจำนวนมิติพื้นฐาน (m) โดยกลุ่มตัวแปรไร้มิติจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย π สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\text{จำนวน } \pi = n - m \quad (2.18)$$

ยกตัวอย่างเช่น ตัวแปรที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วยทั้งหมด 7 ตัวแปร และมีมิติพื้นฐานเท่ากับ 3 ได้แก่ มวล (m), ความยาว (l) และเวลา (t) จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ π เทอมได้ทั้งหมด 4 เทอม โดยในแต่ละ π เทอมจะเป็นปริมาณไร้มิติดังแสดงในสมการที่ 2.19-2.20

$$\text{จำนวน } \pi = 7 - 3 = 4 \quad (2.19)$$

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (2.20)$$

โดยสมการที่ได้จะมีลักษณะเป็นสมการชี้กำลัง (Exponential) ซึ่งในแต่ละเทอม π จะเป็นค่าไร้มิติ โดยที่กำหนดให้เซตของตัวเลขชี้กำลังของมิติพื้นฐาน m , l และ t มีค่าเท่ากับศูนย์

2.8 การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ [31]

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไอส์เบดจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในเทอมของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งเทอมของตัวแปรไร้มิติบางตัวรู้จักแพร่หลายตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์หรือวิศวกรผู้ค้นพบ ในการวิเคราะห์และคำนวณเพื่อหาตัวแปรไร้มิติต่าง ๆ จะใช้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผา (T_{avg}) ที่บริเวณต่าง ๆ ดังแสดงในภาคผนวก ง เพื่อใช้ในการหาคคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซ, ความหนาแน่นของก๊าซ, ค่าความหนืดของก๊าซ และความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ เป็นต้น โดยตัวแปรไร้มิติประกอบไปด้วย

2.8.1 Nusselt Number (Nu)

ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) โดยจะขึ้นอยู่กับ Reynolds Number (Re) และ Prandtl Number (Pr) เป็นหลักซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.21

$$Nu = \frac{hd_p}{k_g} \quad (2.21)$$

โดย h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2K)
 d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (m)
 k_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซ (W/mK)

2.8.2 Archimedes Number (Ar)

ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่น โดยแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงหนืดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.22

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu_g^2} \quad (2.22)$$

- โดย d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (m)
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (kg/m³)
 ρ_s คือ ความหนาแน่นของอนุภาคเบด (kg/m³)
 μ_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซ (kg/ms)

2.8.3 Prandtl Number (Pr)

เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของของไหลในการส่งผ่านโมเมนตัมในของไหลเมื่อเทียบกับการส่งผ่านความร้อนในของไหล โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 2.23

$$Pr = \frac{c_{p,g} \mu_g}{k_g} \quad (2.23)$$

- โดย $c_{p,g}$ คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ (J/kgK)
 μ_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซ (kg/ms)
 k_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซ (W/mK)

2.8.4 Reynolds Number (Re)

เป็นตัวแปรไร้มิติที่บ่งชี้ถึงอัตราส่วนของแรงจากความเฉื่อยต่อแรงจากความหนืดที่กระทำต่อของไหล การเปลี่ยนแปลงการไหลจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน จะขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหล ความหนาแน่น และความหนืดของของไหล รวมทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ

$$Re_{ds} = \frac{\rho_g d_p u_{mff} \varepsilon}{\mu_g} \quad \text{สำหรับ dense zone และ splash zone} \quad (2.24)$$

$$Re_f = \frac{\rho_g d_p u_{mff}}{\mu_g} \quad \text{สำหรับ freeboard zone} \quad (2.25)$$

- โดย ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (kg/m^3)
 d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (m)
 u_{mff} คือ ความเร็วอากาศในการทำฟลูอิดเซชัน ณ จุดใด ๆ (m/s)
 μ_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซ (kg/ms)
 \mathcal{E} คือ ช่องว่างภายในเบด โดยสามารถหาได้จาก $-\Delta P / \Delta Z = (1-\mathcal{E})(\rho_s - \rho_1)g$ เมื่อ $\Delta P / \Delta Z$ แสดงถึงสัดส่วนระหว่างความต่างความดันต่อความสูง (Pa/m) [32]

ตารางที่ 2.1 แสดงความเร็วอากาศในการทำฟลูอิดเซชันและช่องว่างภายในเบดที่บริเวณต่าง ๆ

Condition	Dense zone		Splash zone		Freeboard zone
	u_{mff} (m/s)	\mathcal{E}	u_{mff} (m/s)	\mathcal{E}	u_{mff} (m/s)
(EB) EA = 20%, S/T = 0	0.110	0.953	0.056	0.994	0.074
(EB) EA = 40%, S/T = 0	0.128	0.944	0.065	0.993	0.087
(EB) EA = 60%, S/T = 0	0.146	0.938	0.075	0.991	0.099
(EB) EA = 80%, S/T = 0	0.165	0.929	0.084	0.990	0.111
(EB) EA = 40%, S/T = 0.1	0.128	0.935	0.065	0.993	0.128
(EB) EA = 60%, S/T = 0.1	0.146	0.929	0.075	0.993	0.099
(EB) EA = 80%, S/T = 0.1	0.165	0.922	0.084	0.992	0.111
(EB) EA = 40%, S/T = 0.3	0.128	0.941	0.065	0.994	0.087
(EB) EA = 60%, S/T = 0.3	0.146	0.933	0.075	0.993	0.099
(EB) EA = 80%, S/T = 0.3	0.165	0.924	0.084	0.992	0.111
(EB) EA = 40%, S/T = 0.5	0.128	0.939	0.065	0.995	0.087
(EB) EA = 60%, S/T = 0.5	0.146	0.930	0.075	0.993	0.099
(EB) EA = 80%, S/T = 0.5	0.165	0.921	0.084	0.993	0.111
(EB) EA = 40%, EF2 = 0.28	0.131	0.944	0.067	0.993	0.131
(EB) EA = 60%, EF2 = 0.28	0.150	0.938	0.076	0.991	0.101
(EB) EA = 80%, EF2 = 0.28	0.168	0.929	0.086	0.990	0.114
(EB) EA = 40%, EF2 = 0.53	0.134	0.944	0.068	0.993	0.090
(EB) EA = 60%, EF2 = 0.53	0.153	0.938	0.078	0.991	0.103
(EB) EA = 80%, EF2 = 0.53	0.172	0.929	0.088	0.990	0.116
(EB) EA = 40%, EF2 = 0.77	0.136	0.944	0.070	0.993	0.136
(EB) EA = 60%, EF2 = 0.77	0.156	0.938	0.079	0.991	0.105
(EB) EA = 80%, EF2 = 0.77	0.175	0.929	0.089	0.990	0.118
(EB) EA = 40%, EF2 = 1	0.139	0.944	0.071	0.993	0.094
(EB) EA = 60%, EF2 = 1	0.158	0.938	0.081	0.991	0.107
(EB) EA = 80%, EF2 = 1	0.178	0.929	0.091	0.990	0.120

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับในการวิจัยเรื่อง “การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปดเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล” โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปด ประกอบด้วย 1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาวะอากาศในการเผาไหม้แบบธรรมดา (Conventional combustion) และการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น (Air-staged combustion) เมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส และ 2) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วม (Biomass co-firing) ระหว่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (eucalyptus bark, EB) และเปลือกถั่วลิสง (peanut shell, PNS) ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงปฐมภูมิและเชื้อเพลิงทุติยภูมิตามลำดับ โดยมีรายละเอียดและวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปดเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยแสดงอยู่ในบทที่ 2

3.2 กำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์

กำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปดเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยทำการกำหนดตัวแปรเพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ต้องการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขของงานวิจัย

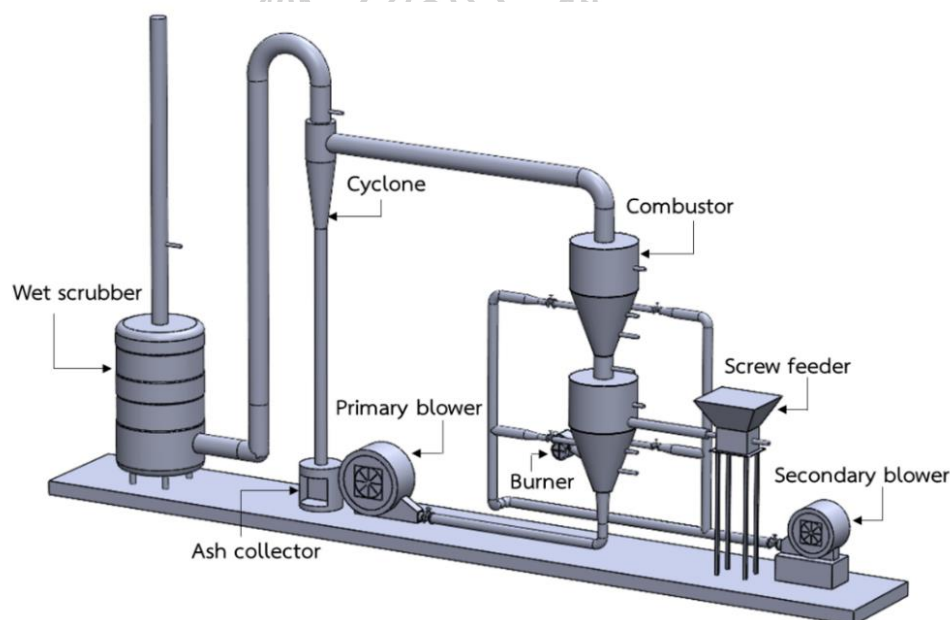
การเผาไหม้แบบธรรมดา (Conventional combustion)	
เชื้อเพลิง	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ (FR)	22.5 kg/h
ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA)	20%, 40%, 60% และ 80%
การเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น (Air-staged combustion)	
เชื้อเพลิง	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส
อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ (FR)	22.5 kg/h
ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA)	40%, 60% และ 80%
สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T)	0.1, 0.3 และ 0.5

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขของงานวิจัย (ต่อ)

การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วม (Biomass co-firing)	
เชื้อเพลิงปฐมภูมิ (Primary fuel)	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส
เชื้อเพลิงทุติยภูมิ (Secondary fuel)	เปลือกถั่วลิสง
พลังงานความร้อนเชื้อเพลิงคงที่ (Fixed heat input)	72.55 kW _{th}
ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA)	40%, 60% และ 80%
สัดส่วนโดยพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF ₂)	0, 0.28, 0.53, 0.77 และ 1

3.3 เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

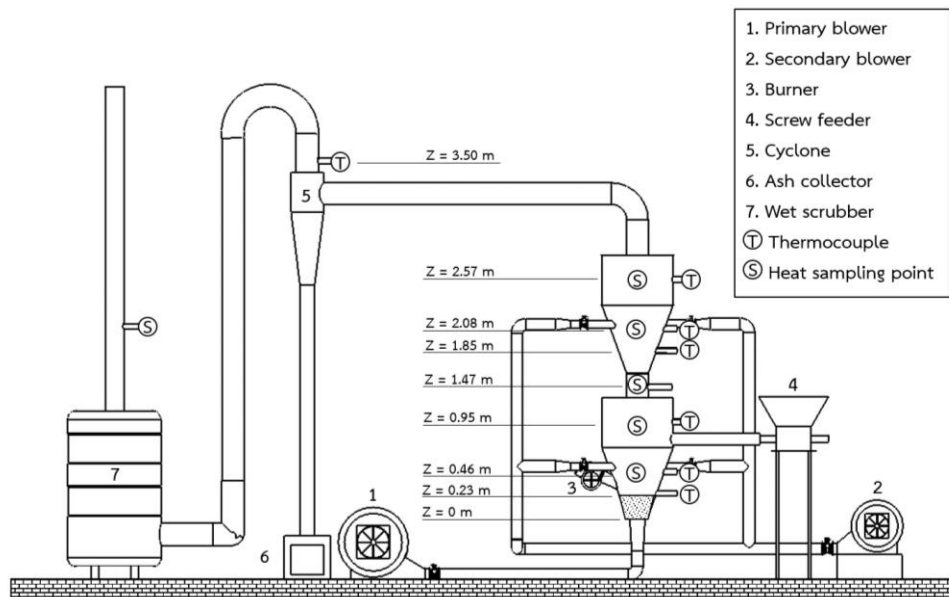
3.3.1 เตาเผาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด (TS-FBC)



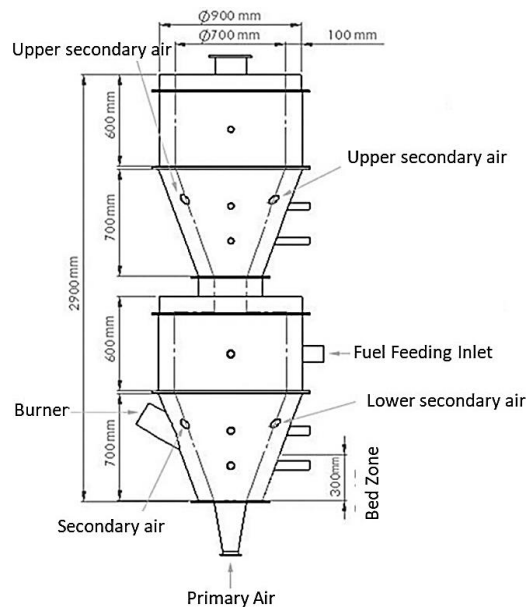
รูปที่ 3.1 เตาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด

สำหรับการทดลองในครั้งนี้ จะทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไชน์เบด โดยเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด ในส่วนของท่อและไซโคลนนั้นทำมาจากเหล็กหนา 0.006 m และภายในเตาถูกหุ้มฉนวนด้วยซีเมนต์ทนไฟหนา 0.1 m สำหรับโครงสร้างเตาฟลูอิดไชน์เบดจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ดังนี้ 1) ด้านล่างจะเป็นทรงกรวยที่มีความสูง 0.7 m โดยอยู่เหนือแผ่นกระจายอากาศ (Air distributor) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.2 m โดยใบพัดทำมุมเอียง 14 องศาตามแนวระดับ 2) ส่วนด้านบนจะเป็นทรงกระบอกที่มีความสูง 0.5 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.7 m โดยไซโคลนทั้งสองจะถูกเชื่อมด้วยท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 m เพื่อประกอบเป็นไซโคลนแฝด สำหรับระบบฟลูอิดไชน์เบดในการทดลองนี้ จะทำการป้อน

อากาศ 2 ส่วน 1) อากาศปฐมภูมิ (Primary air) จะถูกป้อนโดยใช้พัดลมขนาด 10 แรงม้า เป่าผ่านหัวกระจายอากาศเพื่อให้ทรายที่อยู่เหนือหัวกระจายอากาศเคลื่อนตัวเป็นของไหล 2) อากาศทุติยภูมิ (Secondary air) จะถูกป้อนโดยใช้พัดลมขนาด 7.5 แรงม้า เป่าเข้าไปในแนวรัศมีที่ตำแหน่ง 0.46 และ 2.08 m เหนือหัวกระจายอากาศ และมีเครื่องป้อนเชื้อเพลิง (Screw feeder) ทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงเข้าภายในระบบฟลูอิดไชน์เบดที่ตำแหน่ง 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ โดยระบบเตาเผาฟลูอิดไชน์เบดที่ใช้ในการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 3.1-3.3



รูปที่ 3.2 ลักษณะเตาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด

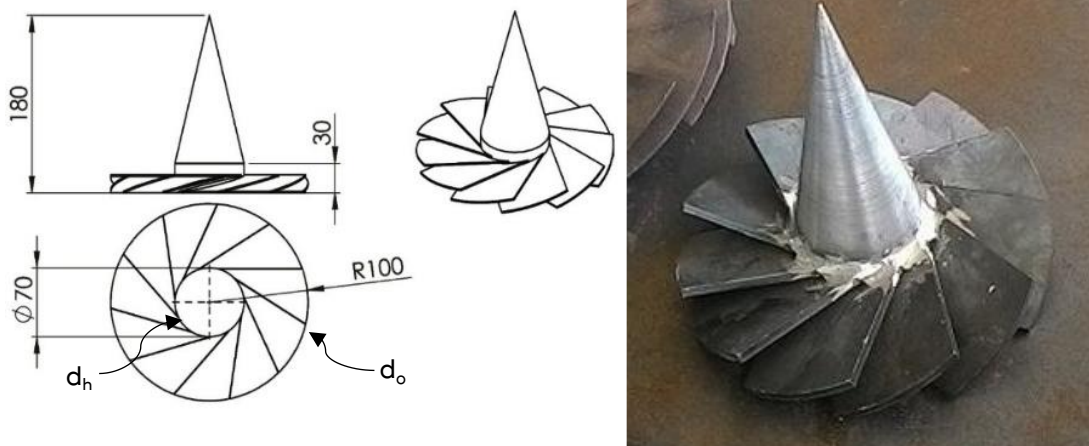


รูปที่ 3.3 ขนาดของเตาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด (TS-FBC)

3.3.2 แผ่นกระจายอากาศแบบใบพัด (Air distributor)

แผ่นกระจายอากาศที่ใช้ในการทดลอง มีหน้าที่สำหรับกระจายอากาศเพื่อให้เบดที่อยู่เหนือแผ่นกระจายอากาศเกิดฟลูอิดไลเซชัน โดยลักษณะเป็นแบบใบพัดจำนวน 11 ใบ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งใบพัดจะทำมุมเอียง 14 องศาตามแนวระดับ และมีตะแกรงขนาด Mesh 60 SWG 38 ทำหน้าที่ป้องกันทรายหลุดร่วงลงมาจากบริเวณด้านบนของแผ่นกระจายอากาศ จำนวน 1 ชั้น สำหรับแผ่นกระจายอากาศนี้จะมีแท่งทรงกรวยที่มีความสูง 150 mm โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (Outer diameter, d_o) 200 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางคอกของหัวกระจายลม (Hub diameter, d_h) 70 mm โดยมีค่า Swirl number 2.76 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$S_w = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_h / d_o)^3}{1 - (d_h / d_o)^2} \right] \tan \beta \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.4 แผ่นกระจายอากาศแบบ 11 ใบ 14 องศา

3.3.3 พัดลมป้อนอากาศปฐมภูมิ (Primary blower)

ในการทดลองนี้ จะใช้พัดลมป้อนอากาศปฐมภูมิ รุ่น APRF-711/A ซึ่งเป็นพัดลมแบบเป่าอากาศ (force draft fan, FD) มีกำลังขนาด 10 hp ความเร็วรอบมอเตอร์ 2,900 rpm ความดันสูงสุดที่ทำได้ 975 mmH₂O และอัตราการป้อนอากาศสูงสุด 25 m³/min ซึ่งเป็นพัดลมหลักที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้ง 2 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 พัดลมปฐมภูมิ (Primary blower)

3.3.4 พัดลมป้อนอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ (Secondary and tertiary blower)

ในการทดลองนี้ จะใช้พัดลมป้อนอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ รุ่น APE-711/A ซึ่งเป็นพัดลมแบบเป่าอากาศ (force draft fan, FD) เช่นเดียวกับพัดลมป้อนอากาศปฐมภูมิ มีกำลังมอเตอร์ขนาด 7.5 hp เป็น High-pressure blower ความเร็วรอบมอเตอร์ 2,900 rpm ความดันสูงสุดที่ทำได้ 975 mmH₂O และอัตราการป้อนอากาศ 8 m³/min ใช้สำหรับการทดลองในการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 พัดลมทุติยภูมิและตติยภูมิ (Secondary and tertiary blower)

3.3.5 สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง (Screw Feeder)

อุปกรณ์ลำเลียงเชื้อเพลิงไปยังห้องเผาไหม้ อยู่สูง 0.9 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมความเร็วในการป้อนเชื้อเพลิง โดยถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 1 hp ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ในการทดลองได้ทำการทดสอบเพื่อหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสม (fuel feeder calibration) ดังแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 3.7 เครื่องป้อนเชื้อเพลิง (Screw Feeder)

3.3.6 ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone Collector)

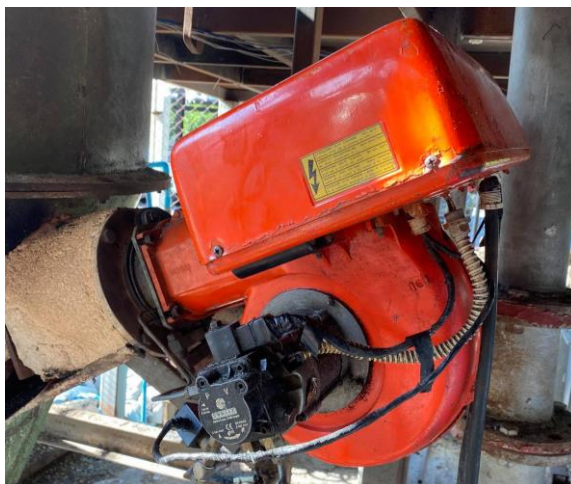
ในการทดลองนี้ จะใช้ไซโคลนดักฝุ่นโดยอาศัยหลักการหนีศูนย์กลางในการแยกฝุ่นออกจากอากาศ ฝุ่นและอากาศจะถูกดูดเข้าไปในไซโคลนที่มีกระแสวนหนีศูนย์กลางเหวี่ยงอนุภาค ไปยังผนัง กระแสวนจะพาอนุภาคฝุ่นเคลื่อนตัวลงไปเรื่อย ๆ จนถึงปลายโคน ในขณะที่อากาศที่ไม่มีฝุ่นจะถูกหมุนกลับขึ้นไปยังส่วนบนออกไปที่ท่อทางออก โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางไซโคลน 0.4 m และความสูง 3.7 m สามารถช่วยดักจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $10 \mu\text{m}$ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะด้านบนและด้านล่างของไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone Collector)

3.3.7 หัวเผาเชื้อเพลิง (Burner)

เป็นหัวเผาเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซล Model : R.B.L 606SE 0400 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 230V, ความถี่กระแสไฟ 50 Hz กระแสไฟ 1.9 A ขนาด 250 W และมีความเร็วรอบ 2,720 rpm โดยมีปุ่มทำหน้าที่อัดน้ำมันดีเซลให้แตกเป็นละอองผ่านหัวฉีด 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 หัวเผาเชื้อเพลิง (Burner)

3.3.8 วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve)

วาล์วควบคุมอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ เกทวาล์ว (Gate valve) ใช้เพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามเงื่อนไขในแต่ละรูปแบบการเผาไหม้ โดยติดตั้งระหว่างพัดลมป้อนอากาศกับแผ่นกระจายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เกทวาล์ว (Gate valve)

3.3.9 อุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer probe)

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะแสดงในรูปที่ 3.11-3.12 ภายในการทดลองนี้จะใช้การวิเคราะห์แบบลัมพ์ (Lump analysis) ซึ่งในการทดลองจะใช้แท่งทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 in หรือ 9 mm และความยาวเท่ากับ 1 in หรือ 25 mm เป็นวัสดุลัมพ์ โดยคุณสมบัติของวัสดุลัมพ์ในการทดลองนี้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.5 ซึ่งวัสดุลัมพ์ที่ใช้ในการทดลองจะถูกเชื่อมด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลแบบ k ร้อยผ่านรูอยู่บนท่อเซรามิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 25 mm และ 15 mm ตามลำดับ ซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนในการป้องกันความร้อนจากภายนอก โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นประกอบด้วย 3 ขนาด เพื่อใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมีทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ ทรงกรวย ทรงกระบอก และบริเวณคอคอดซึ่งเป็นจุดเชื่อมระหว่างเตาแฝด โดยมีความยาว 500 mm, 700 mm และ 200 mm ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 วัสดุลัมพ์ (Lump)

ที่มา : <https://www.durbinmetals.co.uk/what-we-do/copper-brass-bronze/copper-rod>

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุลัมพ์

คุณลักษณะ	ขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	9
ความยาว (mm)	25
พื้นที่ผิวรวม (m ²)	9.03x10 ⁻⁴
ปริมาตร (m ³)	7.24x10 ⁻⁶
ความหนาแน่น (kg/m ³)	8933
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg.K)	385
ค่าการนำความร้อน (W/m.K)	401



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [18]

ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด (Uncertainty of measurement) คือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น วิธีการวัด เครื่องมือวัด ผู้ปฏิบัติการ และสภาวะแวดล้อมในการวัด เป็นต้น โดยความไม่แน่นอนของการวัดเกิดขึ้นทุกครั้งจะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดนั้นคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าความคลาดเคลื่อน (uncertainty) ± 17 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 ดังแสดงในภาคผนวก ข [19]

$$\Delta x = \pm \left[\left(\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right) \Delta x_1 \right)^2 + \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right) \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Delta x_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

โดย Δx_i คือ ค่าความไม่แน่นอนสำหรับตัวแปร x ใด ๆ
 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Sensitivity coefficient)

3.3.10 เครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊ส (Testo-350 New XL)

เครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊ส ใช้เครื่อง “Testo- 350 New XL” จำนวน 1 ชุดซึ่งสามารถวัดค่าแก๊สออกซิเจน (O_2 , ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.2\%$) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO, ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$) เมื่อมีปริมาณ 100–2,000 ppm และ $\pm 10\%$ เมื่อมีปริมาณมากกว่า 2,000 ppm) แก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ออกไซด์ของไนโตรเจน (ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$) แก๊สไฮโดรคาร์บอน (NO_x , ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$) เมื่อมีปริมาณ 0–40,000 ppm ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ในการทดลองนี้ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊สมาวัดปริมาณ O_2 และมลพิษต่าง ๆ (CO, NO, C_xH_y) เพื่อใช้ประกอบในการคำนวณหาปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA)



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊สอัตโนมัติ (Testo-350 New XL)

ที่มา : <https://www.lesman.com/testo-350>

3.3.11 สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Thermocouple type-K)

สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง $350^\circ C$ สามารถวัดค่าอุณหภูมิสูงได้ถึง $-250^\circ C$ ถึง $1300^\circ C$ มีค่าความแม่นยำสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง (ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิได้ดีกว่าแบบอื่นหรือมีค่าความชันใกล้เคียง 1 พร้อมกับสามารถใช้งานที่มีการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) ได้ ไม่เหมาะกับงานในสภาวะสุญญากาศ (ยกเว้นการใช้งานในช่วงเวลาสั้น) โดยมีความผิดพลาดเท่ากับ -0.02 ถึง 0.04 และมีค่าความไวสูงสุด (โดยประมาณ $50 \mu V/^\circ C$) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ในการทดลองนี้จะนำมาใช้วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งตามความสูงของเตาเผาและอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 3.14 สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Thermocouple type-K)

ที่มา : https://www.ebay.fr/b/Sonde-type-k-thermocouple/4678/bn_7005523072

3.3.12 เครื่องมือเก็บข้อมูล (Data logger)

เครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูล ใช้เครื่อง “GRAPHTEC midi GL820” เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความดัน เป็นต้น ซึ่งเราสามารถนำข้อมูลที่บันทึกไว้นำออกมาแสดงผลในรูปของกราฟหรือตารางได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องเก็บข้อมูล (Data logger)

ที่มา : <https://www.dataq.com/resources/obsolete/products/gl820/>

3.3.13 วัสดุเบด (Bed materials)

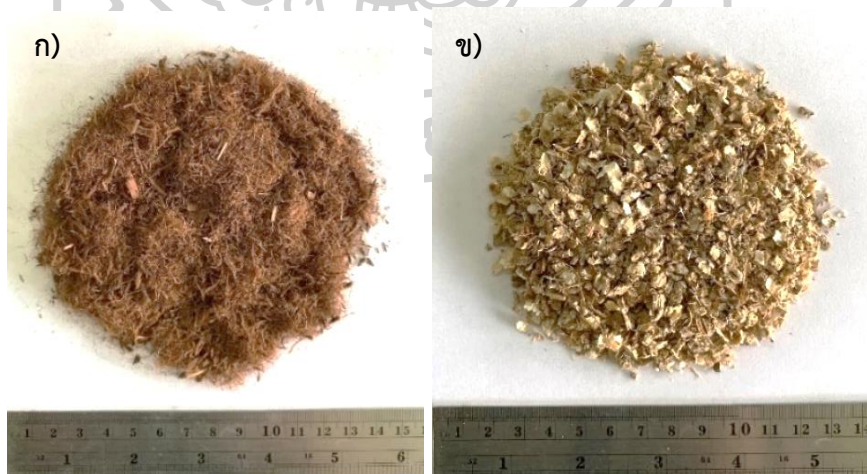
วัสดุเบดที่ใช้ในการทดลอง คือ ทรายซิลิกาขนาด 450-550 μm จัดอยู่ในอนุภาคกลุ่ม B ตามการจำแนกของ Geldart ซึ่งเป็นสารเฉื่อย (Inert material) มีความหนาแน่น (solid density) 2650 kg/m^3 ทำหน้าที่ช่วยในการถ่ายเทความร้อนแก่เชื้อเพลิงขณะเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ทรายซิลิกาขนาด 450-550 μm

3.3.14 ชีวมวล (Biomass)

ชีวมวล คือ อินทรีย์สารที่สะสมพลังงานซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ อาจได้จากเศษวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตร หรือกระบวนการทางอุตสาหกรรม โดยชีวมวลที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีทั้งหมด 2 ชนิด ประกอบไปด้วย เปลือกไม้ยูคาลิปตัสและเปลือกถั่วลิสงสับ โดยเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดจะผ่านกระบวนการย่อยขนาดเพื่อให้ลำเลียงเชื้อเพลิงขณะเผาไหม้ได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อผ่านกระบวนการย่อยขนาดแล้วดังแสดงในรูป 3.17 พบว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะมีลักษณะเป็นเส้นใย (fiber) ความยาวอยู่ในช่วง 1-10 mm ในขณะที่เปลือกถั่วลิสงจะมีลักษณะเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดกว้าง 2 mm หนา 0.5 mm และยาว 0.5 mm โดยข้อมูลลักษณะทางกายภาพจะแสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.17 ชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง ก) เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ข) เปลือกถั่วลิสง

ตารางที่ 3.3 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

Biomass fuel	Bulk density (kg/m ³)	Particle size		
		Wide (mm)	Thick (mm)	Length (mm)
EB	73.76	-	-	1-10
PNS	180.07	2	0.5	5

* EB = Eucalyptus barks, PNS = Peanut shells

ผลของการวิเคราะห์แบบ Proximate analysis และ Ultimate analysis บนฐาน as-received ของเชื้อเพลิง โดยที่ W (fuel-moisture) คือ ความชื้น, A (fuel-ash) คือ ขี้เถ้า, VM (volatile matter) คือ สารระเหย, FC (fixed carbon) คือ คาร์บอนคงที่ในเชื้อเพลิง และค่าพลังงานความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (lower heating value, LHV) ดังในตารางที่ 3.4 ซึ่งสามารถหาได้จากค่าพลังงานความร้อนสูง (higher heating value, HHV) และการวิเคราะห์ ultimate analysis ของเชื้อเพลิงชีวมวลบนฐาน as-received สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงการวิเคราะห์แบบ Proximate analysis และ Ultimate analysis บนฐาน as-received ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและเปลือกถั่วลิสง

Biomass fuels	Ultimate analysis basis (wt. %, as-received basis)					Proximate analysis basis (wt. %, as-received basis)				LHV (kJ/kg)
	C	H	O	N	S	W	A	VM	FC	
EB	32.86	4.91	39.23	0.04	0	14.55	8.40	60.89	14.73	11,608.06
PNS	36.10	4.99	35.87	0.36	0.05	7.72	14.91	61.86	14.26	13,325.12

ที่มา : ส่งตรวจคุณสมบัติเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสสับที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

$$LHV^r = HHV^r - 24.42(W^r + 8.94H^r) \quad (3.3)$$

$$HHV^r = 339C^r + 1256H^r - 109(O^r - S_v^r) \quad (3.4)$$

สำหรับการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วม (biomass co-firing) จะทำการกำหนดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขาเข้าที่ 72.55 kW_{th} เพื่อคำนวณหาสัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (mass fraction of secondary fuel, MF₂) และสัดส่วนโดยพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (energy

fraction of secondary fuel, EF_2) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ [33] ดังแสดงในตารางที่ 3.5

$$MF_2 = \frac{FR_2}{FR_1 + FR_2} \quad (3.5)$$

โดย FR_1 คือ อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงปฐมภูมิ (kg/h)

FR_2 คือ อัตราการป้อนของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (kg/h)

$$EF_2 = \frac{(MF_2)LHV_2}{(1-MF_2)LHV_1 + (MF_2)LHV_2} \quad (3.6)$$

โดย EF_2 คือ สัดส่วนโดยพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ

MF_2 คือ สัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ

LHV_1 คือ ค่าพลังงานความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงปฐมภูมิ (kJ/kg)

LHV_2 คือ ค่าพลังงานความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (kJ/kg)

ตารางที่ 3.5 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่สัดส่วนโดยพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ

Primary fuel	Secondary fuel			Total feed rate (kg/h)
Eucalyptus barks (EB)	Peanut shells (PNS)			
Feed rate (kg/h)	Feed rate (kg/h)	Mass fraction (MF_2)	Energy fraction (EF_2)	
22.50	0	0	0	22.50
16.88	4.90	0.25	0.28	21.78
11.25	9.80	0.50	0.53	21.05
5.63	14.70	0.75	0.77	20.33
0	19.60	1.00	1.00	19.60

ค่าพลังงานความร้อนต่ำโดยรวม (total lower heating value, LHV_{total}) ที่สัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงทุติยภูมินั้นจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละสัดส่วน เนื่องจากค่าพลังงานความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.7

$$LHV_{total} = (1 - MF_2) LHV_1 + (MF_2) LHV_2 \quad (3.7)$$

3.4 ทำการทดลอง

3.4.1 ตรวจสอบระบบเตาเผาฟลูอิดเบดชนิดไซโคลนแผดแบบหมุนวนให้พร้อมสำหรับการทดลอง เช่น ตรวจสอบพัดลมป้อนอากาศปฐมภูมิ ตรวจสอบพัดลมป้อนอากาศทุติยภูมิ ตรวจสอบความสูงเบด ตรวจสอบอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เป็นต้น

3.4.2 กำหนดตัวแปรของการวิจัยที่ต้องการศึกษา คือ 1) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาวะอากาศในการเผาไหม้แบบธรรมดา (Conventional combustion) และการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น (Air-stage combustion) ประกอบด้วย ปริมาณอากาศส่วนเกิน และสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) และ 2) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วม (Biomass co-firing) ประกอบด้วย เชื้อเพลิง ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) ตำแหน่งความสูงในการวัด และตำแหน่งการวัดในแนวรัศมี โดยทดลองการเผาไหม้ทั้ง 2 รูปแบบ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1-3.2

เมื่อเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ หรือ ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ก๊าซไอเสียที่ได้จะมีสารประกอบของก๊าซที่ยังเผาไหม้ได้ปนอยู่ เมื่อ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ยังคงอยู่ในการวิเคราะห์ของก๊าซไอเสีย สัดส่วนอากาศส่วนเกินจะรวมผลกระทบของก๊าซเหล่านี้พร้อมกับออกซิเจน [34, 35] โดยสัดส่วนอากาศส่วนเกินสามารถหาได้จากสมการที่ 3.8

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0.5CO - 2C_xH_y + 0.5H_2)} \quad (3.8)$$

โดย	α	คือ สัดส่วนอากาศส่วนเกิน
	O_2	คือ ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนในก๊าซแห้ง (vol.%)
	CO	คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (vol.%)

C_xH_y คือ ความเข้มข้นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (vol.%)

H_2 คือ ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน (vol.%)

เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของอากาศส่วนเกิน (excess air, EA) ถูกใช้เป็นตัวชี้วัดลักษณะเฉพาะของอากาศที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.9

$$EA = 100 - (\alpha - 1) \quad (3.9)$$

การคำนวณอัตราการไหลของอากาศภายในท่อ สามารถคำนวณได้จากปริมาณอากาศตามทฤษฎี (the theoretical volume of air, V^o) ที่ 0 °C และ 1 atm สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล 1 kg ภายใต้เงื่อนไขปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometric condition) และปริมาณอากาศจริงที่ใช้ในการเผาไหม้ (the actual volume of air, V_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.10-3.11 ตามลำดับ โดยอาศัยการวิเคราะห์ ultimate analysis บนฐาน as-received basis ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ซัลเฟอร์ (S), และออกซิเจน (O) ของเชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และสามารถคำนวณหาอัตราการไหลและความเร็วของอากาศภายในท่อได้จากสมการที่ 3.12-3.13 ดังแสดงในตารางที่ 3.6-3.7

$$V^o = 0.0889(C + 0.375S) + 0.265H - 0.0333O \quad (3.10)$$

$$V_a = V^o \alpha \quad (3.11)$$

โดย V^o คือ ปริมาณอากาศตามทฤษฎี (m^3/kg)

V_a คือ ปริมาณอากาศจริง (m^3/kg)

$$Q_t = Q_p + Q_s \quad (3.12)$$

$$v = \frac{Q}{A_s \times 3600} \quad (3.13)$$

- โดย Q_t คือ อัตราการไหลของอากาศรวม (m^3/kg)
 Q_p คือ อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ (m^3/kg) หาได้จาก $Q_p = V_a (FR)$
 Q_s คือ อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ (m^3/kg) หาได้จาก $Q_s = (V_a)(FR)(S/T)$
 FR คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)
 S/T คือ สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม
 v คือ ความเร็วของอากาศภายในท่อใด ๆ (m/s)
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดภายในท่อ (m^2)

ตารางที่ 3.6 อัตราการไหลและความเร็วของอากาศที่สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ

การเผาไหม้แบบธรรมดาและการใช้อากาศเป็นขั้น (Conventional and air-stage combustion)							
Condition		Q_p (m^3/h)	v_p (m/s)	Q_s (m^3/h)	v_s (m/s)	Q_t (m^3/h)	v_t (m/s)
S/T = 0	EA = 20%	77.57	2.66	0	0	77.57	2.66
	EA = 40%	90.50	3.10	0	0	90.50	3.10
	EA = 60%	103.43	3.55	0	0	103.43	3.55
	EA = 80%	116.36	3.99	0	0	116.36	3.99
S/T = 0.1	EA = 40%	81.45	2.79	9.05	0.31	90.50	3.10
	EA = 60%	93.09	3.19	10.34	0.35	103.43	3.55
	EA = 80%	104.72	3.59	11.64	0.40	116.36	3.99
S/T = 0.3	EA = 40%	63.35	2.17	27.15	0.93	90.50	3.10
	EA = 60%	72.40	2.48	31.03	1.06	103.43	3.55
	EA = 80%	81.45	2.79	34.91	1.20	116.36	3.99
S/T = 0.5	EA = 40%	45.25	1.55	45.25	1.55	90.50	3.10
	EA = 60%	51.72	1.77	51.72	1.77	103.43	3.55
	EA = 80%	58.18	1.99	58.18	1.99	116.36	3.99

ตารางที่ 3.7 อัตราการไหลและความเร็วของอากาศที่สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงต่าง ๆ

การเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วม (Biomass co-firing)							
Condition		Q_{pri} (m^3/hr)	V_{pri} (m/s)	Q_{sec} (m^3/hr)	V_{sec} (m/s)	Q_{total} (m^3/hr)	V_{total} (m/s)
EF2 = 0	EA = 40%	90.50	3.10	0	0	90.50	3.10
	EA = 60%	103.43	3.55	0	0	103.43	3.55
	EA = 80%	116.36	3.99	0	0	116.36	3.99
EF2 = 0.28	EA = 40%	92.57	3.17	0	0	92.57	3.17
	EA = 60%	105.79	3.63	0	0	105.79	3.63
	EA = 80%	119.02	4.08	0	0	119.02	4.08

ตารางที่ 3.7 อัตราการไหลและความเร็วของอากาศที่สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงต่าง ๆ (ต่อ)

การเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วม (Biomass co-firing)							
Condition		$Q_{pri}(m^3/hr)$	$V_{pri}(m/s)$	$Q_{sec}(m^3/hr)$	$V_{sec}(m/s)$	$Q_{total}(m^3/hr)$	$V_{total}(m/s)$
EF2 = 0.53	EA = 40%	94.49	3.24	0	0	94.49	3.24
	EA = 60%	107.99	3.70	0	0	107.99	3.70
	EA = 80%	121.49	4.16	0	0	121.49	4.16
EF2 = 0.77	EA = 40%	96.29	3.30	0	0	96.29	3.30
	EA = 60%	110.04	3.77	0	0	110.04	3.77
	EA = 80%	123.80	4.24	0	0	123.80	4.24
EF2 = 1	EA = 40%	97.96	3.36	0	0	97.96	3.36
	EA = 60%	111.96	3.84	0	0	111.96	3.84
	EA = 80%	125.95	4.32	0	0	125.95	4.32

สำหรับการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแผดทั้ง 2 รูปแบบการเผาไหม้ จะทำการวัดในตามแนวรัศมี, 0, $\pm 1/3$, $\pm 2/3$ และ ± 1 ที่ตำแหน่งความสูง 0.46, 0.95, 1.47, 2.08 และ 2.57 m เหนือแผ่นกระจายอากาศที่มี Swirl number เท่ากับ 2.76 ในทุกการทดลอง

3.4.3 ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดซ์เบดชนิดไซโคลนแผดแบบหมุนวนตามแนวความสูงและแนวรัศมี โดยใช้อุปกรณ์วัดค่าความร้อน (Heat transfer probe) เข้าไปในเตาฟลูอิดซ์เบดที่ความสูงต่าง ๆ ตามเงื่อนไขการทดลอง เพื่อทำการบันทึกค่าอุณหภูมิด้วยเครื่องมือเก็บข้อมูล (Data logger) ประมาณ 20 วินาที จึงดึงอุปกรณ์วัดค่าการถ่ายเทความร้อนออกจากเตาเผา

3.4.4 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาฟลูอิดซ์เบดชนิดไซโคลนแผดแบบหมุนวน โดยเลือกข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว (T_s) ที่ความชันมีลักษณะใกล้เคียงดังแสดงในรูปที่ 3.18

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดนั้น จะใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีลัมป์ (Lump analysis) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.5.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมี (h_{local})

ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีวิเคราะห์แบบลัมป์ โดยนำค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์วัดค่าการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer probe) เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

- ทำการสร้างสมการเส้นตรงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{T_s - T_b}{T_i - T_b}\right)$ กับเวลา

- นำค่าความชันของสมการเส้นตรง (Slope) ที่ได้จากกราฟเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามสมการที่ 3.14 และตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวสัมผัส (T_s) กับเวลา (t) และ $\ln(T_s - T_b / T_i - T_b)$ กับเวลา (t) จะแสดงดังรูปที่ 3.18-3.19 ตามลำดับ

$$h = slope \times \left(\frac{\rho V c_p}{A_s} \right) \quad (3.14)$$

โดย h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2K)

$slope$ คือ ค่าความชันของกราฟ

ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุลัมป์ (kg/m^3)

A_s คือ พื้นที่ผิวที่รับความร้อน (m^2)

c_p คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุลัมป์ (kJ/kgK)

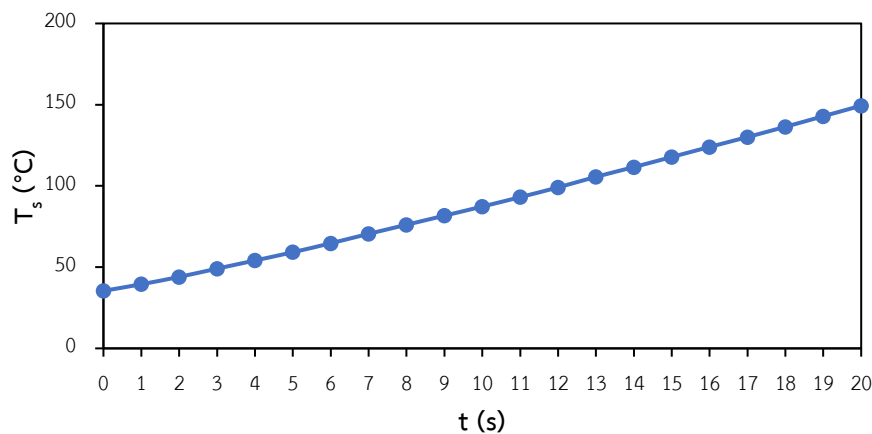
t คือ เวลา (s)

V คือ ปริมาตรวัสดุลัมป์ (m^3)

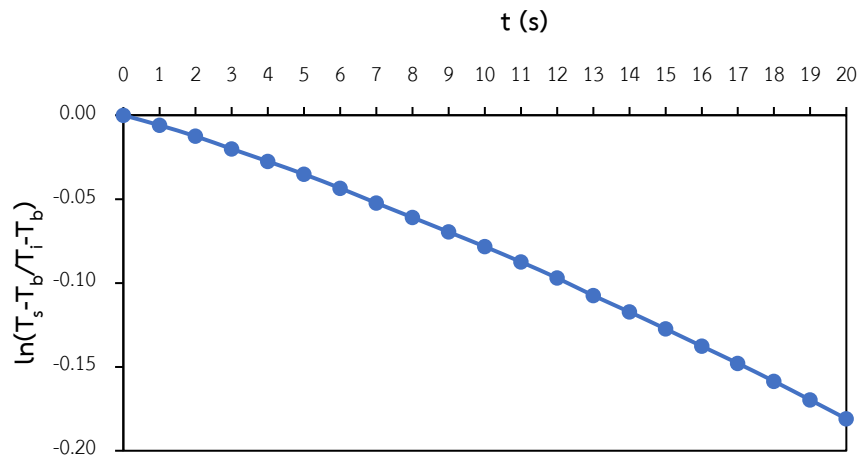
T_s คือ อุณหภูมิที่พื้นผิวรับความร้อน ($^{\circ}C$)

T_b คือ อุณหภูมิเบด ($^{\circ}C$)

T_i คือ อุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}C$)



รูปที่ 3.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวสัมผัส (T_s) กับเวลา (t)



รูปที่ 3.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(T_s - T_b / T_f - T_b)$ กับเวลา (t)

3.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z)

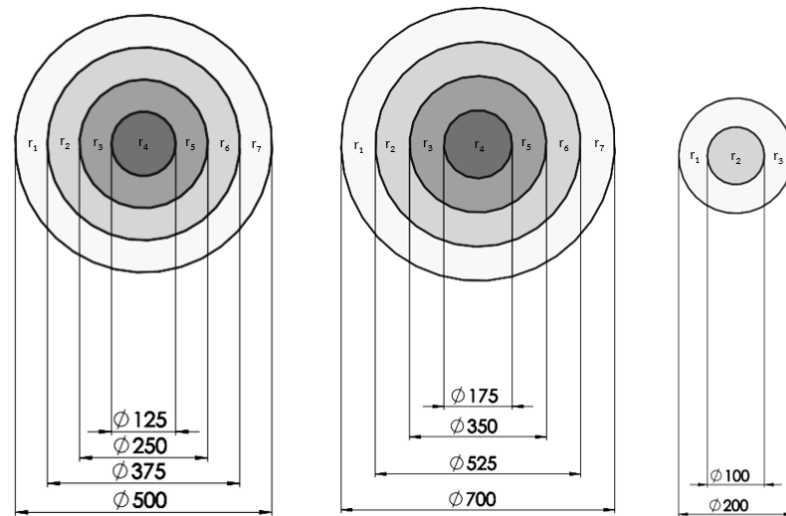
คำนวณโดยระบุพื้นที่หน้าตัดวงแหวนรอบจุดการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจากตำแหน่งการวัดตามแนวรัศมี 7 จุด ตั้งแต่ จุดที่ 1 (r_1), จุดที่ 2 (r_2), จุดที่ 3 (r_3), จุดที่ 4 (r_4), จุดที่ 5 (r_5), จุดที่ 6 (r_6) และจุดที่ 7 (r_7) ที่ตำแหน่งความสูงการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปที่ 3.20 จากนั้นให้นำมาแทนในสมการ 3.15

$$h_{z_i} = \frac{\sum_{i=1}^7 h_{(Z=1, r=i)} A_{(Z=1, r=i)}}{\sum_{i=1}^7 A_{(Z=1, r=i)}} \quad (3.15)$$

3.5.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมตลอดทั้งเตา ($h_{overall}$) คือ ค่าเฉลี่ย h_z ตลอดความสูงของเตาเผา โดยจะคำนวณแบบถ่วงน้ำหนักโดยปริมาตรซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.16 ดังต่อไปนี้

$$h_{overall} = \frac{1}{V} \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} h_{Z_i, avg} dV_{Z_i} \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.20 แสดงพื้นที่หน้าตัดวงแหวนรอบจุดการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมี

(ก) ตำแหน่งความสูง $Z_1 = 0.46$ และ $Z_4 = 2.08$ m เหนือแผ่นกระจายอากาศ

(ข) ตำแหน่งความสูง $Z_2 = 0.95$ และ $Z_5 = 2.57$ m เหนือแผ่นกระจายอากาศ

(ค) ตำแหน่งความสูง $Z_3 = 1.47$ m เหนือแผ่นกระจายอากาศ

3.5.4 การสร้างสมการเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เพื่อทำนายผลการทดลองทั้ง 2 รูปแบบการเผาไหม้ โดยใช้วิธีการถดถอยพหุคูณ (multiple regression method) เพื่อแก้ปัญหาความสัมพันธ์ของค่า Nusselt number (Nu) ตามทฤษฎี Buckingham Pi กับตัวแปรไร้มิตต่าง ๆ ประกอบกับตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับสภาวะการทดลองและสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ ซึ่งจะแสดงอยู่ในเทอมดังแสดงในสมการที่ 3.16 [31]

$$Nu = function \left[Ar, Pr, Re, 1 - \frac{S}{T}, \frac{u}{u_{mf}}, EF_2 \right] \quad (3.16)$$

โดยจะใช้ค่า R-Squared (R^2) หรือ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) ซึ่งเป็นตัวสถิติที่ใช้ชี้วัดว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มีความสมรूपกับข้อมูลมากน้อยอย่างไร แสดงถึงความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้ในตัวแบบเชิงเส้น ประกอบกับค่า Mean Relative Diviation (%MRD) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลจากการทดลองและผลจากการทำนาย โดยสามารถหาได้จากสมการ 3.17

$$\%MRD = \left[\sum_{i=1}^n \left| \frac{Nu_{i,exp} - Nu_{i,pred}}{Nu_{i,exp}} \right| \right] \times \frac{100}{n} \quad (3.17)$$

3.6 สรุปผลการทดลอง

หลังจากดำเนินการทดลองและได้วิเคราะห์ผลการทดลองที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไอดีซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปด จากนั้นทำการสร้างสมการเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมภายในเตาเผาและสรุปผลการทดลอง



บทที่ 4

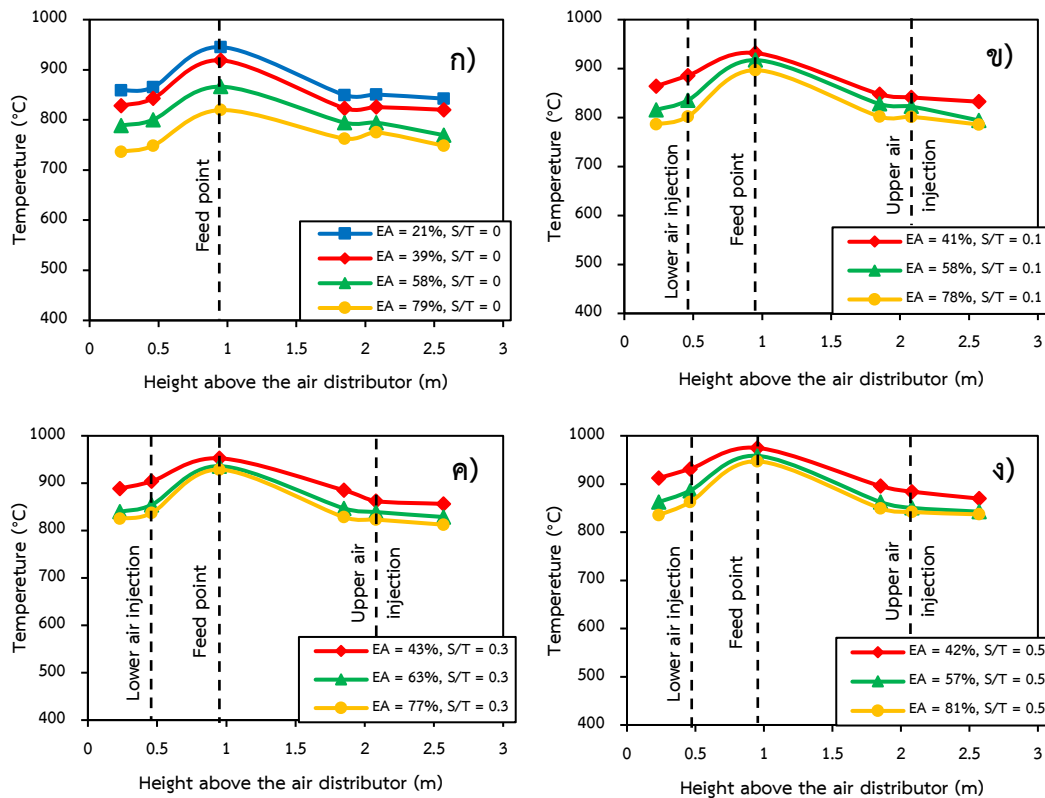
ผลการทดลอง

จากการทดลอง “การศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแปดเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล” โดยศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา ได้แก่ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาวะอากาศสำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดา (Conventional combustion) และการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น (Air-staged combustion) เมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพลังงานของเชื้อเพลิงหุติยภูมิสำหรับการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วม (Biomass co-firing) เมื่อเผาไหม้เปลือกยูคาลิปตัส (เชื้อเพลิงปฐมภูมิ) และเปลือกถั่วลิสง (เชื้อเพลิงหุติยภูมิ) จากผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย ตำแหน่งในแนวรัศมี (r/R), ตำแหน่งตามความสูง (Z), ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA), อัตราส่วนของอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) และสัดส่วนของพลังงานเชื้อเพลิงหุติยภูมิ (EF_2) โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.1 ผลการทดลองการเผาไหม้แบบธรรมดา (Conventional combustion) และการใช้อากาศเป็นชั้น (Air-staged combustion) เมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

4.1.1 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาที่อัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.1 แสดงผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 20-80\%$ ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC ที่อัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ เมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อัตราป้อนเชื้อเพลิง (FR) 22.5 kg/h จากการทดลองการเผาไหม้แบบธรรมดา (conventional combustion) และการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น (air-staged combustion) พบว่าลักษณะของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตามีลักษณะที่คล้ายคลึงกันตลอดความสูงของเตา โดยบริเวณด้านล่างสุดของเตาที่ตำแหน่งความสูง 0.23 m พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 750-900°C ทั้งการเผาไหม้แบบธรรมดาและอากาศเป็นชั้น จากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากบริเวณกรวยด้านล่างของเตาที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.23-0.46$ m เป็นบริเวณที่มีเบตหนาแน่น (dense zone) ประกอบกับบริเวณนี้ยังติดกับแผ่นกระจายอากาศจึงทำให้เกิดการฟลูอิดไคเซชัน ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนทั้ง 2 ส่วน คือ การพาความร้อนของอนุภาค (particle convection) และการพาความร้อนจากก๊าซร้อน (gas convection) จึงส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณนี้มีค่อนข้างสูง จากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้น และจะเพิ่มสูงที่สุด ณ ตำแหน่ง $Z = 0.95$ m เนื่องจากเป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้ามา



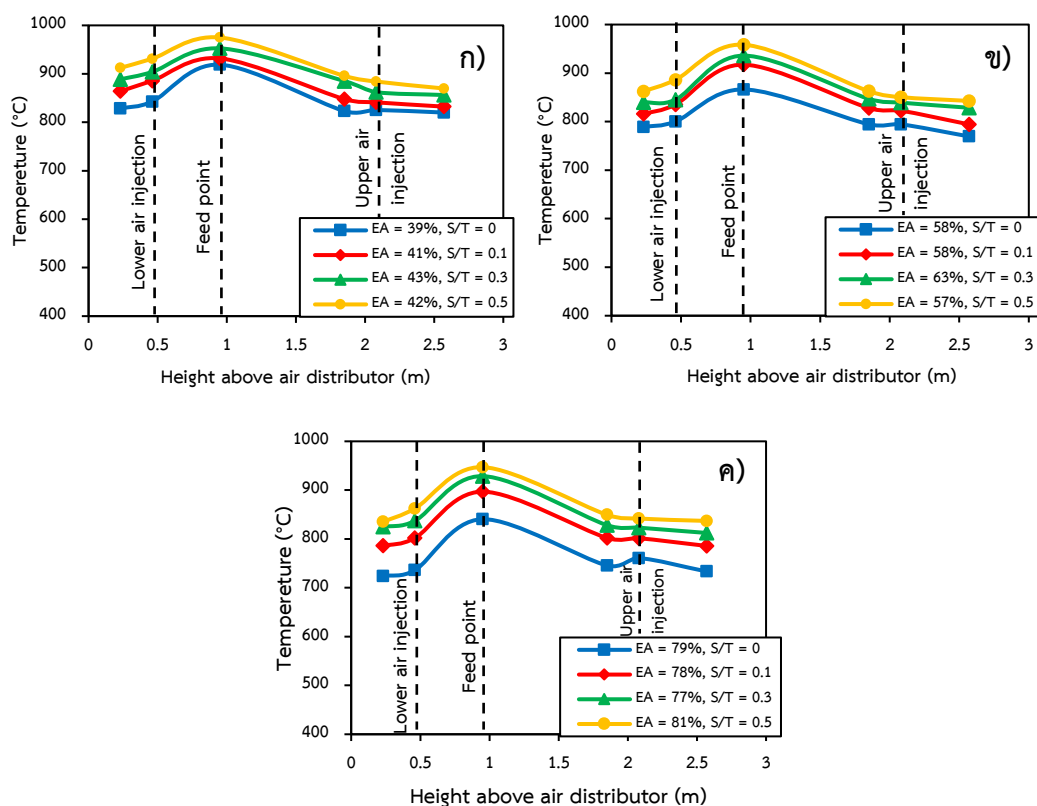
รูปที่ 4.1 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC ที่ EA = 20-80% และ S/T = ก) 0, ข) 0.1, ค) 0.3 และ ง) 0.5

ภายในเตาเผา (fuel feed point) ทำให้บริเวณนี้เป็นบริเวณแรกที่เชื้อเพลิงคลุกเคล้ากับวัสดุเบดที่มีความร้อนสูงและเกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณนี้สูงที่สุด จากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณกรวยด้านบนของเตา ($Z = 2.08-2.57$ m) เป็นบริเวณที่มีอนุภาคเบดหนาแน่นต่ำ (freeboard zone) เมื่อเทียบกับบริเวณด้านล่างของเตาเผา จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนเพียงอย่างเดียว ประกอบกับเกิดการสูญเสียความร้อนจากผนังเตาและการพาอากาศจากความร้อน จึงส่งผลให้อุณหภูมิลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิจะมีค่าต่ำที่สุดที่ตำแหน่งความสูง $Z = 2.57$ m อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงค่อนข้างต่ำทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนลอยขึ้นไปเผาไหม้บริเวณ freeboard zone จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณ dense zone เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เนื่องจากอากาศที่ในการทดลองคือ อากาศจากสภาพแวดล้อมโดยรอบซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 30°C ซึ่งถือว่าอุณหภูมิต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอากาศภายในที่กำลังเผาไหม้อยู่ ส่งผลให้เมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินเข้าสู่ภายในระบบมากยิ่งขึ้น จะทำให้ระยะเวลาในการพาความร้อนจากก๊าซไอเสียภายในห้องเผาไหม้ลดลงจึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตามีค่าลดลงในที่สุด [3, 5]

4.1.2 ผลกระทบของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลกระทบของสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม $S/T = 0, 0.1, 0.3$ และ 0.5 ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ เมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อัตราป้อนเชื้อเพลิง (FR) 22.5 kg/h จากการทดลองการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้นพบว่า เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม จาก $S/T = 0, 0.1, 0.3$ และ 0.5 ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาโดยรวมนั้นสูงขึ้นตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศทุติยภูมิ (secondary air velocity, v_s) ทั้งบริเวณขาเข้าด้านล่างและด้านบนของเตาเผา นั้นจะทำให้ความเร็วอากาศปฐมภูมิ (primary air velocity, v_p) ขาเข้านั้นลดลงตามไปด้วยเพื่อคงความเร็วของอากาศโดยรวม (total air velocity, v_t) ให้เป็นไปตามเงื่อนไขในการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ ประกอบกับอากาศขาเข้าของอากาศทุติยภูมินั้นมีลักษณะในแนวสัมผัส (tangential) ทั้งสองข้างของเตาเผาซึ่งแตกต่างกับท่อขาเข้าของอากาศปฐมภูมิที่ทำให้อากาศเข้าสู่ภายในระบบจากด้านล่าง ส่งผลให้อากาศเกิดการหมุนวนและการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอนุภาคเบตได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม



รูปที่ 4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ย ที่ EA = ก) 40% ข) 60% และ ค) 80%

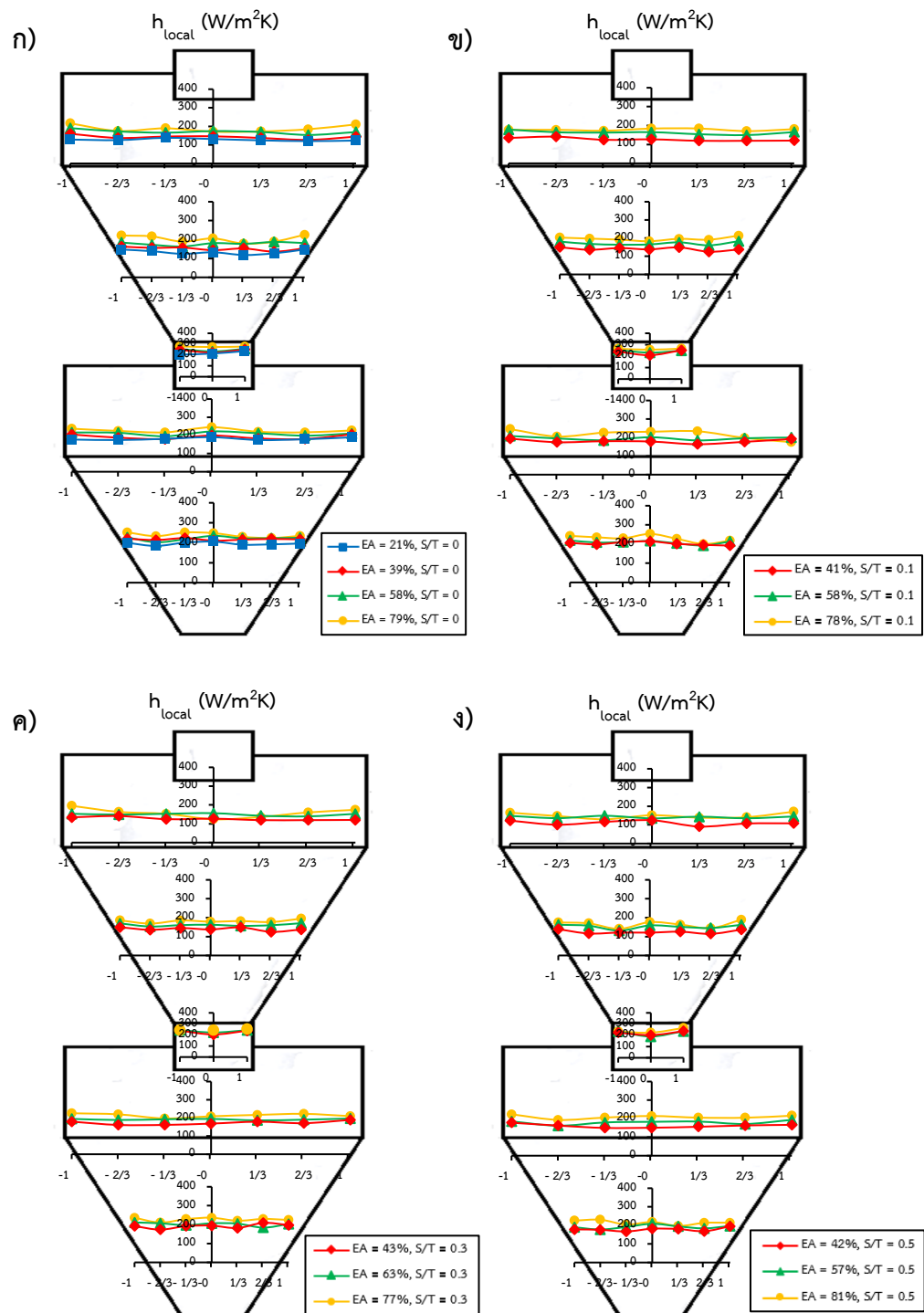
การเพิ่มขึ้นของอากาศหตุยภูมิต่ออากาศรวมนั้น จะส่งผลให้ระยะเวลาในการพาความร้อนของก๊าซไอเสียนอกสู่นอกกระบวนนั้นลดลงและส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตามีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนอากาศหตุยภูมิต่ออากาศรวม [18]

4.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local}) ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่ตำแหน่ง $r/R = 0, \pm 1/3, \pm 2/3$ และ ± 1 ที่สภาวะสัดส่วนอากาศหตุยภูมิต่ออากาศรวม $S/T = 0, 0.1, 0.3$ และ 0.5 เมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีทุกสภาวะการทดลองมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยบริเวณกรวยด้านล่างของเตา (dense, splash zone: $Z = 0.46-0.95$ m) ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของเตาเผา ($r/R = 0$) และตำแหน่งผนังของเตาเผา ($r/R = \pm 1$) จะพบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ เล็กน้อย เนื่องจากบริเวณกึ่งกลางของเตาเผาเป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้ามาสู่ภายในเตาเผาและเกิดการคลุกเคล้าระหว่างเชื้อเพลิงกับอนุภาคเบตที่มีอยู่อย่างหนาแน่นในบริเวณนี้ อีกทั้งยังมีการป้อนอากาศปฐมภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเตาเผาจึงทำอนุภาคเบตเกิดการยกตัวได้มากขึ้นเนื่องจากการเกิดฟลูอิดเซชันอย่างปั่นป่วน ส่งผลให้ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนทั้งการพาความร้อนจากอนุภาคของเบต (particle convection) และการพาความร้อนจากแก๊สร้อน (gas convection) เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามแนวรัศมีและจะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณขอบเตา ($r/R = \pm 1$) เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกดูดซับที่บริเวณผนังเตาซึ่งทำจากวัสดุทนความร้อนสูง อีกทั้งยังมีอนุภาคเบตเกิดการกระทบกับผนังของเตาจึงส่งผลให้เกิดการการถ่ายเทความร้อนมายังอุปกรณ์การวัดได้ดี

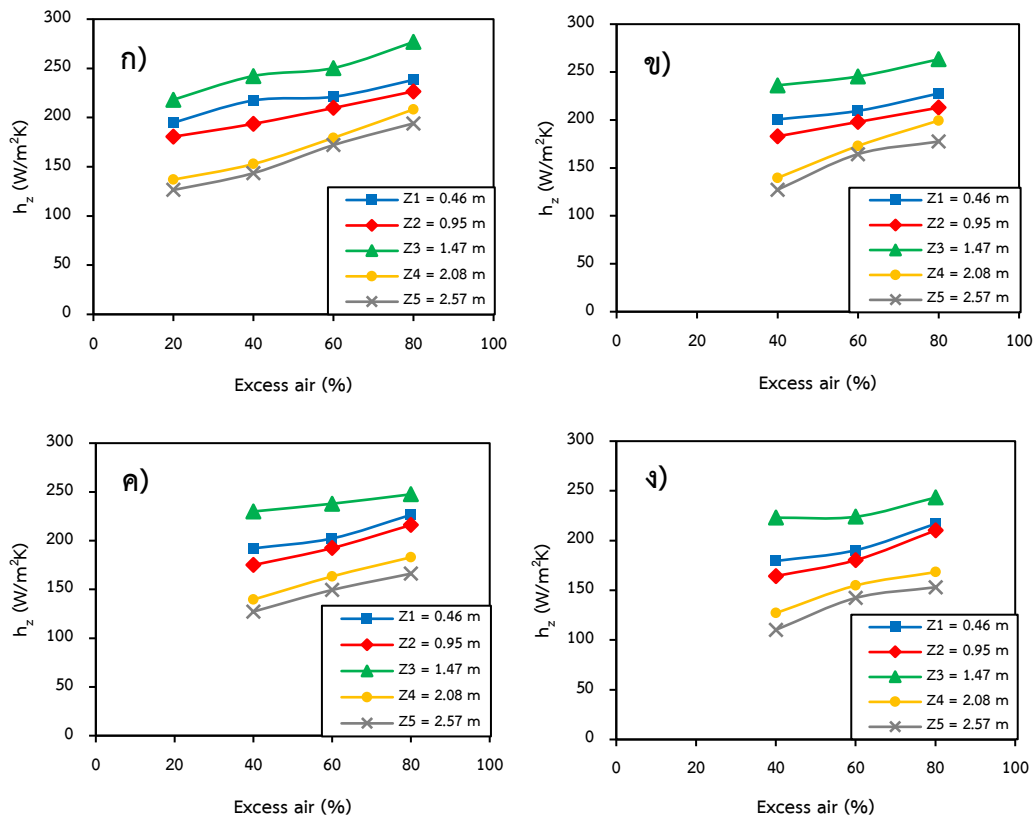
อย่างไรก็ตาม ที่ตำแหน่งความสูง (connecting pipe: $Z = 1.47$ m) จะพบค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุดในทุกตำแหน่งแนวรัศมีเนื่องเป็นบริเวณคอคอดซึ่งเป็นบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดลดลง เมื่ออากาศไหลเคลื่อนที่จากบริเวณกรวยด้านล่างซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 m ผ่านบริเวณคอคอดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 0.2 m จะทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัดและส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย [7]

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีบริเวณกรวยด้านบนของเตา (freeboard zone: $Z = 2.08-2.57$ m) จะมีลักษณะที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อน (gas convection) เป็นหลัก เนื่องจากเป็นบริเวณเบตหนาแน่นต่ำ โดยส่วนใหญ่จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยบริเวณผนังของเตา ($r/R = \pm 1$) อันเนื่องมาจากความร้อนที่ถูกดูดซับถ่ายเทมายังอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของตำแหน่งต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่ $r/R = 0, \pm 1/3, \pm 2/3$ และ ± 1 ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $S/T =$ ก) 0 ข) 0.1 ค) 0.3 และ ง) 0.5

4.1.4 ผลกระทบของความสูง (Z) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) ที่อัตราส่วนอากาศหตุยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของความสูง (Z) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $S/T =$ ก) 0 ข) 0.1 ค) 0.3 และ ง) 0.5

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลกระทบของความสูงต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่อากาศหตุยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ จากผลการทดลอง ที่ตำแหน่งความสูงที่ 1.47 m พบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากเป็นบริเวณคอคอดซึ่งเป็นารลดพื้นที่หน้าตัดทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง $h_z = 218.09-276.86$ W/m²K สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดา ในขณะที่การเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นขั้นนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง $h_z = 236.19-263.33$ W/m²K สำหรับ $S/T = 0.1$, $h_z = 229.94-247.57$ W/m²K สำหรับ $S/T = 0.3$ และ $h_z = 223.04-243.27$ W/m²K สำหรับ $S/T = 0.5$

เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนมากยิ่งขึ้น จึงได้พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนออกเป็นบริเวณ (Zone) โดยบริเวณที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด คือ บริเวณเบตหนาแน่น

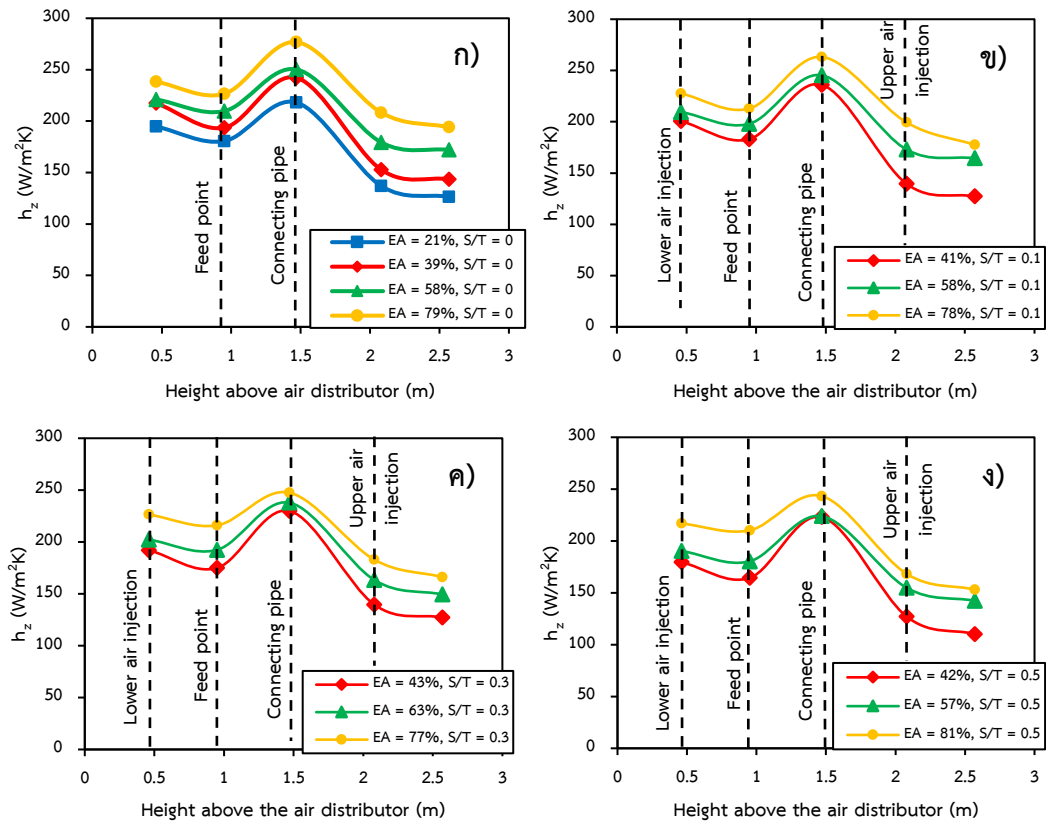
(dense zone, $Z = 0.46$ m) พบว่า $h_z = 194.77-238.34$ W/m²K, $h_z = 179.50-200.66$ W/m²K สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดาและการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอนุภาคเบตหนาแน่นและอยู่ใกล้กับแผ่นกระจายอากาศมากที่สุดทำให้อนุภาคเบตกระจายตัวได้ดีเมื่อเทียบกับตำแหน่งความสูงอื่น ๆ อีกทั้งยังส่งผลให้ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้นทั้งการพาความร้อนจากอนุภาคเบตและการพาจากก๊าซร้อน [5, 22] ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ณ ตำแหน่งความสูง $Z = 0.95$ m ซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคเบตหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณด้านล่าง (splash zone) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะมีค่าลดลงจากบริเวณเบตหนาแน่น $h_z = 180.60-226.62$ W/m²K, $h_z = 164.33-212.86$ W/m²K สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดาและการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น ส่วนบริเวณกรวยด้านบนของเตาเผา ณ ตำแหน่ง $Z = 2.08-2.57$ m ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอนุภาคเบตเบาบาง (Freeboard zone) โดยบริเวณนี้จะมีการถ่ายเทความร้อนที่จากการพาความร้อนของก๊าซเป็นหลัก โดยพบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย $h_z = 131.73-201.20$ W/m²K, $h_z = 188.46-118.65$ W/m²K สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดาและการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น

4.1.5 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) ที่อัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ

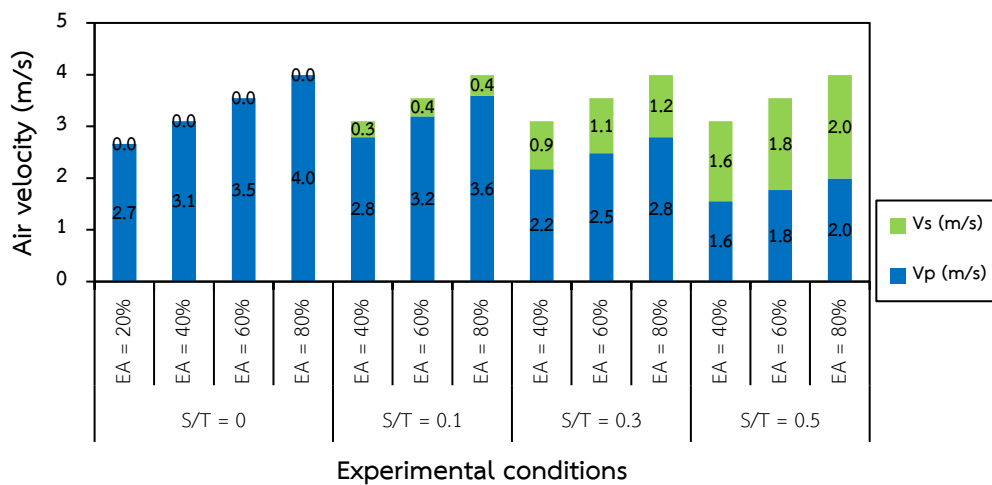
จากรูปที่ 4.5 แสดงผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกินต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเมื่อเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ผลการทดลองของทั้งสองรูปแบบการเผาไหม้พบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินนั้นส่งผลต่อความเร็วของอากาศโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยมีพัดลมเป่าทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ภายในระบบบริเวณด้านล่างกรวยล่างของเตาเผา เมื่ออัตราไหลของอากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการยกตัวและกระจายตัวของอนุภาคเบตที่อยู่เหนือแผ่นกระจายอากาศได้มากยิ่งขึ้น โดยการกระจายตัวของเบตที่มากขึ้นนั้นจะช่วยเพิ่มระยะเวลาและความถี่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาคเบตกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมากขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณอากาศส่วนเกินที่ $EA = 80\%$ สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดา ($S/T = 0$) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีค่าสูงที่สุดในทุกสภาวะการทดลอง $h_z = 276.86$ W/m²K ณ ตำแหน่ง $Z = 1.47$ m ซึ่งเป็นบริเวณคอคอดเชื่อมต่อระหว่างกรวยล่างกับกรวยบนของเตาเผา และเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจาก $EA = 20\%$ เป็น $EA = 80\%$ ส่งผลให้ความเร็วของอากาศโดยรวมเพิ่มขึ้นจาก 2.66 m/s เป็น 3.99 m/s เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 8.03-9.76%

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่ม $S/T = 0$ เป็น $S/T = 0.5$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย $h_z = 223.95$ W/m²K ที่ตำแหน่งบริเวณคอคอดซึ่งมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ว่าการเพิ่ม S/T จะทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันนั้น ความเร็วของอากาศ

ปฐมภูมิ (v_p) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการยกตัวของอนุภาคเบดเป็นอย่างมากนั้นลดลงและส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนนั้นมีความลดลงตามไปด้วย [7, 18, 19]

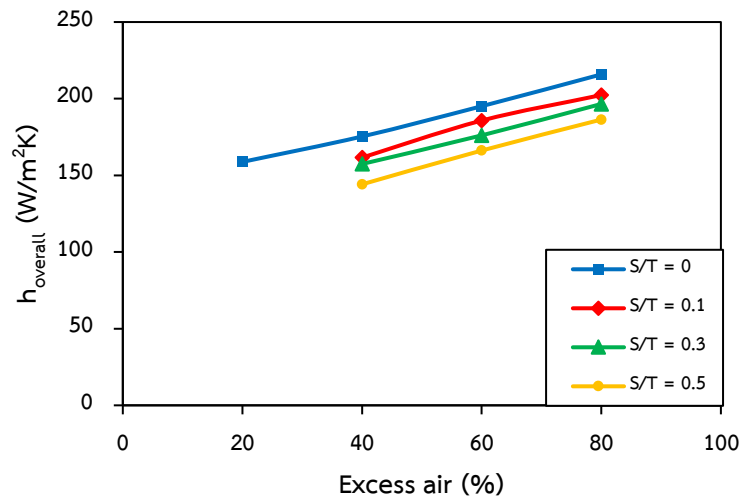


รูปที่ 4.5 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $S/T =$ ก) 0 ข) 0.1 ค) 0.3 และ ง) 0.5



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของความเร็วของอากาศที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 40-80\%$ และที่สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมต่าง ๆ

4.1.6 ผลกระทบของอัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของอัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) ที่ $EA = 20-80$ และ $S/T = 0, 0.1, 0.3$ และ 0.5

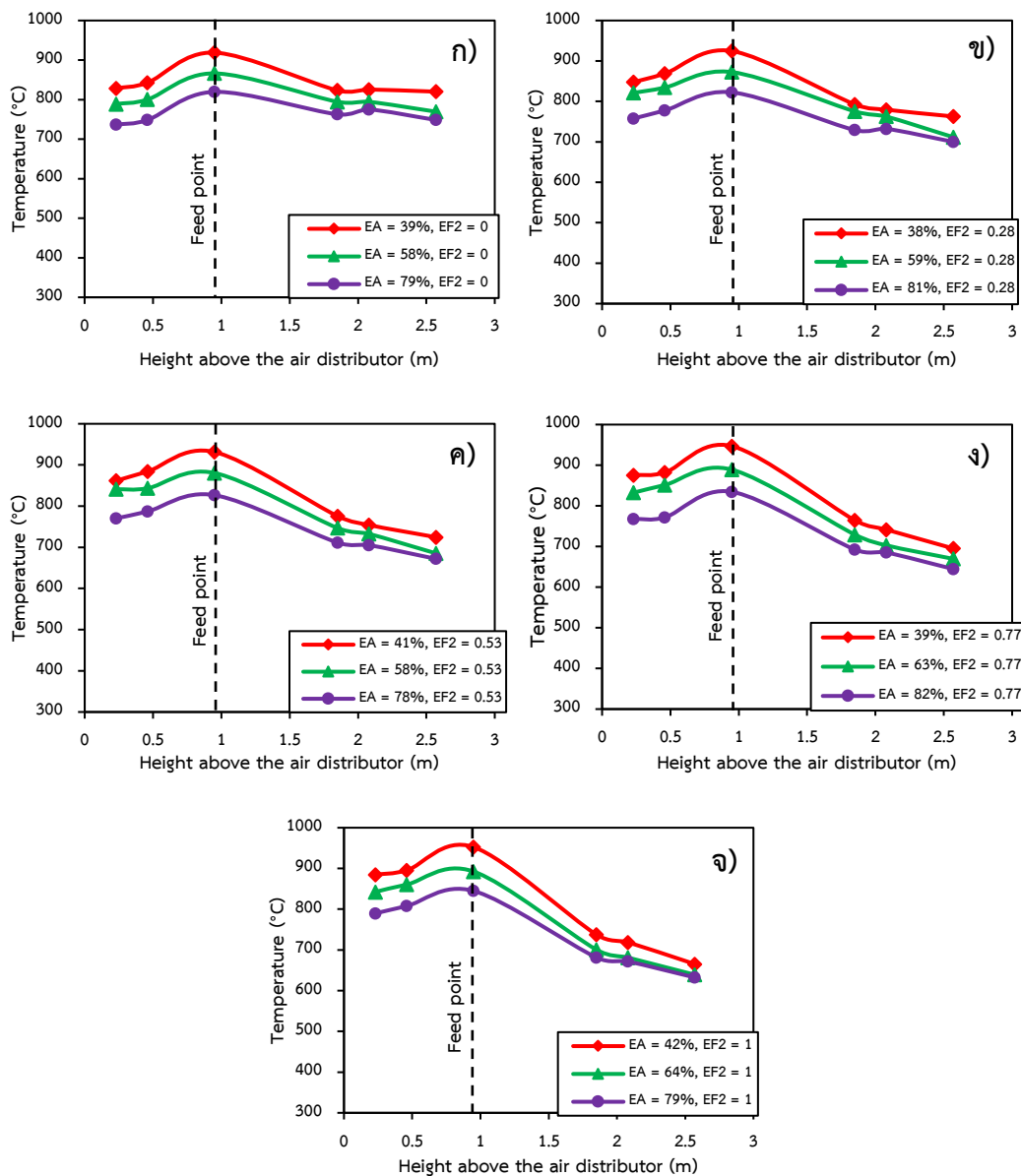
จากรูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวมต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม เพื่อหาตัวแทนของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมจึงได้นำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ มาเฉลี่ยโดยปริมาตรเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่มีสถานะต่าง ๆ ระหว่างการเผาไหม้แบบทั่วไปและการใช้อากาศเป็นชั้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) มากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมมีค่าลดลง เนื่องจากอัตราส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T) ที่เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ความเร็วของอากาศปฐมภูมิ (v_p) ลดลง เพื่อความคุ้มครองความเร็วอากาศรวม (v_r) ให้คงที่ในแต่ละสภาวะการทดลองที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ ดังนั้นการเพิ่มขึ้น S/T ส่งผลให้เกิดการ หมุนวนและสร้างความปั่นป่วนของอากาศภายในเตาเผาไหม้ตลอดจนเกิดการกระจายตัวในแนวรัศมีที่มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการยกตัวและการกระจายตัวของอนุภาคเบตซึ่งอยู่เหนือแผ่นกระจายอากาศนั้นจะลดลง เมื่อทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะส่งผลให้ระยะเวลาและความถี่ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุปกรณ์และอนุภาคเบตนั้นลดลง ด้วยสาเหตุนี้จึงนำไปสู่การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมตามไปด้วย

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมมากที่สุด พบที่สภาวะการทดลอง $EA = 80\%$, $S/T = 0$ ซึ่งมีค่า $h_{overall} = 216.61$ W/m²K ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เฉลี่ยโดยรวมที่มีค่าน้อยที่สุด พบที่สภาวะการทดลอง $EA = 40$, $S/T = 0.5$ โดยมีค่า $h_{overall} = 145.07 \text{ W/m}^2\text{K}$

4.2 ผลการทดลองการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลร่วม (Biomass co-firing) ระหว่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (เชื้อเพลิงปฐมภูมิ) และเปลือกถั่วลิสง (เชื้อเพลิงทุติยภูมิ)

4.2.1 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC

ที่ $EA = 40-80\%$ และ $EF_2 =$ ก) 0, ข) 0.28, ค) 0.53, ง) 0.77 และ จ) 1

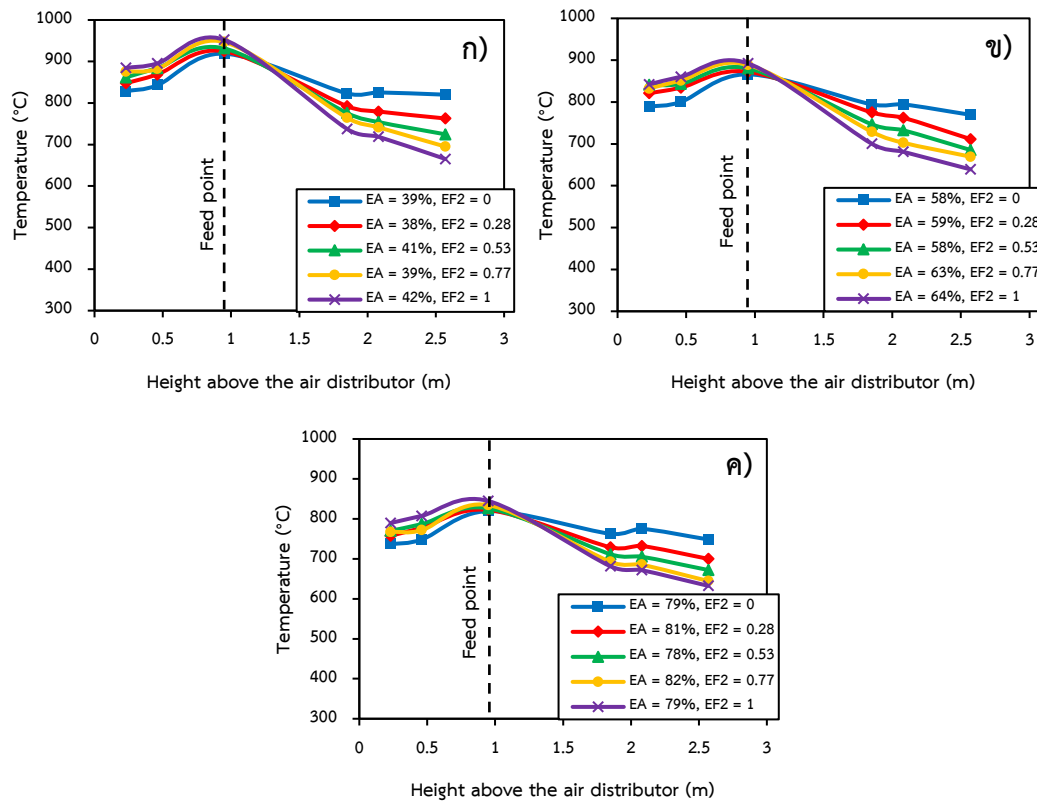
จากรูปที่ 4.8 แสดงผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 40-80\%$ ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิ $EF_2 = 0, 0.28, 0.53, 0.77$ และ 1 เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (เชื้อเพลิงปฐมภูมิ) และเปลือกถั่วลิสง (เชื้อเพลิงทุติยภูมิ) ที่ความร้อนเข้าคงที่ 72.55 kW_{th} จากการทดลองการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผสม (co-firing combustion) พบว่าทุกสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิจะมีแนวโน้มของอุณหภูมิเฉลี่ยที่คล้ายคลึงกันตลอดความสูงของเตา โดยบริเวณด้านล่างของเตาเผาซึ่งเป็นบริเวณเขตหนาแน่น (dense zone, $Z = 0.23-0.46 \text{ m}$) พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในช่วง $750-880^\circ\text{C}$ จากนั้นอุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ เพิ่มขึ้นและจะเพิ่มสูงที่สุด ณ ตำแหน่งป้อนเชื้อเพลิงที่มีความสูง 0.95 m เนื่องจากในบริเวณนี้มีอนุภาคของแข็งจากเขตและเชื้อเพลิง และก๊าซร้อนอยู่มากจึงเกิดการถ่ายเทมวลและการผสมกันของสาร (intensive) ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรง (robust combustion) ในส่วนนี้เป็นหลัก แต่หลังจากนั้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น (freeboard zone, $Z = 2.08-2.57 \text{ m}$) อุณหภูมิภายในเตาเผาจะค่อยๆ ลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา [3]

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิซึ่งส่งผลให้ปริมาณอากาศเข้าไปสู่ระบบมากยิ่งขึ้นก่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น โดยอุณหภูมิของอากาศภายในเตาเผาและภายนอกที่ใส่เข้าไปในเตาเผามีความแตกต่างกันอย่างมากจึงส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน

4.2.2 ผลกระทบของสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลกระทบของสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ $EF_2 = 0, 0.28, 0.53, 0.77$ และ 1 ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (เชื้อเพลิงปฐมภูมิ) และเปลือกถั่วลิสง (เชื้อเพลิงทุติยภูมิ) จากการทดลองการพบว่า บริเวณ dense zone พบว่าสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ $EF_2 = 0$ จะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดในทุกสภาวะการทดลองที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ จากนั้นเมื่อเพิ่ม $EF_2 = 0$ เป็น $EF_2 = 1$ พบว่าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น $50-60^\circ\text{C}$ เนื่องจากค่าพลังงานความร้อนต่ำ (LHV) ของเชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงมีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส แต่ในขณะเดียวกันที่บริเวณ freeboard zone พบว่าที่ $EF_2 = 1$ อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผากลับมีค่าต่ำที่สุดในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากเชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงนั้นมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเปลือกถั่วลิสงสับ จึงส่งผลให้เชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงเกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงที่บริเวณ dense zone ในขณะที่เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าอย่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสนั้น ได้ถูกอากาศที่ป้อนเข้ามาจากบริเวณด้านล่าง

ของเตาเผาส่งผลทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนถูกกลอยขึ้นไปเผาไหม้บริเวณ freeboard zone ส่งผลทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณด้านบนของ $EF_2 = 0$ มีค่าสูงกว่า โดยพบว่าเมื่อเพิ่ม $EF_2 = 0$ เป็น $EF_2 = 1$ อุณหภูมิเฉลี่ยด้านบนลดลงประมาณ 50-80°C

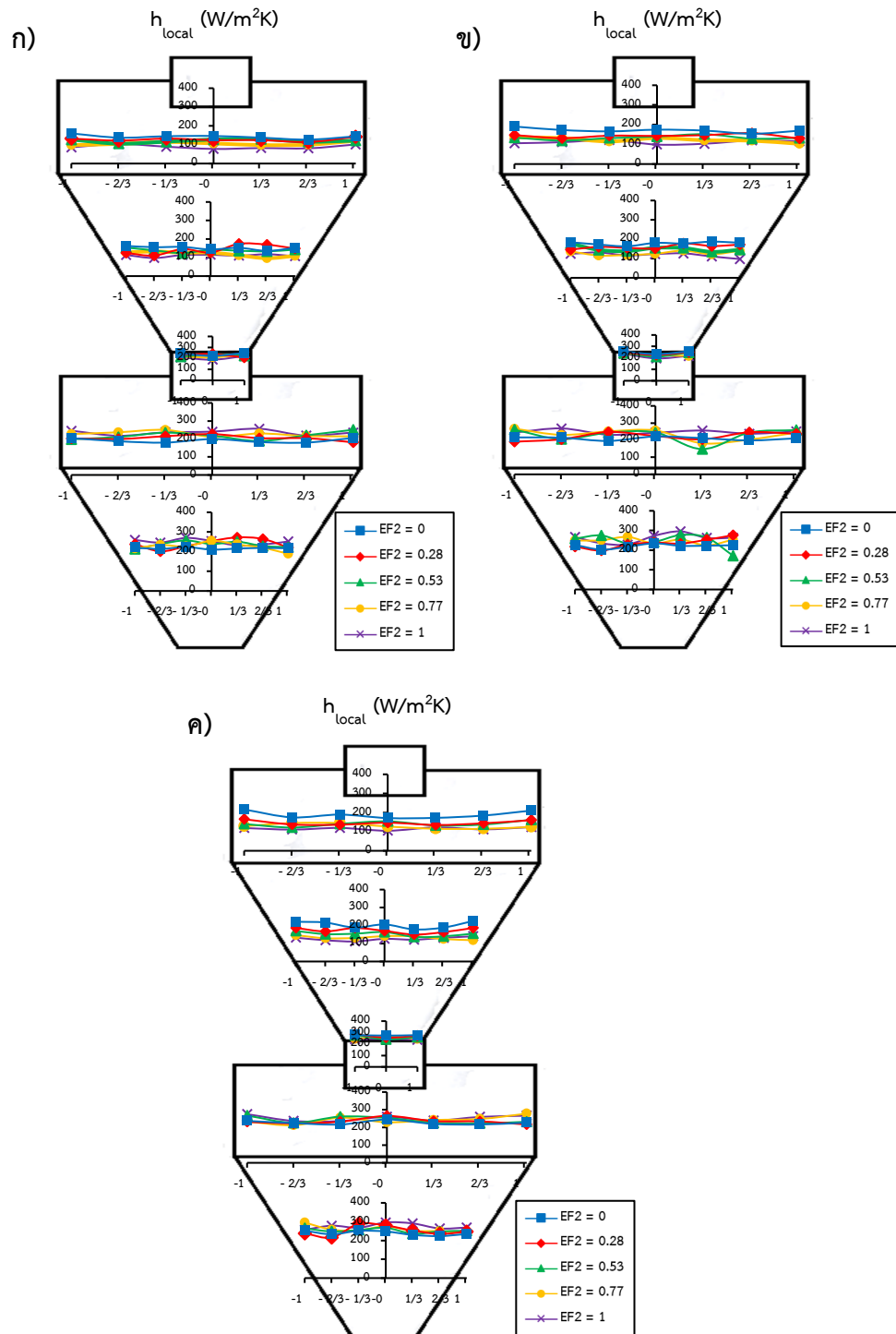


รูปที่ 4.9 ผลกระทบของสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา TS-FBC ที่ EA ก) 40%, ข) 60% และ ค) 80%

4.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local}) ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่ตำแหน่ง $r/R = 0, \pm 1/3, \pm 2/3$ และ ± 1 ที่ $EF_2 = 0, 0.28, 0.53, 0.77$ และ 1 เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (เชื้อเพลิงปฐมภูมิ) และเปลือกถั่วลิสง (เชื้อเพลิงทุติยภูมิ) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า บริเวณด้านล่างของเตา (dense, splash zone, $Z = 0.46-0.95$ m) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีบริเวณกึ่งกลางของเตาและผนังเตา ($r/R = 0$ และ ± 1) จะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น ๆ ตลอดแนวรัศมีเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีเบดอยู่หนาแน่น [10, 11] โดยเมื่อทำการเพิ่ม EF_2 ส่งผลให้สัดส่วนของเชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงที่มากขึ้นก่อให้เกิดการคลุกเคล้ากับอนุภาคเบดที่อยู่เหนือแผ่นกระจายอากาศซึ่งมีอากาศปฐมภูมิป้อนจากด้านล่างบริเวณกึ่งกลางของเตาเผา ส่งผลให้

เกิดการยกตัวที่เกิดจากการฟลูอิดไดเซชันจึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคเบดและอุปกรณ์การวัด โดยเกิดการถ่ายเทความร้อนทั้งจากการพาความร้อนของอนุภาคเบดและก๊าซกับ

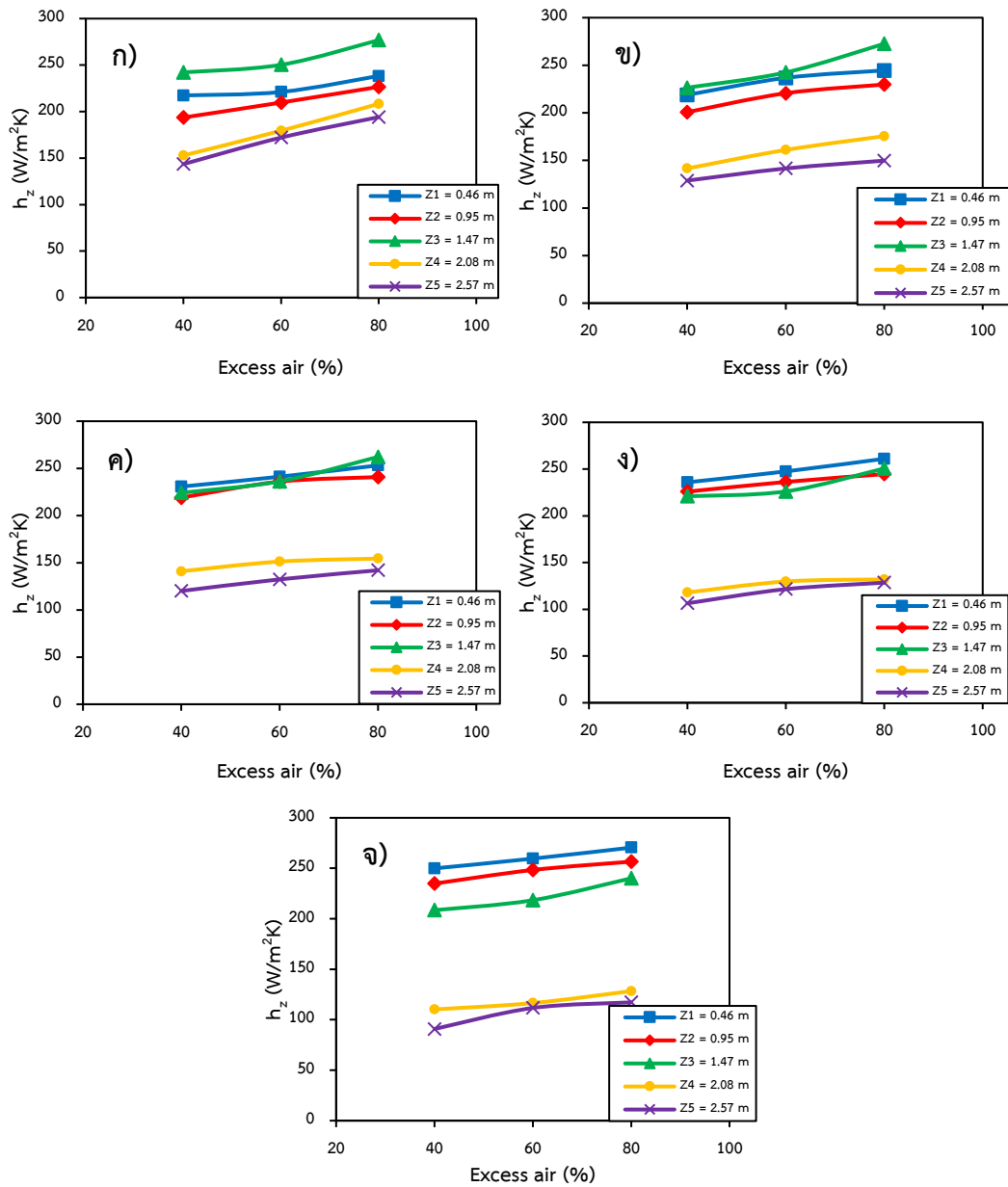


รูปที่ 4.10 ผลกระทบของตำแหน่งที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่ $r/R = 0, \pm 1/3, \pm 2/3$ และ ± 1 ที่ $EF_2 = 0, 0.28, 0.53, 0.77$ และ 1 และที่ $EA =$ ก) 40%, ข) 60% และ ค) 80%

อุปกรณ์การวัดซึ่งตลอดจนความร้อนที่ถูกดูดซับจากผนังถ่ายเทมายังอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ตำแหน่งความสูง $Z = 1.47$ m ซึ่งเป็นบริเวณคอคอดจะพบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดภายในเตาเผา เนื่องเป็นบริเวณที่มีพื้นที่หน้าตัดลดลงส่งผลให้ความเร็วของก๊าซภายในเตาเผาเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่บริเวณบริเวณอนุภาคเบตเบาบาง (freeboard zone: $Z = 2.08-2.57$ m) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดแนวรัศมีซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อน เมื่อลด $EF_2 = 1$ เป็น $EF_2 = 0$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตลอดแนวรัศมี เนื่องจากสัดส่วนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มากขึ้นประกอบกับเชื้อเพลิงมีความหนาแน่นต่ำกว่าเปลือกถั่วลิสงอย่างเห็นได้ชัด จึงทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสลอยขึ้นไปเผาไหม้บริเวณ freeboard zone ในขณะที่เปลือกถั่วลิสงจะถูกเผาไหม้ที่บริเวณด้านล่างเป็นหลัก

4.2.4 ผลกระทบของความสูง (Z) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงหุติยภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลกระทบของความสูงต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ และที่ EF_2 ก) 0, ข) 0.28, ค) 0.53, ง) 0.77 และ จ) 1 โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นชัดเจนว่าในทุกสภาวะการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยนั้นมีค่าลดลงเมื่อวัดค่าในตำแหน่งสูงขึ้นจากแผ่นกระจายอากาศ สาเหตุมาจากบริเวณด้านล่างของเตาเผาที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46$ ซึ่งเป็นบริเวณเบตหนาแน่นเกิดการกระจายตัวเนื่องจากกระบวนการพลูอิโดเซชันส่งผลให้บริเวณนี้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคเบตและก๊าซร้อน ในขณะที่เมื่อวัดในตำแหน่งความสูงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กระบวนการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคเบตลดลงเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอนุภาคเบตเบาบางจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนเป็นหลัก ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยลดลง [16, 19] อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.11ก และ 4.11ข ที่ $EF_2 = 0-0.28$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะเพิ่มสูงที่สุดที่ตำแหน่งความสูง $Z = 1.47$ m เนื่องจากเป็นบริเวณคอคอดซึ่งมีการลดลงของพื้นที่หน้าตัดส่งผลให้ความเร็วสูงขึ้นประกอบกับสัดส่วนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าเชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้เชื้อเพลิงบางส่วนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเกิดการเผาบริเวณดังกล่าวจนนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย และเมื่อเพิ่มสัดส่วนเชื้อเพลิงหุติยภูมิจาก $EF_2 = 0.28$ เป็น $EF_2 = 1$ พบว่าที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.47$ m ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะลดลงตามลำดับจนกระทั่งที่ $EF_2 = 1$ พบว่าที่ตำแหน่งความสูง 0.46 m จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.11จ



รูปที่ 4.11 ผลกระทบของความสูง (Z) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $EF_2 =$ ก) 0, ข) 0.28, ค) 0.53, ง) 0.77 และ จ) 1

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่บริเวณต่าง ๆ (Zone) พบว่า 1) ที่ $EF_2 = 0$ ($EA = 40-80\%$): $h_z = 217.40-238.34$ W/m²K ที่ dense zone, $h_z = 193.63-226.62$ W/m²K ที่ splash zone และ $h_z = 148.18-201.20$ W/m²K ที่ freeboard zone 2) ที่ $EF_2 = 0.28$ ($EA = 40-80\%$): $h_z = 218.83-244.54$ W/m²K ที่ dense zone, $h_z = 200.71-229.73$ W/m²K ที่ splash zone และ $h_z = 135.16-162.62$ W/m²K ที่ freeboard zone 3) ที่ $EF_2 =$

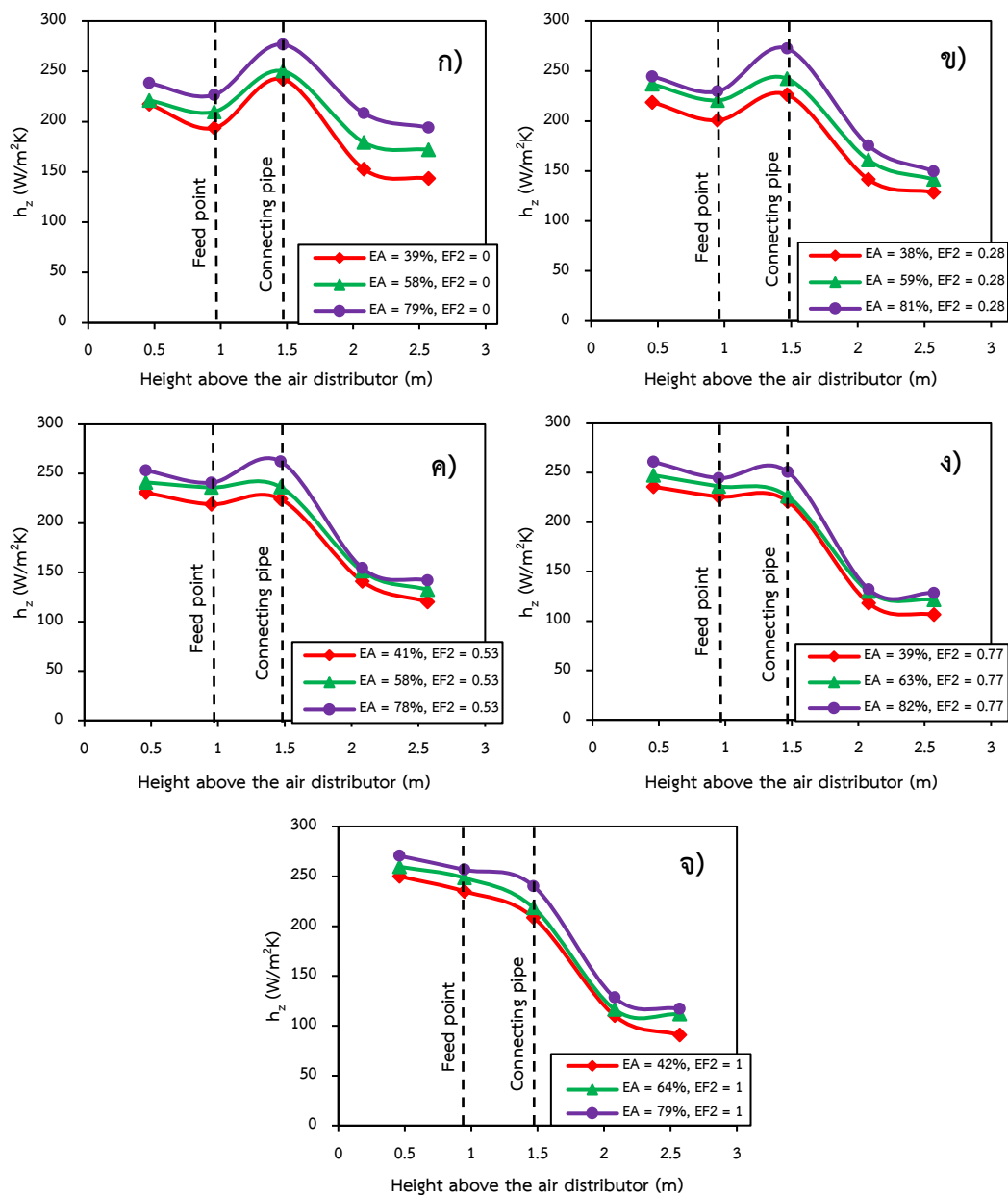
0.53 ($EA = 40\text{-}80\%$): $h_z = 230.68\text{-}253.12$ W/m²K ที่ dense zone, $h_z = 218.93\text{-}240.74$ W/m²K ที่ splash zone และ $h_z = 130.47\text{-}148.15$ W/m²K ที่ freeboard zone 4) ที่ $EF_2 = 0.77$ ($EA = 40\text{-}80\%$): $h_z = 235.83\text{-}261.01$ W/m²K ที่ dense zone, $h_z = 225.82\text{-}244.56$ W/m²K ที่ splash zone และ $h_z = 112.18\text{-}130.19$ W/m²K ที่ freeboard zone 5) ที่ $EF_2 = 1$ ($EA = 40\text{-}80\%$): $h_z = 249.91\text{-}270.50$ W/m²K ที่ dense zone, $h_z = 234.85\text{-}256.57$ W/m²K ที่ splash zone และ $h_z = 100.50\text{-}122.76$ W/m²K ที่ freeboard zone ตามลำดับ โดยที่ splash zone และ freeboard zone พบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงประมาณ 4–7% และ 25–57% เมื่อเทียบกับบริเวณ dense zone ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

4.2.5 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z) ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ

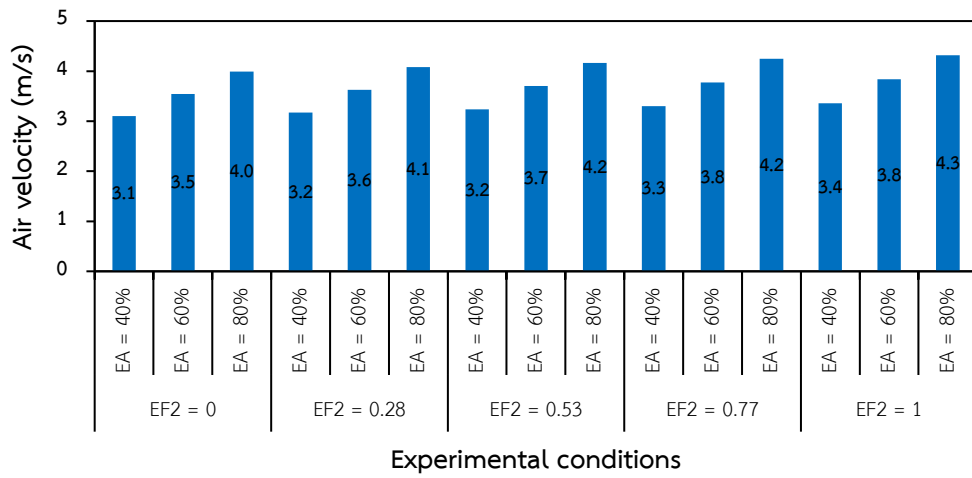
จากรูปที่ 4.12 แสดงผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกินต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ $EF_2 = 0$ ข) 0.28 ค) 0.53 ง) 0.77 และ จ) 1 จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินนั้นเป็นผลทำให้อุณหภูมิเกิดการยกตัวและกระจายตัวมากยิ่งขึ้น ประกอบกับระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาที่อุปกรณ์การวัดมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย [8] ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองการเผาไหม้แบบธรรมชาติและการใช้อากาศเป็นชั้น โดยที่ตำแหน่งความสูง 1.47 m ซึ่งบริเวณคอคอดทำให้การเคลื่อนที่ของก๊าซร้อนบริเวณนี้มีความเร็วสูงขึ้นอีกครั้งเนื่องจากการลดลงของพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณนี้จึงมีค่าสูงกว่าบริเวณ freeboard zone โดยที่ 1) ที่ $EF_2 = 0$ เมื่อเพิ่ม $EA = 40\%$ เป็น 80% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก $h_z = 242.22$ W/m²K เป็น $h_z = 276.86$ W/m²K 2) ที่ $EF_2 = 0.28$ เมื่อเพิ่ม $EA = 40\%$ เป็น 80% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก $h_z = 226.45$ W/m²K เป็น $h_z = 272.61$ W/m²K 3) ที่ $EF_2 = 0.53$ เมื่อเพิ่ม $EA = 40\%$ เป็น 80% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก $h_z = 224.10$ W/m²K เป็น $h_z = 262.18$ W/m²K 4) ที่ $EF_2 = 0.77$ เมื่อเพิ่ม $EA = 40\%$ เป็น 80% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก $h_z = 220.91$ W/m²K เป็น $h_z = 250.69$ W/m²K 5) ที่ $EF_2 = 1$ เมื่อเพิ่ม $EA = 40\%$ เป็น 80% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก $h_z = 208.52$ W/m²K เป็น $h_z = 240.11$ W/m²K

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศส่วนที่ $EA = 40\%$ เป็น $EA = 80\%$ ในทุกสัดส่วนของพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิ ส่งผลให้ความเร็วปฐมภูมิเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นจาก

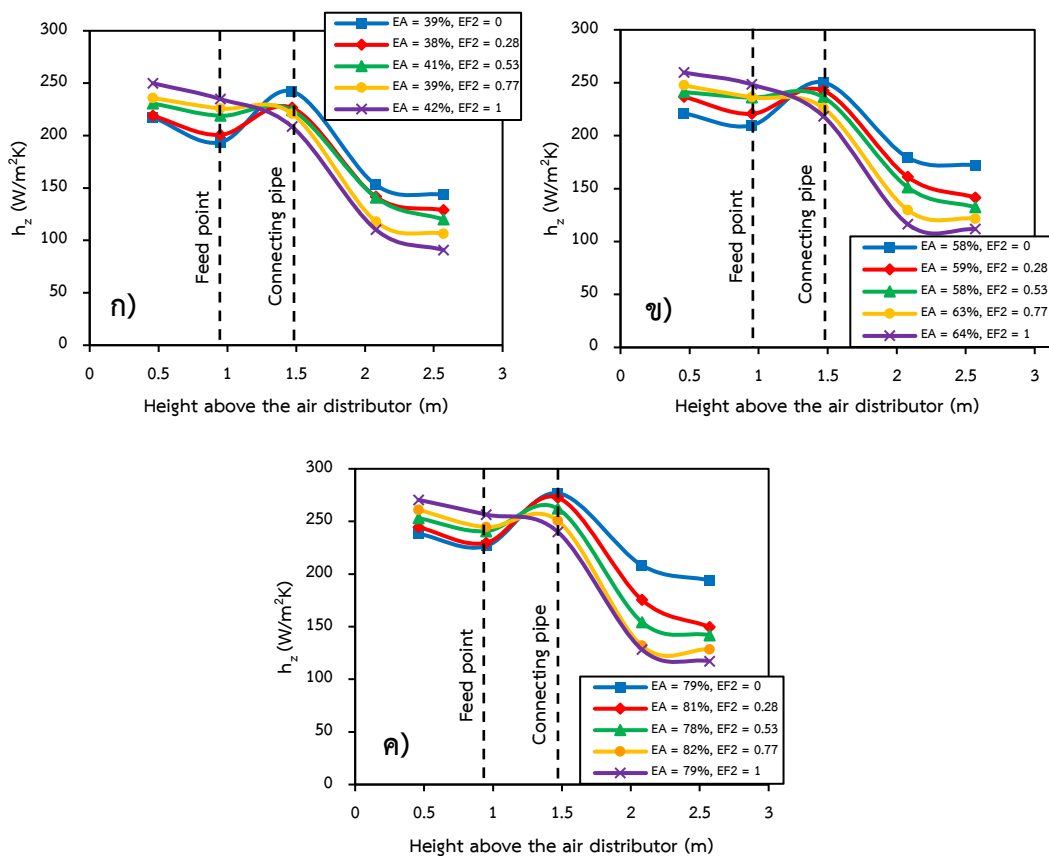
3.23 m/s เป็น 4.16 m/s (ประมาณ 29%) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ นั้นเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการเพิ่ม $EF_2 = 0$ เป็น $EF_2 = 1$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณอนุภาคเบดเบาบางนั้นลดลง เนื่องจากสัดส่วนของเปลือกถั่วลิสงที่เพิ่มขึ้น ประกอบกับความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่มากกว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เป็นผลทำให้การเผาไหม้และกระบวนการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นที่บริเวณ dense zone เป็นหลักดังแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง $Z = 0.46-2.57$ m และ $EF_2 =$ ก) 0 ข) 0.28 ค) 0.53 ง) 0.77 และ จ) 1

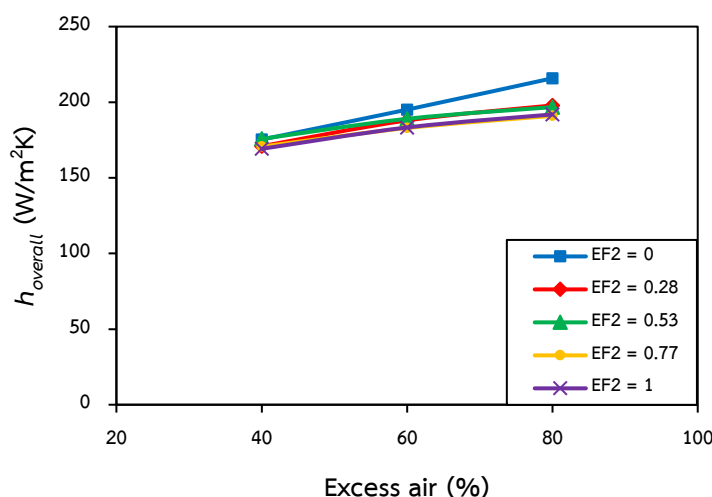


รูปที่ 4.13 ผลกระทบของความเร็วของอากาศที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน EA = 40-80% และที่สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 ผลกระทบของความสูงต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง Z = 0.46-2.57 m และ EA = ก) 40%, ข) 60% และ ค) 80%

4.2.6 ผลกระทบของสัดส่วนเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) ที่ปริมาณอากาศส่วนเกินต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 ผลกระทบของสัดส่วนเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$) ที่ $EA = 40-80\%$

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลกระทบของสัดส่วนเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ที่ $EA = 40-80\%$ โดยเผาไหม้ชีวมวลผสมประกอบด้วย เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับ (เชื้อเพลิงปฐมภูมิ) และเปลือกถั่วลิสง (เชื้อเพลิงทุติยภูมิ) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมในทุกสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2) มีค่าใกล้เคียงกันในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากการคงพลังงานความร้อน (heat input) ที่ 72.55 kW ขณะป้อนเชื้อเพลิงให้มีค่าเท่ากันในทุกสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิ อย่างไรก็ตามที่ $EF_2 = 0$ ซึ่งเป็นการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเพียงอย่างเดียวแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าส่งผลให้เชื้อเพลิงบางส่วนสามารถลอยไปเผาไหม้ยัง freeboard zone ในขณะที่เชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสงซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าจะเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณด้านล่างของเตาเผาเป็นหลัก (dense zone และ splash zone) จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้การเผาไหม้ที่มีเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมสูงกว่าเล็กน้อย

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม พบว่าที่สภาวะการทดลอง 1) $EF_2 = 0$ ($EA = 40-80\%$) ซึ่งมีค่า $h_{overall} = 176.34-216.61$ W/m²K, 2) $EF_2 = 0.28$ ($EA = 40-80\%$) ซึ่งมีค่า $h_{overall} = 171.85-199.10$ W/m²K, 3) $EF_2 = 0.53$ ($EA = 40-80\%$) ซึ่งมีค่า $h_{overall} = 176.78-$

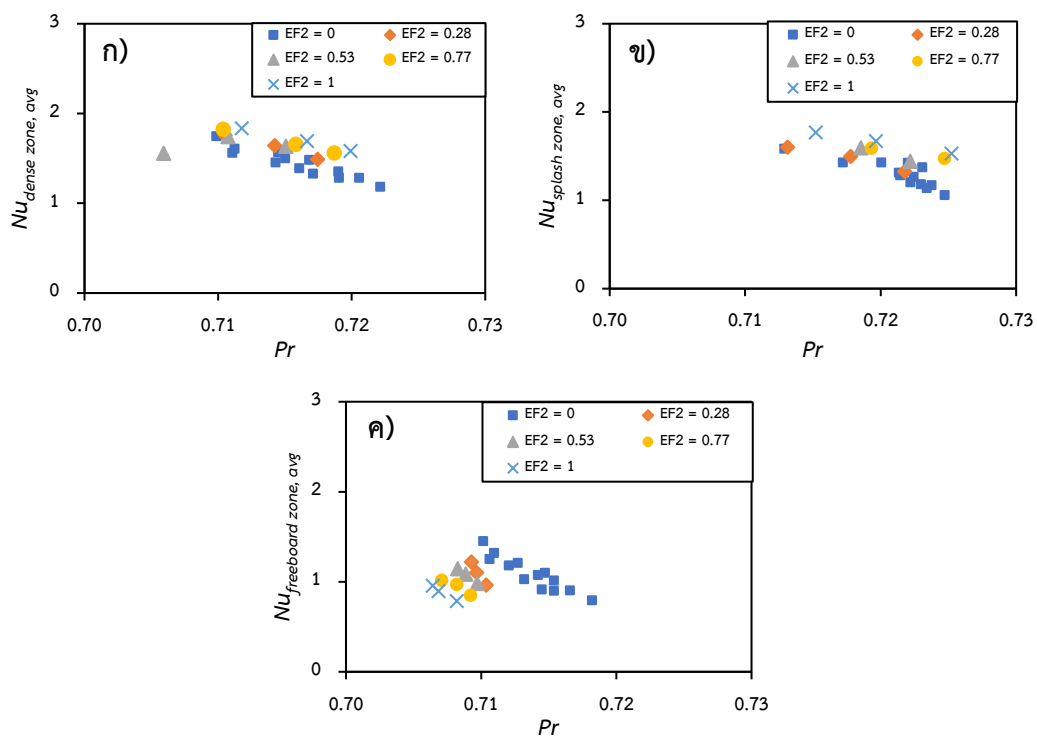
197.46 W/m²K, 4) $EF_2 = 0.77$ ($EA = 40-80\%$) ซึ่งมีค่า $h_{overall} = 171.30-191.56$ W/m²K และ
5) $EF_2 = 1$ ($EA = 40-80\%$) ซึ่งมีค่า $h_{overall} = 170.30-192.71$ W/m²K

4.3 การสร้างสมการเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและลดความยุ่งยากในการแก้ปัญหา สามารถนำเอาความสัมพันธ์ของปริมาณทางฟิสิกส์ที่ได้จากการสังเกตและทดลอง มาวิเคราะห์ในรูปแบบของเทอมตัวแปรไร้มิติ [18, 31] โดยนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการวิเคราะห์ของ Buckingham Pi คือ วิธีการวิเคราะห์โดยเป็นการจัดกลุ่มกำลังของตัวแปรให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ ประกอบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณ (multiple regression method) ซึ่งจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (coefficient of determination) โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ 1) dense zone, 2) splash zone และ 3) freeboard zone ซึ่งตัวแปรไร้มิติต่าง ๆ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ต่อค่า Nusselt number (Nu) ดังต่อไปนี้

4.3.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติต่าง ๆ

4.3.1.1 ความสัมพันธ์ของ Prandtl number (Pr) และ Nusselt number (Nu)

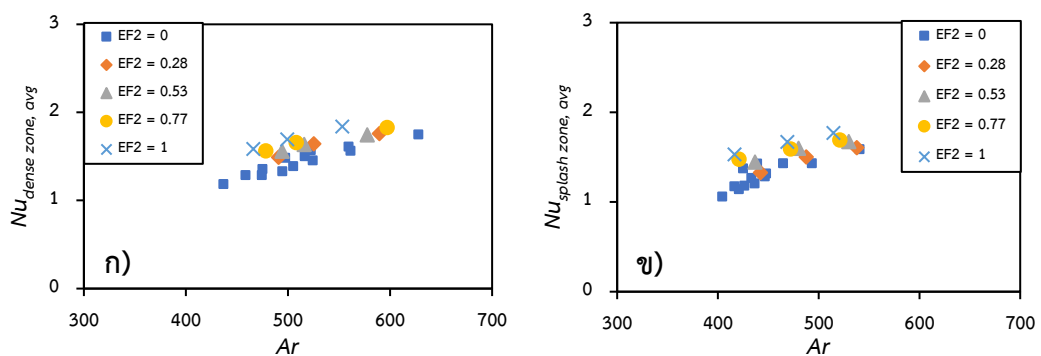


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pr กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ

ที่ ก) dense zone ข) splash zone และ ค) freeboard zone

จาก**รูปที่ 4.16** แสดงความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่าง Pr กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 บริเวณ พบว่า อุณหภูมิภายในเตาเผาส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่าง Pr กับ Nu โดยการลดลงของ Pr ส่งผลให้ค่า Nu เพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาลดลง เป็นผลทำให้คุณสมบัติของของไหล ($c_{p,g}$, μ_g และ k_g) มีค่าลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามที่บริเวณอนุภาคเบดเบาบาง (freeboard zone) พบว่า การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงยูคาลิปตัสเพียงอย่างเดียว ($EF_2 = 0$) จะทำให้ชุดข้อมูลมีการกระจายตัวออกเป็น 2 กลุ่ม อย่างเห็นได้ชัดดังแสดงใน**รูปที่ 4.16ค** เนื่องมาจากลักษณะของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีขนาดเล็กและความหนาแน่นที่ต่ำ ส่งผลให้เชื้อเพลิงสามารถลอยขึ้นไปเผาไหม้บริเวณ freeboard zone อีกครั้ง เป็นผลให้อุณหภูมิภายในเตาเผาบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิอื่น ๆ

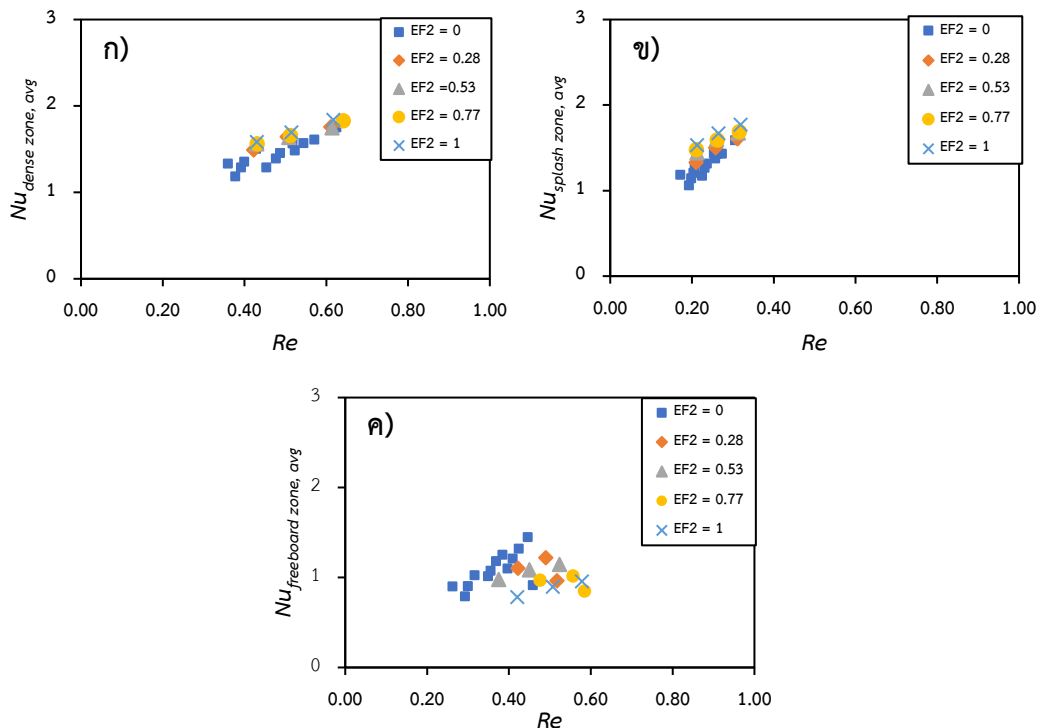
4.3.1.2 ความสัมพันธ์ของ Archimedes number (Ar) และ Nusselt number (Nu)



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Ar กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone และ ข) splash zone

จาก**รูปที่ 4.17** แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Ar กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 บริเวณ พบว่า ทั้ง 2 บริเวณมีลักษณะแนวโน้มคล้ายคลึงกัน โดยการเพิ่มขึ้นของ Ar ส่งผลให้ Nu เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) จะส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผามีค่าลดลง แต่อนุภาคเบดนั้นจะสามารถยกตัวได้สูงขึ้นเป็นผลมาจากค่าความหนืดของอากาศมีค่าลดลง และเมื่ออนุภาคเบดมีการยกตัวมากขึ้นจะส่งผลให้ความถี่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาคเบดและอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย จนนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในที่สุดในทุกสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ

4.3.1.3 ความสัมพันธ์ของ Reynolds number (Re) และ Nusselt number (Nu)

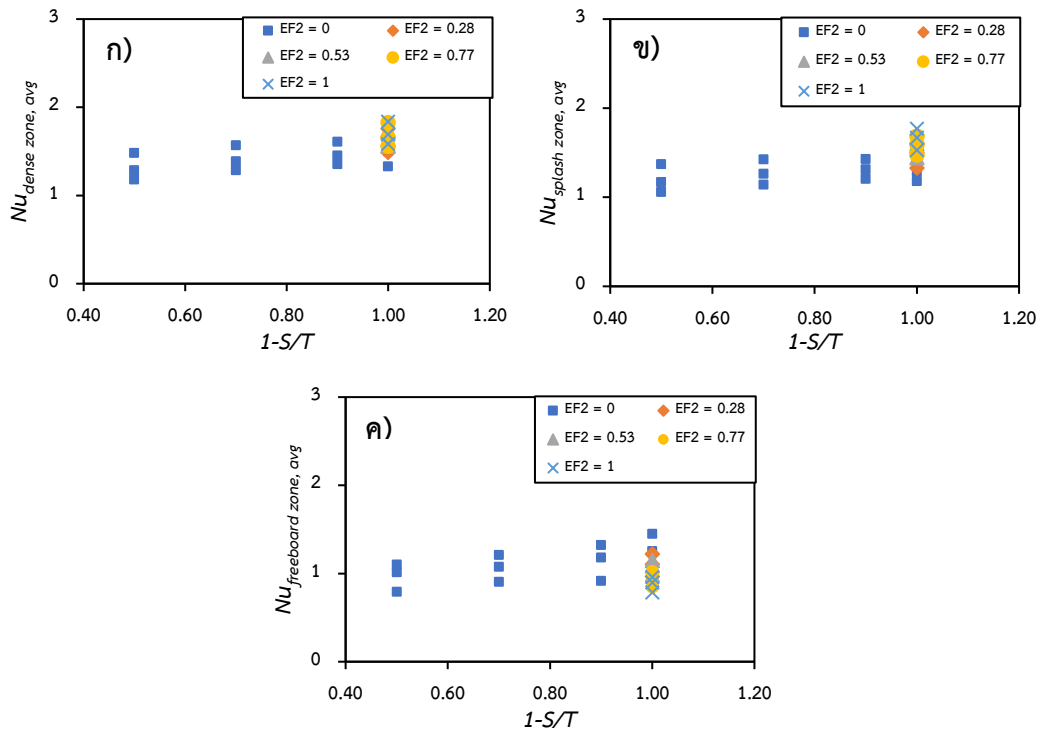


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ
 ที่ ก) dense zone และ ข) splash zone และ ค) freeboard zone

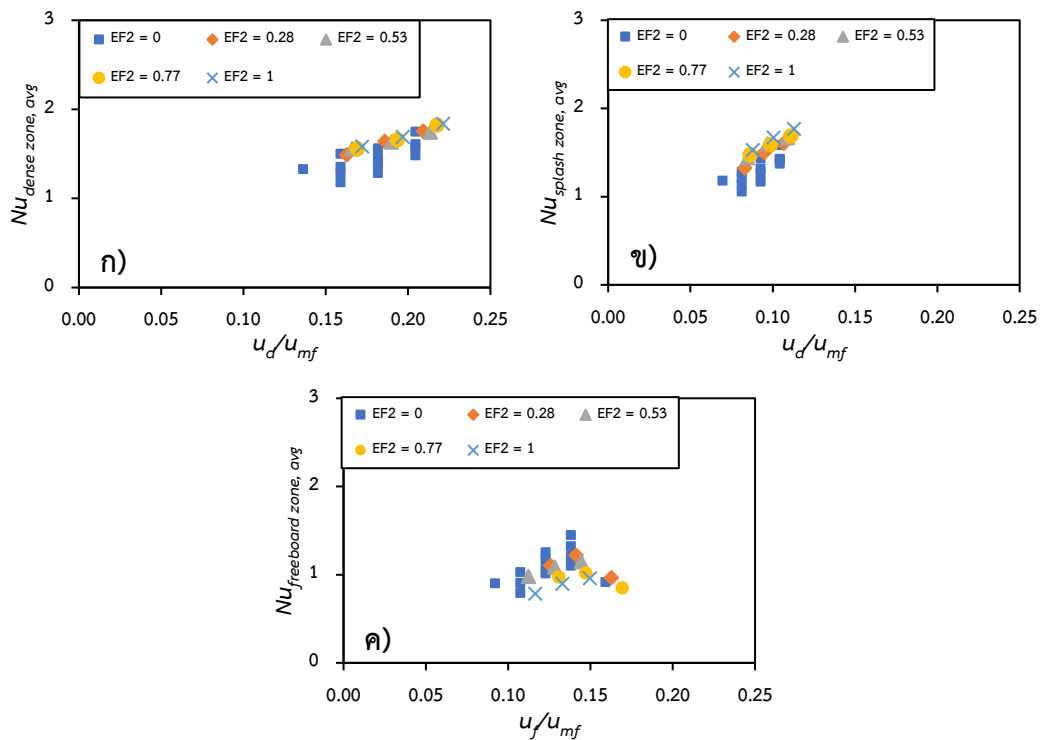
จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ พบว่า ทั้ง 3 บริเวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยการเพิ่มขึ้นของ Re ส่งผลให้ Nu เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดอากาศ อนุภาคเบดและเชื้อเพลิงเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา โดย Nu บริเวณ dense zone จะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น ๆ

4.3.1.4 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนอากาศปฐมภูมิต่ออากาศรวม (ในเทอมของ $1-S/T$) และ Nusselt number (Nu)

จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1-S/T$ กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ พบว่า ทั้ง 3 บริเวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเทอมของ $1-S/T$ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Nu เพิ่มขึ้น โดยเทอมของ $1-S/T$ จะแปรผกผันกับ S/T กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่ม S/T ส่งผลให้ความเร็วลมอากาศปฐมภูมิ (v_p) มีค่าลดลง โดยการลดลงของความเร็วลมปฐมภูมิจะส่งผลให้การยกตัวของอนุภาคเบดและกระบวนการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคเบดและอุปกรณ์มีค่าลดลง เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาตกลงตามไปด้วย



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1-S/T$ กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone และ ข) splash zone และ ค) freeboard zone

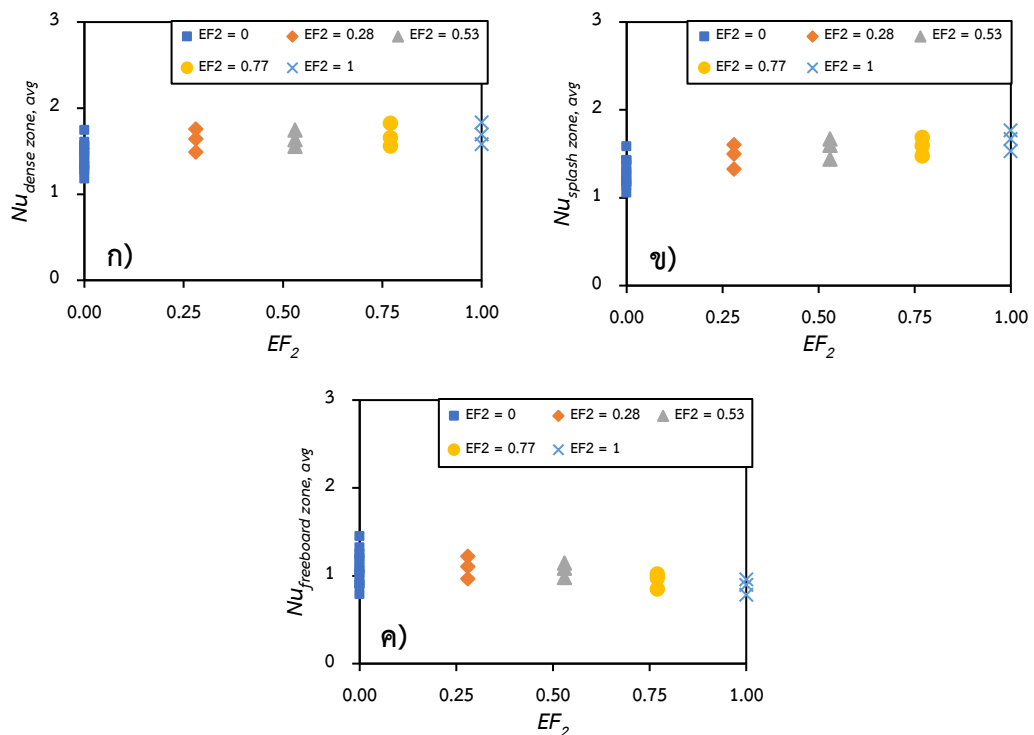


รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง u_f/u_{mf} กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ ที่ ก) dense zone ข) splash zone และ ค) freeboard zone

4.3.1.5 ความสัมพันธ์ของ Fluidizing number (u/u_{mf}) และ Nusselt number (Nu)

จากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง u/u_{mf} กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ พบว่า ทั้ง 3 บริเวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อ u/u_{mf} เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ Nu สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ u/u_{mf} เป็นผลทำให้อนุภาคของแข็งและก๊าซเกิดการเคลื่อนที่ปั่นป่วนมากขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของแข็งและก๊าซผสมกันได้ดีขึ้นจนนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในที่สุด

4.3.1.6 ความสัมพันธ์ของ Energy fraction of secondary fuel (EF_2) และ Nusselt number (Nu)



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง EF_2 กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ
ที่ ก) dense zone ข) splash zone และ ค) freeboard zone

จากรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง EF_2 กับ Nu ที่สัดส่วนพลังงานเชื้อเพลิงทุติยภูมิต่าง ๆ พบว่า บริเวณ dense zone และ splash zone มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อ EF_2 เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ Nu สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากปริมาณของเปลือกถั่วลิสงที่มากขึ้น ประกอบกับค่า LHV ที่สูงกว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.21ก อย่างไรก็ตาม ที่บริเวณ freeboard zone กลับให้ผล

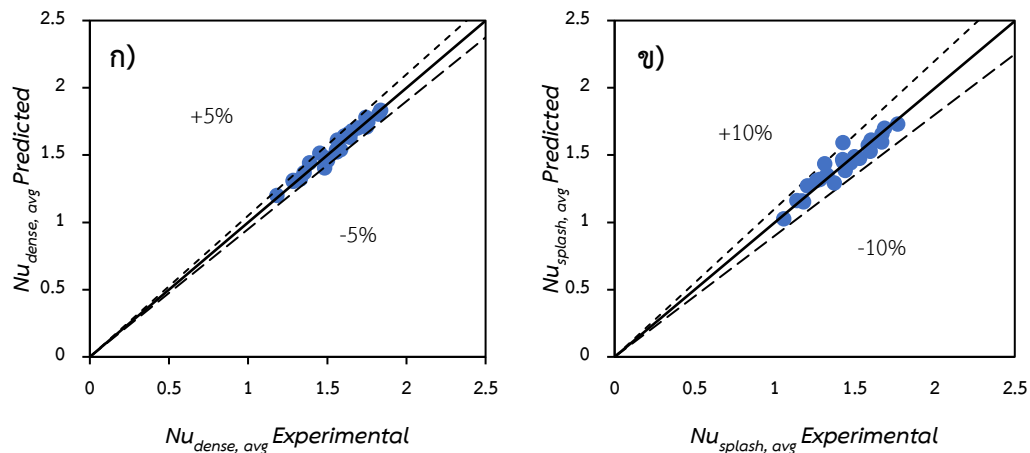
ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเปลือกถั่วลิสง ส่งผลให้เชื้อเพลิงบางส่วนสามารถลอยไปเผาไหม้บริเวณด้านบนอีกครั้ง เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเมื่อเพิ่ม EF_2 ในบริเวณดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 4.21ค

4.3.2 สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

4.3.2.1 สมการ Nusselt number ในช่วงที่เกิดการฟลูอิดเซชันบริเวณเขตหนาแน่น (Dense zone: $Z = 0.46$ m) จะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$Nu_{dense} = 3.14 \times 10^5 Ar^{-2.38} \times Pr^{-3.08} \times Re_{ds}^{3.13} \times \left(1 - \frac{S}{T}\right)^{0.24} \times \left(\frac{u}{u_{mf}}\right)^{-2.3} \quad (4.1)$$

โดยสมการที่ 4.1 มีค่า $R^2 = 0.90$, MRD = 1.88% และมีความคลาดเคลื่อน (error) $\pm 5\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.22ก สำหรับทุกสภาวะการทดลองเมื่อเผาไหม้เปลือกยูคาลิปตัสและเปลือกถั่วลิสง

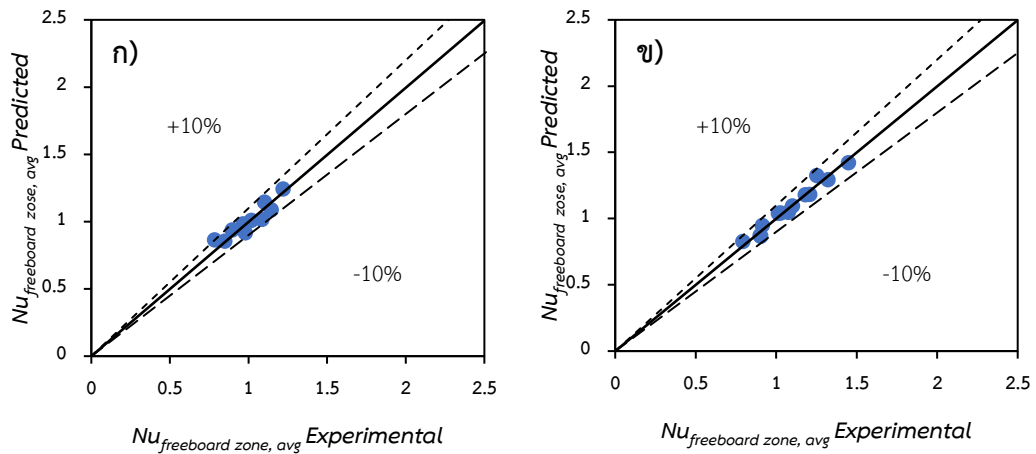


รูปที่ 4.22 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Nusselt number ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองที่
ก) dense zone และ ข) splash zone

4.3.2.2 สมการ Nusselt number ในช่วงที่เกิดการฟลูอิดเซชันระหว่างบริเวณเขตหนาแน่นและบริเวณเขตเบาบาง (Splash zone: $Z = 0.95$ m) จะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$Nu_{splash} = 2.69 \times 10^6 Ar^{3.33} \times Pr^{-0.01} \times Re_{ds}^{-5.11} \times \left(1 - \frac{S}{T}\right)^{0.4} \times \left(\frac{u}{u_{mf}}\right)^{6.08} \quad (4.2)$$

โดยสมการที่ 4.2 มีค่า $R^2 = 0.96$, $MRD = 3.15\%$ และมีความคลาดเคลื่อน (error) $\pm 10\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.22ข สำหรับทุกสภาวะการทดลองเมื่อเผาไหม้เปลือกกัญชาลิปตัสและเปลือกถั่วลิสง



รูปที่ 4.23 แสดงผลเปรียบเทียบค่า Nusselt number ที่ได้จากการทำนายกับผลการทดลองที่ บริเวณ freeboard zone ก) $EF_2 = 0$ และ ข) $0 < EF_2 \leq 1$

4.1.2.3 สมการ Nusselt number ในช่วงที่เกิดการฟลูอิดไฮดรอนามิกชั้นบริเวณเขตเบาบาง (Freeboard zone: $Z = 2.08-2.57$ m) จะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$Nu_{freeboard} = 7.23 \times 10^{-8} Pr^{-43.86} \times Re_f^{1.45} \times \left(1 - \frac{S}{T}\right)^{-0.27} \times \left(\frac{u}{u_{mf}}\right)^{-1.49} \quad (4.3)$$

$$Nu_{freeboard} = 0.224 Pr^{-11.83} \times Re_f^{0.1} \times \left(1 - \frac{S}{T}\right)^{0.3} \times \left(\frac{u}{u_{mf}}\right)^{0.84} \times (EF_2)^{-0.34} \quad (4.4)$$

โดยสมการที่ 4.3 มีค่า $R^2 = 0.96$, $MRD = 3.15\%$ และมีความคลาดเคลื่อน (error) $\pm 10\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.23ก สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดาและการใช้อากาศเป็นชั้นเมื่อเผาไหม้เปลือกกัญชาลิปตัสเพียงอย่างเดียวซึ่งมี $EF_2 = 0$ ในขณะที่สมการที่ 4.4 จะใช้ทำนายสำหรับการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลแบบผสม (เปลือกไม้ยูคาลิปตัสและเปลือกถั่วลิสง) ซึ่งมี $EF_2 = 0.28, 0.53, 0.77$ และ 1 ตามลำดับ โดยมีค่า $R^2 = 0.87$, $MRD = 3.56\%$ และมีค่าความคลาดเคลื่อน (error) $\pm 10\%$ ดังแสดงในรูปที่ 4.23ข

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฟต โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ประกอบด้วย 1) ตัวแปรที่สภาวะในการทดลองทั้ง 2 รูปแบบการเผาไหม้ คือ การเผาไหม้แบบธรรมดา (Conventional combustion) และการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น (Air-staged combustion) เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัส ที่อัตราป้อนเชื้อเพลิง $FR = 22.5$ kg/h ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 20-80\%$ และสัดส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวม $S/T = 0.1, 0.3$ และ 0.5 และ 2) ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วม (Biomass co-firing) ระหว่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและเปลือกถั่วลิสง ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงปฐมภูมิและเชื้อเพลิงหุติยภูมิที่ความร้อนขาเข้าคั้งที่ 72.55 kW_{th} ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 40-80\%$ และที่สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงหุติยภูมิที่ $EF_2 = 0, 0.28, 0.53, 0.77$ และ 1 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาจะถูกวัดในแนวรัศมีที่ $r/R = 0, \pm 1/3, \pm 2/3$ และ ± 1 และที่ตำแหน่งความสูงของเตาเผาที่ $Z = 0.46, 0.95, 1.47, 2.08$ และ 2.57 m จากการทดลองสามารถสรุปถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฟตได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลกระทบที่ตำแหน่งในแนวรัศมี (r/R)

ที่ตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางของเตาเผา ($r/R = 0$) ที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ตามแนวรัศมี ($r/R = \pm 1/3, \pm 2/3$ และ 1) เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงถูกป้อนเข้ามาภายในเตาเผาและเกิดการยกตัวของเบดมากที่สุด ทำให้ความถี่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนมีมากขึ้น

5.1.2 ผลกระทบที่ตำแหน่งความสูง (Z)

ที่ตำแหน่งความสูงในการวัดพบว่า ที่บริเวณเบดหนาแน่น (dense zone, $Z = 0.46$ m) พบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุด เนื่องจากอิทธิพลการพาความร้อนจากเบด (particle convection) และการพาความร้อนจากก๊าซร้อน (gas convection) ในขณะที่บริเวณเบดเบาบาง

(splash zone, $Z = 0.95$ m และ freeboard zone, $Z = 2.08-2.57$ m) จะมีการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนเป็นหลัก ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง 4-7% และ 23-56% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณเขตหนาแน่นในทุกสภาวะการทดลอง

5.1.3 ผลกระทบที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA)

ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมสูงขึ้นตามไปด้วย โดยเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินจาก $EA = 20\%$ เป็น 80% ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมจะเพิ่มขึ้น 36% เนื่องจากความเร็วของอากาศปฐมภูมิเข้าสู่ภายในระบบมากขึ้น ทำให้อนุภาคเบตเกิดการกระจายตัวแบบปั่นป่วนได้ดีประกอบกับความถี่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้นระหว่างอนุภาคเบตกับอุปกรณ์การวัด

5.1.4 ผลกระทบที่สัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม (S/T)

การเพิ่มอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมจาก $S/T = 0$ เป็น $S/T = 0.5$ จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมมีค่าลดลง 14-18% เนื่องจากความเร็วของอากาศปฐมภูมิที่ลดลงนั้นส่งผลต่อการยกตัวและการกระจายตัวของอนุภาคเบตโดยตรง เป็นผลทำให้ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยลดลงตามไปด้วย

5.1.5 ผลกระทบที่สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (EF_2)

การเพิ่มสัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิจาก $EF_2 = 0$ เป็น $EF_2 = 1$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยบริเวณอนุภาคเบตหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น 12-15% เนื่องจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิง (LHV) ต่ำกว่าเชื้อเพลิงเปลือกถั่วลิสง อย่างไรก็ตามที่บริเวณ freeboard zone ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอนุภาคเบตเบาบาง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะมีค่าลดลง 32-39% เนื่องจากความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าส่งผลให้เชื้อเพลิงบางส่วนลอยขึ้นไปเผาไหม้บริเวณ freeboard zone อีกครั้งจนนำไปสู่การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในที่สุด

เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและลดความยุ่งยากในการแก้ปัญหาสำหรับการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบการเผาไหม้ในการทดลองนี้ จึงได้หาความสัมพันธ์ของตัวแปรไว้มีติดต่าง ๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (multiple regression method) จะได้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยจำแนกออกเป็น 3 บริเวณ ดังนี้

- Dense zone ($Z = 0.46$ m) ซึ่งมีค่า $R^2 = 0.90$, $MRD = 1.88\%$ และมีความคลาดเคลื่อน (error) $\pm 5\%$

- Splash zone ($Z = 0.95$ m) มีค่า $R^2 = 0.96$, $MRD = 3.15\%$ และมีความคลาดเคลื่อน (error) $\pm 10\%$

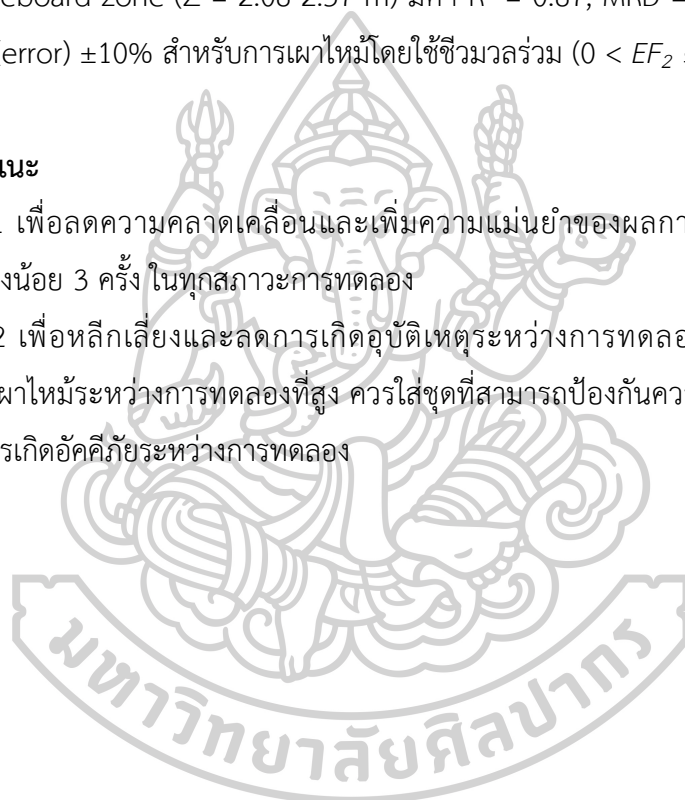
- Freeboard zone ($Z = 2.08-2.57$ m) มีค่า $R^2 = 0.96$, $MRD = 3.15\%$ และมีความคลาดเคลื่อน (error) $\pm 10\%$ สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดาและการใช้อากาศเป็นชั้นเมื่อเผาไหม้เปลือกยูคาลิปตัสเพียงอย่างเดียวซึ่งมี $EF_2 = 0$

- Freeboard zone ($Z = 2.08-2.57$ m) มีค่า $R^2 = 0.87$, $MRD = 3.56\%$ และมีค่าความคลาดเคลื่อน (error) $\pm 10\%$ สำหรับการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลร่วม ($0 < EF_2 \leq 1$)

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความแม่นยำของผลการทดลองจึงควรทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง ในทุกสภาวะการทดลอง

5.2.2 เพื่อหลีกเลี่ยงและลดการเกิดอุบัติเหตุระหว่างการทดลองเนื่องจากอุณหภูมิในกระบวนการเผาไหม้ระหว่างการทดลองที่สูง ควรใส่ชุดที่สามารถป้องกันความร้อนและมีอุปกรณ์ในการป้องกันการเกิดอัคคีภัยระหว่างการทดลอง



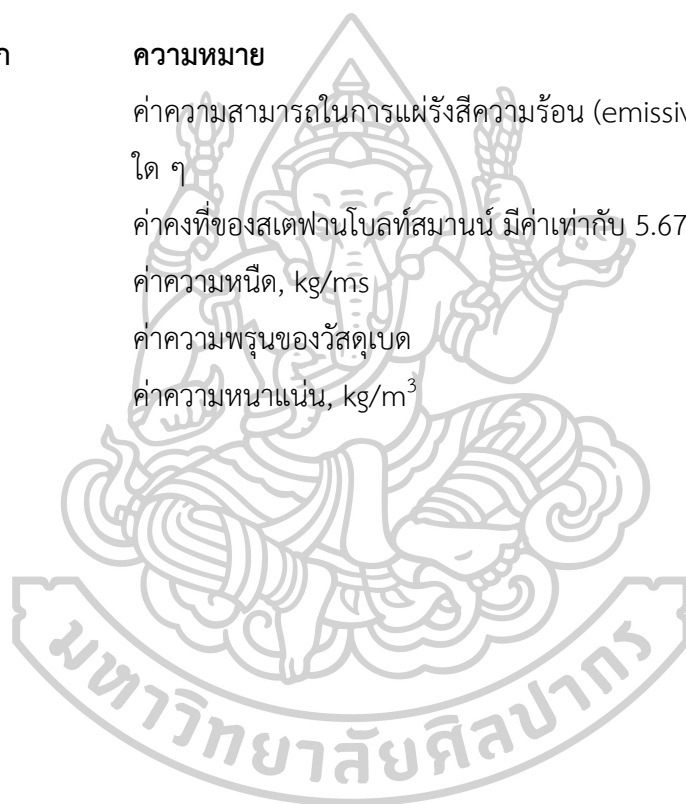
รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่หน้าตัด, m^2
Ar	Archimedes Number
Bi	Biot number
$c_{p, g}$	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ, J/kgK
$c_{p, lump}$	ค่าความจุความร้อนของวัสดุลัมป์, J/kgK
d_p	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m
EF_2	สัดส่วนพลังงานของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ
FR	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/h
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
h	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, W/m^2K
h_{gc}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศ, W/m^2K
h_{pc}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค, W/m^2K
h_{local}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี, W/m^2K
$h_{overall}$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม, W/m^2K
h_r	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี, W/m^2K
h_z	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ความสูงต่าง ๆ, W/m^2K
J	อัตราการแผ่รังสีความร้อน, W/m^2
k_g	ค่าการนำความร้อนของก๊าซ, W/mK
L_s	ความยาวของวัสดุลัมป์, m
HHV	ค่าพลังงานความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (kJ/kg)
LHV_1	ค่าพลังงานความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงปฐมภูมิ (kJ/kg)
LHV_2	ค่าพลังงานความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ (kJ/kg)
LHV_{total}	ค่าพลังงานความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงโดยรวม (kJ/kg)
MF_1	สัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงปฐมภูมิ
MF_2	สัดส่วนโดยมวลของเชื้อเพลิงทุติยภูมิ
Nu	Nusselt Number
ΔP	ความดัน, kPa
Pr	Prandtl Number

สัญลักษณ์	ความหมาย
Q_{sf}	อัตราการไหลของอากาศขาเข้าหัวกระจายอากาศ, m/s^3
Q_{mf}	อัตราการไหลของอากาศต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน, m/s^3
Q_p	อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ, m/s^3
Q_s	อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ, m/s^3
Q_t	อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ, m/s^3
r_i	รัศมีภายในของแผ่นกระจายอากาศ, m
r_o	รัศมีภายนอกของแผ่นกระจายอากาศ, m
R	ค่าความต้านทานความร้อน, K/W
Re	Reynolds Number
Re_f	Reynolds Number fluidized bed
S/T	อัตราส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวม
S_w	Swirl Number
T	อุณหภูมิ, $^{\circ}C$
T_s	อุณหภูมิของพื้นผิววัสดุลัมป์, $^{\circ}C$
T_b	อุณหภูมิของเบด, $^{\circ}C$
T_i	อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุลัมป์, $^{\circ}C$
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในเตา, $^{\circ}C$
t	เวลาในการวัด, s
U	ความเร็วอากาศในการทำฟลูอิดเซชัน ณ จุดใดๆ, m/s
U_{sf}	ความเร็วอากาศขาเข้าหัวกระจายอากาศ, m/s
U_{mf}	ความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน, m/s
V	ปริมาตร, m^3
v_p	ความเร็วอากาศปฐมภูมิ, m/s
v_s	ความเร็วอากาศทุติยภูมิ, m/s
v_t	ความเร็วอากาศรวม, m/s
Z	ตำแหน่งความสูงในการวัดเหนือแผ่นกระจายอากาศ, m
ตัวห้อย	ความหมาย
b	วัสดุเบด
gc	การพาความร้อนของก๊าซหาฟลูอิดเซชัน

ตัวห้อย	ความหมาย
mf	เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน
mff	เกิดฟลูอิดไอเซชันอย่างไม่สมบูรณ์
msf	เกิดฟลูอิดไอเซชันอย่างสมบูรณ์
p	อนุภาค
pc	การพาความร้อนของอนุภาคเบตทาฟลูอิดไอเซชัน
R	รัศมีทั้งหมดของเตา

สัญลักษณ์กรีก	ความหมาย
ε	ค่าความสามารถในการแผ่รังสีความร้อน (emissivity) ของวัตถุที่อุณหภูมิใด ๆ
σ	ค่าคงที่ของสเตฟานโบลท์สมานน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
μ	ค่าความหนืด, kg/ms
α	ค่าความพรุนของวัสดุเบต
ρ	ค่าความหนาแน่น, kg/m^3



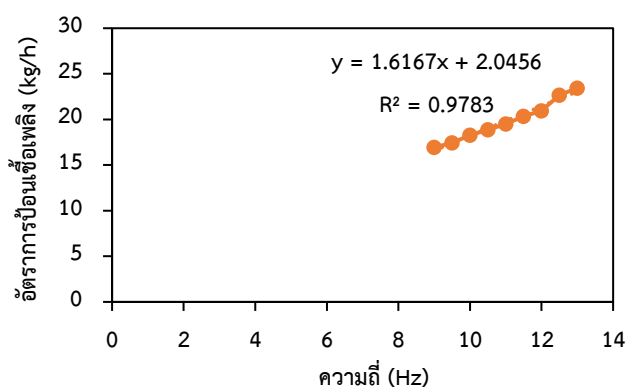
ภาคผนวก ก

การทดสอบเพื่อหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสม (fuel feeder calibration)

ในการลำเลียงเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาสำหรับการทดลองนี้จะใช้ลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยระบบสกรู (screw feeder) โดยใช้กำลังของมอเตอร์ขนาด 1 hp ซึ่งถูกควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ (inverter) ในหน่วย Hz ดังนั้น เพื่อหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อให้เป็นไปตามเงื่อนไขในแต่ละการทดลองจึงได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) และอัตราการป้อนของเชื้อเพลิง (kg/h) โดยแสดงดังต่อไปนี้

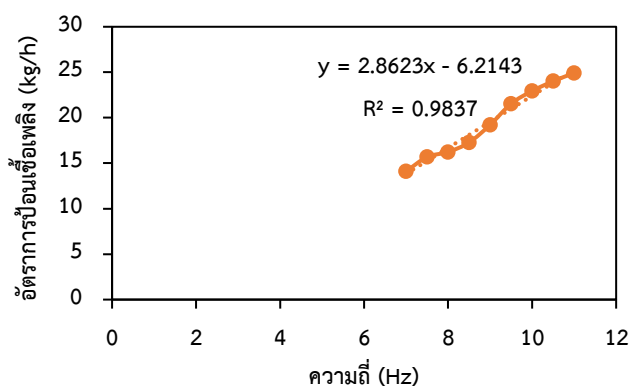
ตารางที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) และอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส : เปลือกถั่วลิสง (kg/h) ที่ $MF_2 = 0$

f (hz)	feed rate (kg/h)
9	16.94
9.5	17.45
10	18.26
10.5	18.88
11	19.52
11.5	20.36
12	20.95
12.5	22.65
13	23.45



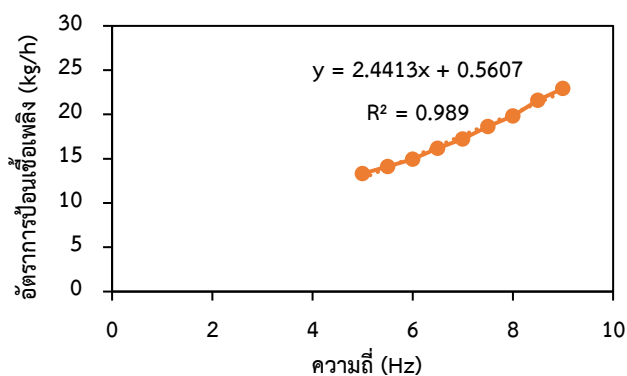
ตารางที่ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) และอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส : เปลือกถั่วลิสง (kg/h) ที่ $MF_2 = 0.25$

f (hz)	feed rate (kg/h)
7	14.11
7.5	15.68
8	16.23
8.5	17.28
9	19.22
9.5	21.54
10	22.94
10.5	24.01
11	24.91



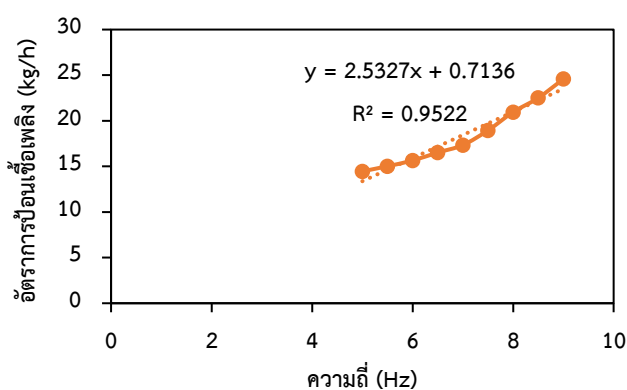
ตารางที่ ก.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) และอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส : เปลือกถั่วลิสง (kg/h) ที่ $MF_2 = 0.50$

f (hz)	feed rate (kg/h)
5	13.32
5.5	14.12
6	14.95
6.5	16.17
7	17.24
7.5	18.65
8	19.84
8.5	21.62
9	22.94



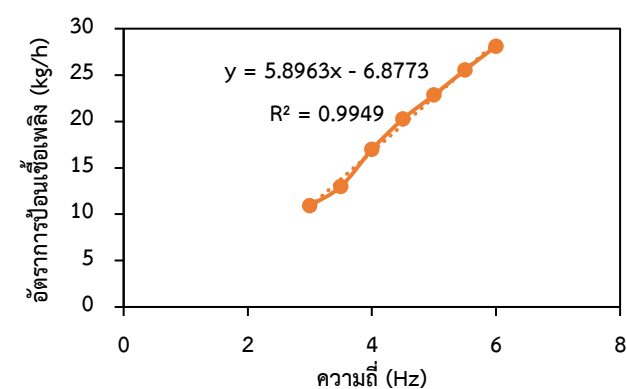
ตารางที่ ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) และอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส : เปลือกถั่วลิสง (kg/h) ที่ $MF_2 = 0.75$

f (hz)	feed rate (kg/h)
5	14.46
5.5	15.02
6	15.65
6.5	16.52
7	17.34
7.5	18.95
8	20.95
8.5	22.51
9	24.58



ตารางที่ ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ (Hz) และอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส : เปลือกถั่วลิสง (kg/h) ที่ $MF_2 = 1$

f (hz)	feed rate (kg/h)
3	10.91
3.5	12.98
4	16.97
4.5	20.26
5	22.84
5.5	25.55



ภาคผนวก ข

การหาค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด (Uncertainty)

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบที่ค่า $Re = 32.71$ ซึ่งอยู่ในช่วง $4 < Re < 40$ พบว่าสมการที่ใช้หาค่า Nusselt number (Nu) โดยทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อขนาด 0.1 m ที่อุณหภูมิของวัตถุสัมบูรณ์ 350°C ความเร็วลมที่ 0.1 m/s โดยแสดงดังต่อไปนี้

เครื่องมือวัด	ความแม่นยำในการวัด
เครื่องวัดความเร็วลม	$\pm 0.5\%$
สายเทอร์โมคัปเปิล Type K	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$

สมการ $h = \frac{Nuk}{D}$ จะได้ว่า $h = \frac{0.911(Re)^{0.385} (Pr)^{1/3} k}{D}$ (ข.1)

จากสมการ

$$w_h = \left[\left(\frac{\partial h}{\partial Re} w_v \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T} w_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (ข.2)$$

นำสมการที่ (ข.1) แทนใน (ข.2) จะได้ว่า

$$\frac{\partial h}{\partial Re} = \frac{0.911 Pr^{1/3} k (0.385) v^{-0.615}}{v^{0.385} D^{0.615}} \quad \text{โดยที่ } v = 0.1 \pm 0.5\%, \quad w_v = \frac{0.5}{100} \times \frac{1}{0.1} = 0.05$$

$$\frac{\partial h}{\partial Re} = 10.59 \quad \text{โดยที่ } T = 350 \pm 1.5^{\circ}\text{C}, \quad w_T = \frac{1.5}{350} = 0.004286$$

$$h = \left[(10.59 \times 0.05)^2 + (10.59 \times 0.004286)^2 \right]^{1/2} = 0.532 \text{ W / m}^2\text{K}$$

$$= 17.56\%$$

สรุป uncertainty = 17.56%

ภาคผนวก ค

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผา TS-FBC

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local})

โดยการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยจะแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local}) ที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 60\%$, สัดส่วนอากาศหุติยภูมิต่ออากาศรวมที่ $S/T = 0$ และที่ตำแหน่งวัตต์ลูมพ์ในแนวรัศมีที่ $r/R = 0$ (จุดที่ 4) โดยบันทึกค่าอุณหภูมิขณะทำการวัดเป็นเวลา 20 วินาที จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมี โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(T_s - T_b)/T_i - T_b$ กับ t และนำค่าไปแทนในสมการที่ ค.1 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อไป

$$h_{local} = \text{Slope} \left(\frac{\rho V c_p}{A_s} \right) \quad (\text{ค.1})$$

โดย	h	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
	Slope	คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(T_s - T_m)/T_i - T_m$ กับ t
	A_s	คือ พื้นที่ผิวที่รับความร้อน (m^2)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของวัตต์ลูมพ์ (kg/m^3)
	V	คือ ปริมาตรวัตต์ลูมพ์ (m^3)
	c_p	คือ ความร้อนจำเพาะของวัตต์ลูมพ์ ($\text{kJ}/\text{kg K}$)
	t	คือ เวลา (s)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่พื้นผิวรับความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
	T_b	คือ อุณหภูมิแก๊สร้อนของเบด ($^{\circ}\text{C}$)
	T_i	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

โดยคุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางความร้อนของวัตต์ลูมพ์แสดงในตารางที่ 3.5 และอุณหภูมิของวัตต์ลูมพ์และเบดขณะทำการทดลองจะแสดงในตารางที่ ค.1

จะได้ว่า	$\rho = 8,933 \text{ kg}/\text{m}^3,$	$V = 7.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
	$A_s = 9.0257 \times 10^{-4} \text{ m}^2,$	$c_p = 385 \text{ J}/\text{kg K}$

จากสมการที่ (ข.1) จะได้ว่า
$$h_{local} = slope \left(\frac{\rho V c_p}{A_s} \right)$$

จะได้ว่า
$$h_{local} = (0.0085) \frac{8933 \times 7.24 \times 10^{-6} \times 385}{9.0257 \times 10^{-4}}$$

$$h_{local} = 234.56 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่ตำแหน่ง $r/R = 0$ (จุดที่ 4) จะมีค่าเท่ากับ $234.56 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิของวัตถุลัมปีและเบดขณะทำการทดลองที่ $EA = 60\%$ และ $S/T = 0$

Time (s)	T_s (°C)	T_b (°C)	$T_s - T_b$ (°C)	$T_f - T_b$ (°C)	$\ln(T_s - T_b)/(T_f - T_b)$	dt (s)
0	38.6	757.2	-718.6	-718.6	0.0000	0
1	42.2	757.2	-715.0	-718.6	-0.0050	1
2	46.1	757.3	-711.2	-718.7	-0.0105	1
3	50	757.5	-707.5	-718.9	-0.0160	1
4	53.8	757.7	-703.9	-719.1	-0.0214	1
5	58	757.7	-699.7	-719.1	-0.0273	1
6	62.1	757.7	-695.6	-719.1	-0.0332	1
7	66.4	757.7	-691.3	-719.1	-0.0394	1
8	71.2	757.9	-686.7	-719.3	-0.0464	1
9	76.4	757.7	-681.3	-719.1	-0.0540	1
10	82.4	757.7	-675.3	-719.1	-0.0628	1
11	88.5	757.7	-669.2	-719.1	-0.0719	1
12	94.8	757.9	-663.1	-719.3	-0.0814	1
13	101.2	757.7	-656.5	-719.1	-0.0911	1
14	107.7	757.7	-650.0	-719.1	-0.1010	1
15	114.6	757.7	-643.1	-719.1	-0.1117	1
16	121.7	757.6	-635.9	-719.0	-0.1228	1
17	129.2	757.5	-628.3	-718.9	-0.1347	1
18	136.3	757.5	-621.2	-718.9	-0.1461	1
19	143.8	757.8	-614.0	-719.2	-0.1581	1
20	151.6	758.1	-606.5	-719.5	-0.1709	1

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง (h_z)

แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจากตำแหน่งการวัดตามแนวรัศมีทั้ง 7 จุด ตั้งแต่ จุดที่ 1 (r_1), จุดที่ 2 (r_2), จุดที่ 3 (r_3), จุดที่ 4 (r_4), จุดที่ 5 (r_5), จุดที่ 6 (r_6) และจุดที่ 7 (r_7) ที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดังแสดงในรูปที่ ค.1 โดยที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 60\%$ และสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมที่ $S/T = 0$ ได้ถูกนำมาใช้ในคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ เหนือแผ่นกระจายอากาศ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (h_{local}) แสดงในตารางที่ ค.2 ได้มาจากการเฉลี่ยค่าจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ ค.2-ค.6

$$h_{z_1} = \frac{\sum_{i=1}^7 h_{(Z=1,r=i)} A_{(Z=1,r=i)}}{\sum_{i=1}^7 A_{(Z=1,r=i)}} \quad (\text{ค.2})$$

$$h_{z_2} = \frac{\sum_{i=1}^7 h_{(Z=2,r=i)} A_{(Z=2,r=i)}}{\sum_{i=1}^7 A_{(Z=2,r=i)}} \quad (\text{ค.3})$$

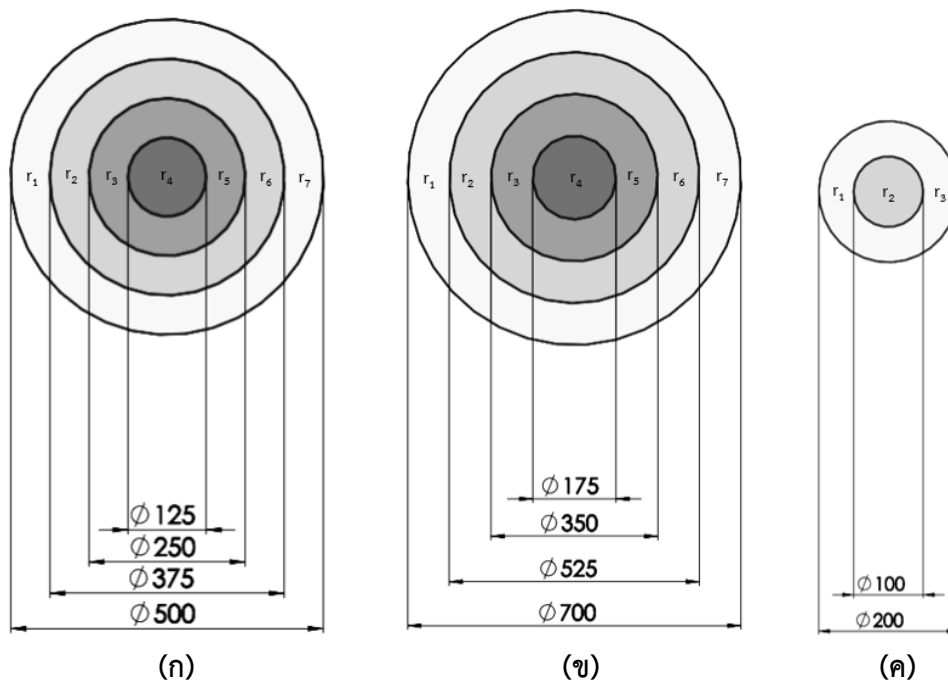
$$h_{z_3} = \frac{\sum_{i=1}^3 h_{(Z=3,r=i)} A_{(Z=3,r=i)}}{\sum_{i=1}^3 A_{(Z=3,r=i)}} \quad (\text{ค.4})$$

$$h_{z_4} = \frac{\sum_{i=1}^7 h_{(Z=4,r=i)} A_{(Z=4,r=i)}}{\sum_{i=1}^7 A_{(Z=4,r=i)}} \quad (\text{ค.5})$$

$$h_{z_5} = \frac{\sum_{i=1}^7 h_{(Z=5,r=i)} A_{(Z=5,r=i)}}{\sum_{i=1}^7 A_{(Z=5,r=i)}} \quad (\text{ค.6})$$

เมื่อ $h_{(Z=i,r=i)}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามแนวรัศมีที่ระดับความสูงต่าง ๆ
เหนือแผ่นกระจายอากาศ (W/m^2K)

$A_{(Z=i,r=i)}$ คือ พื้นที่หน้าตัดวงแหวนรอบจุดการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตาม
แนวรัศมีที่ระดับความสูงต่าง ๆ เหนือแผ่นกระจายอากาศ (m^2)



รูปที่ ค.1 แสดงพื้นที่หน้าตัดวงแหวนรอบจุดการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมี

(ก) ตำแหน่งความสูง $Z_1 = 0.46$ และ $Z_4 = 2.08$ m เหนือแผ่นกระจายอากาศ

(ข) ตำแหน่งความสูง $Z_2 = 0.95$ และ $Z_5 = 2.57$ m เหนือแผ่นกระจายอากาศ

(ค) ตำแหน่งความสูง $Z_3 = 1.47$ m เหนือแผ่นกระจายอากาศ

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดรอบจุดวงแหวนที่ตำแหน่งความสูง $Z_1 = 0.46$ m เหนือแผ่นกระจายอากาศ

$$A_{(Z=1,r=1)} = 0.25\pi(0.5^2 - 0.375^2) = 0.043 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=1,r=2)} = 0.25\pi(0.375^2 - 0.25^2) = 0.031 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=1,r=3)} = 0.25\pi(0.25^2 - 0.125^2) = 0.018 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=1,r=4)} = 0.25\pi(0.125^2) = 0.012 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=1,r=5)} = 0.25\pi(0.25^2 - 0.125^2) = 0.018 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=1,r=6)} = 0.25\pi(0.375^2 - 0.25^2) = 0.031 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=1,r=7)} = 0.25\pi(0.5^2 - 0.375^2) = 0.043 \text{ m}^2$$

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดรอบจุดวงแหวนที่ตำแหน่งความสูง $Z_2 = 0.95 \text{ m}$ เหนือแผ่นกระจายอากาศ

$$A_{(Z=2,r=1)} = 0.25\pi(0.7^2 - 0.525^2) = 0.084 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=2,r=2)} = 0.25\pi(0.525^2 - 0.35^2) = 0.060 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=2,r=3)} = 0.25\pi(0.35^2 - 0.175^2) = 0.036 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=2,r=4)} = 0.25\pi(0.175^2) = 0.024 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=2,r=5)} = 0.25\pi(0.35^2 - 0.175^2) = 0.036 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=2,r=6)} = 0.25\pi(0.525^2 - 0.35^2) = 0.060 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=2,r=7)} = 0.25\pi(0.7^2 - 0.525^2) = 0.084 \text{ m}^2$$

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดรอบจุดวงแหวนที่ตำแหน่งความสูง $Z_3 = 1.47 \text{ m}$ เหนือแผ่นกระจายอากาศ

$$A_{(Z=3,r=1)} = 0.25\pi(0.2^2 - 0.1^2) = 0.012 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=3,r=2)} = 0.25\pi(0.1^2) = 0.008 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=3,r=3)} = 0.25\pi(0.2^2 - 0.1^2) = 0.012 \text{ m}^2$$

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดรอบจุดวงแหวนที่ตำแหน่งความสูง $Z_4 = 2.08 \text{ m}$ เหนือแผ่นกระจายอากาศ

$$A_{(Z=4,r=1)} = 0.25\pi(0.5^2 - 0.375^2) = 0.043 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=4,r=2)} = 0.25\pi(0.375^2 - 0.25^2) = 0.031 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=4,r=3)} = 0.25\pi(0.25^2 - 0.125^2) = 0.018 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=4,r=4)} = 0.25\pi(0.125^2) = 0.012 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=4,r=5)} = 0.25\pi(0.25^2 - 0.125^2) = 0.018 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=4,r=6)} = 0.25\pi(0.375^2 - 0.25^2) = 0.031 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=4,r=7)} = 0.25\pi(0.5^2 - 0.375^2) = 0.043 \text{ m}^2$$

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดรอบจุดวงแหวนที่ตำแหน่งความสูง $Z_5 = 2.57 \text{ m}$ เหนือแผ่นกระจายอากาศ

$$A_{(Z=5,r=1)} = 0.25\pi(0.7^2 - 0.525^2) = 0.084 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=5,r=2)} = 0.25\pi(0.525^2 - 0.35^2) = 0.060 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=5,r=3)} = 0.25\pi(0.35^2 - 0.175^2) = 0.036 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=5,r=4)} = 0.25\pi(0.175^2) = 0.024 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=5,r=3)} = 0.25\pi(0.35^2 - 0.175^2) = 0.036 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=5,r=6)} = 0.25\pi(0.525^2 - 0.35^2) = 0.060 \text{ m}^2$$

$$A_{(Z=5,r=7)} = 0.25\pi(0.7^2 - 0.525^2) = 0.084 \text{ m}^2$$

ตารางที่ ค.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจากตำแหน่งการวัดตามแนวรัศมีที่ ความสูง $Z = 0.46, 0.95, 1.47, 2.08$ และ 2.57 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ที่ปริมาณอากาศ ส่วนเกิน $EA = 60\%$ และสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมเท่ากับ $S/T = 0$

Z_i	r_i	$h_{local} (W/m^2K)$	$A_{z_i,r_i} (m^2)$	$h_z (W/m^2K)$
1	1	226.77	0.043	221.10
	2	202.35	0.031	
	3	217.11	0.018	
	4	234.56	0.012	
	5	222.12	0.018	
	6	222.70	0.031	
	7	225.10	0.043	
2	1	215.97	0.084	209.74
	2	214.20	0.060	
	3	195.26	0.036	
	4	221.60	0.024	
	5	211.64	0.036	
	6	198.37	0.060	
	7	210.45	0.084	
3	1	255.74	0.012	250.31
	2	232.88	0.008	
	3	256.51	0.012	

ตารางที่ ค.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจากตำแหน่งการวัดตามแนวรัศมีที่ ความสูง $Z = 0.46, 0.95, 1.47, 2.08$ และ 2.57 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ ที่ปริมาณอากาศ ส่วนเกิน $EA = 60\%$ และสัดส่วนอากาศทุติยภูมิต่ออากาศรวมเท่ากับ $S/T = 0$ (ต่อ)

Z_i	r_i	$h_{local} (W/m^2K)$	$A_{z_i,r_i} (m^2)$	$h_z (W/m^2K)$
4	1	184.17	0.043	179.38
	2	172.26	0.031	
	3	163.15	0.018	
	4	180.82	0.012	
	5	177.49	0.018	
	6	187.01	0.031	
	7	181.58	0.043	
5	1	190.51	0.084	172.05
	2	172.65	0.060	
	3	165.77	0.036	
	4	174.45	0.024	
	5	169.76	0.036	
	6	153.69	0.060	
	7	169.27	0.084	

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง 0.46 m

$$h_{z_1} = \frac{226.77 \times 0.043 + 202.35 \times 0.031 + 217.11 \times 0.018 + 234.56 \times 0.012 + 222.12 \times 0.018 + 222.70 \times 0.031 + 225.10 \times 0.043}{0.043 + 0.031 + 0.018 + 0.012 + 0.018 + 0.031 + 0.043}$$

$$h_{z_1} = 221.10 \text{ W/m}^2\text{K}$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง 0.95 m

$$h_{z_2} = \frac{215.97 \times 0.084 + 214.20 \times 0.060 + 195.26 \times 0.036 + 221.60 \times 0.024 + 211.64 \times 0.036 + 198.37 \times 0.060 + 210.45 \times 0.084}{0.084 + 0.060 + 0.036 + 0.024 + 0.036 + 0.060 + 0.084}$$

$$h_{z_2} = 209.74 \text{ W/m}^2\text{K}$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง 1.47 m

$$h_{z_3} = \frac{255.74 \times 0.012 + 232.88 \times 0.008 + 256.51 \times 0.012}{0.012 + 0.008 + 0.012} = 250.31 \text{ W/m}^2\text{K}$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง 2.08 m

$$h_{z_4} = \frac{184.17 \times 0.043 + 172.26 \times 0.031 + 163.15 \times 0.018 + 180.82 \times 0.012 + 177.49 \times 0.018 + 187.01 \times 0.031 + 181.58 \times 0.043}{0.043 + 0.031 + 0.018 + 0.012 + 0.018 + 0.031 + 0.043}$$

$$h_{z_4} = 179.38 \text{ W/m}^2\text{K}$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง 2.57 m

$$h_{z_5} = \frac{190.51 \times 0.084 + 172.65 \times 0.060 + 165.77 \times 0.036 + 174.45 \times 0.024 + 169.76 \times 0.036 + 153.69 \times 0.060 + 169.27 \times 0.084}{0.084 + 0.060 + 0.036 + 0.024 + 0.036 + 0.060 + 0.084}$$

$$h_{z_5} = 172.05 \text{ W/m}^2\text{K}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม ($h_{overall}$)

แสดงการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ความสูง 0.46, 0.95, 1.47, 2.08 และ 2.57 m เหนือแผ่นกระจายอากาศ เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน $EA = 60\%$ และที่สัดส่วนอากาศทฤษฎีต่ออากาศรวม $S/T = 0$ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมนั้นจะเฉลี่ยโดยการถ่วงน้ำหนักโดยปริมาตรของเตาเผาจะแสดงในตารางที่ ค.3 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ค.7

$$h_{overall} = \frac{1}{V} \int_{Z_i}^{Z_{i+1}} h_{Z_i, avg} dV_{Z_i} \quad (\text{ค.7})$$

โดย ปริมาตรที่ตำแหน่ง $Z_1 = 0.46 \text{ m}$ เท่ากับ 0.123 m^3

ปริมาตรที่ตำแหน่ง $Z_2 = 0.95 \text{ m}$ เท่ากับ 0.192 m^3

ปริมาตรที่ตำแหน่ง $Z_4 = 2.08 \text{ m}$ เท่ากับ 0.123 m^3

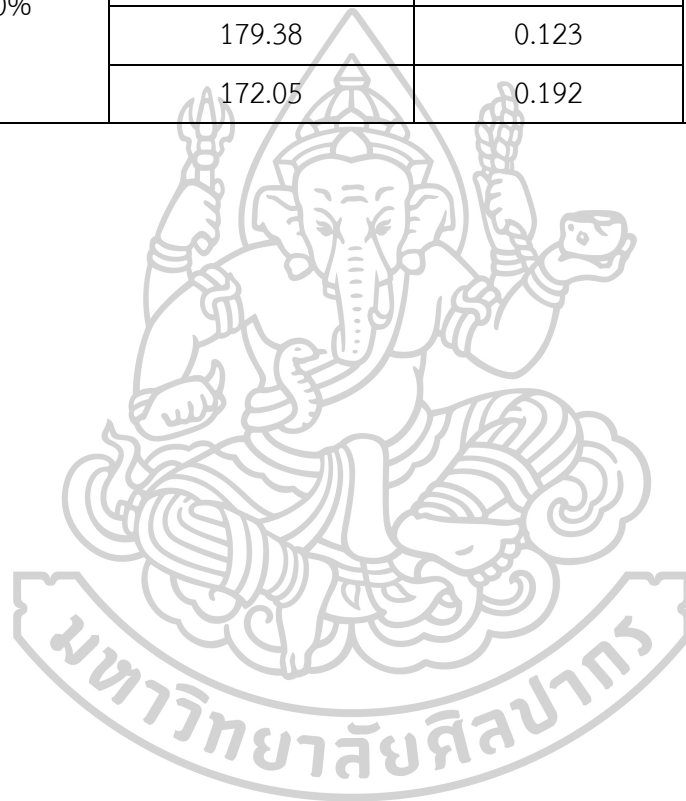
ปริมาตรที่ตำแหน่ง $Z_5 = 2.57 \text{ m}$ เท่ากับ 0.192 m^3

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมที่ $EA = 60\%$ และ $S/T = 0$

$$h_{overall} = \frac{221.10 \times 0.123 + 209.74 \times 0.192 + 179.38 \times 0.123 + 172.05 \times 0.192}{0.123 + 0.192 + 0.123 + 0.192} = 195.63 \text{ W/m}^2\text{K}$$

ตารางที่ ค.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมที่ $EA = 60\%$ และ $S/T = 0$

S/T = 0	h_{zi} (W/m ² K)	V_{zi} (m ³)	$h_{overall}$ (W/m ² K)
EA = 60%	221.10	0.123	195.63
	209.74	0.192	
	179.38	0.123	
	172.05	0.192	



ภาคผนวก ง
อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาที่สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ ง.1 อุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับการเผาไหม้แบบธรรมดาและการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น

Temperature (°C)						
S/T = 0	Z = 0.23 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 21%	858.7	865.2	945.3	849.6	850.6	842.4
EA = 39%	828.5	842.8	918.9	823.2	825.5	820.1
EA = 58%	788.9	800.2	866.3	794.5	794.4	769.5
EA = 79%	736.5	748.5	819.6	762.7	774.9	748.5
S/T = 0.1	Z = 0.46 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 41%	864.1	885.6	931.9	847.9	841.2	832.4
EA = 58%	815.7	835.2	917.4	827.9	822.6	794.3
EA = 78%	785.9	801.9	896.9	802.1	801.5	785.8
S/T = 0.3	Z = 0.46 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 43%	888.7	903.9	952.6	885.1	862.3	856.3
EA = 63%	839.6	854.3	936	846.9	839.1	828.6
EA = 77%	824.9	837.1	928.7	828.3	823.2	812.4
S/T = 0.5	Z = 0.46 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 42%	912.3	931.2	975	895.8	884.1	869.8
EA = 57%	862.3	886.1	958.5	862.7	850.5	842.6
EA = 81%	835.1	862.3	947.1	849.5	841.8	837

ตารางที่ ง.2 อุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลผสม

Temperature (°C)						
$EF_2 = 0$	Z = 0.23 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 39%	828.5	842.8	918.9	823.2	825.5	820.1
EA = 58%	788.9	800.2	866.3	794.5	794.4	769.5
EA = 79%	736.5	748.5	819.6	762.7	774.9	748.5
$EF_2 = 0.28$	Z = 0.23 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 38%	847.6	868.9	924.6	792.5	779.5	762.8
EA = 59%	821.1	834.3	872.5	775.3	762.5	711.5
EA = 81%	757.8	777.7	822.4	729	732.1	700
$EF_2 = 0.53$	Z = 0.23 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 41%	861.8	884.1	931.5	775.8	754.2	724.6
EA = 58%	841	843.4	880.5	746.9	732.6	685.4
EA = 78%	770.3	787	826.7	711.5	705.3	672
$EF_2 = 0.77$	Z = 0.23 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 39%	875.4	882.2	946.9	764.3	741.5	695.1
EA = 63%	832.4	851.4	889	729.1	702.8	669.5
EA = 82%	767.6	771.8	834.5	692.4	685.2	644.5
$EF_2 = 1$	Z = 0.23 m	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.85 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 42%	884.6	895.4	952.4	737.5	718.7	665.2
EA = 64%	842.3	860.4	892.4	700.5	681.2	639.1
EA = 79%	789.7	807.7	844.8	681.3	671.6	632.4

ภาคผนวก จ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีที่สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ จ.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี ที่ $S/T = 0$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี h_{local} (W/m^2K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 21%, S/T = 0	199.48	183.97	200.59	205.59	190.35	191.86	196.16
EA = 39%, S/T = 0	219.94	213.73	223.17	210.53	215.48	218.83	216.80
EA = 58%, S/T = 0	226.77	202.35	217.11	234.56	222.12	222.70	225.10
EA = 79%, S/T = 0	251.97	232.98	251.45	247.89	229.76	223.46	234.48
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 21%, S/T = 0	177.17	174.41	181.06	190.09	174.53	178.77	189.44
EA = 39%, S/T = 0	204.95	187.28	179.79	199.25	182.93	179.96	205.54
EA = 58%, S/T = 0	215.97	214.20	195.26	221.60	211.64	198.37	210.45
EA = 79%, S/T = 0	236.84	224.37	216.67	244.61	219.77	216.59	227.22
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 21%, S/T = 0	203.18		213.18		236.28		
EA = 39%, S/T = 0	246.90		222.16		250.92		
EA = 58%, S/T = 0	255.74		232.88		256.51		
EA = 79%, S/T = 0	278.53		273.27		277.57		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 21%, S/T = 0	147.34	138.29	124.24	132.61	118.33	127.02	147.61
EA = 39%, S/T = 0	162.93	156.00	157.41	143.79	152.86	135.94	153.10
EA = 58%, S/T = 0	184.17	172.26	163.15	180.82	177.49	187.01	181.58
EA = 79%, S/T = 0	221.21	216.62	188.76	206.11	178.45	188.90	225.29
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 21%, S/T = 0	128.76	125.67	138.04	131.50	124.47	120.40	123.46
EA = 39%, S/T = 0	159.95	137.51	144.98	146.26	137.38	127.10	144.40
EA = 58%, S/T = 0	190.51	172.65	165.77	174.45	169.76	153.69	169.27
EA = 79%, S/T = 0	216.21	174.97	189.32	171.16	172.27	184.38	210.39

ตารางที่ จ.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี ที่ $S/T = 0.1$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี h_{local} (W/m ² K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 41%, S/T = 0.1	206.17	198.66	209.98	214.05	201.02	195.70	192.17
EA = 58%, S/T = 0.1	219.02	208.26	210.16	216.35	204.07	192.45	213.49
EA = 78%, S/T = 0.1	242.76	235.46	230.17	253.06	227.79	200.45	218.02
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 41%, S/T = 0.1	194.18	174.89	180.36	178.59	164.06	177.06	192.31
EA = 58%, S/T = 0.1	208.73	195.46	185.63	201.68	184.78	196.29	200.18
EA = 78%, S/T = 0.1	245.77	205.70	226.52	231.37	233.78	198.32	175.34
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 41%, S/T = 0.1	239.12		208.62		251.63		
EA = 58%, S/T = 0.1	252.79		230.73		247.86		
EA = 78%, S/T = 0.1	265.07		256.28		266.29		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 41%, S/T = 0.1	151.66	133.17	151.74	155.36	146.61	143.56	153.47
EA = 58%, S/T = 0.1	180.52	167.91	163.57	164.97	176.65	160.15	182.97
EA = 78%, S/T = 0.1	202.61	197.24	191.30	182.68	195.84	191.09	213.55
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 41%, S/T = 0.1	143.38	138.69	131.71	141.64	131.17	95.64	155.96
EA = 58%, S/T = 0.1	178.95	164.58	162.71	164.94	154.19	149.66	165.27
EA = 78%, S/T = 0.1	176.58	177.29	172.59	183.95	184.23	170.68	180.82

ตารางที่ จ.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนรัศมี ที่ $S/T = 0.3$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนรัศมี h_{local} (W/m^2K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 43%, S/T = 0.3	191.88	173.38	191.94	194.50	181.70	209.14	197.48
EA = 63%, S/T = 0.3	211.38	206.78	196.64	206.86	205.17	184.01	202.99
EA = 77%, S/T = 0.3	236.08	210.60	228.76	236.29	220.31	229.65	224.75
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 43%, S/T = 0.3	179.40	161.25	161.37	168.61	178.94	170.90	189.16
EA = 63%, S/T = 0.3	194.49	188.49	192.28	194.38	186.39	190.40	196.65
EA = 77%, S/T = 0.3	225.56	219.51	196.93	208.71	216.50	222.31	209.63
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 43%, S/T = 0.3	238.63		204.55		238.19		
EA = 63%, S/T = 0.3	243.43		222.10		242.90		
EA = 77%, S/T = 0.3	243.85		244.08		253.61		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 43%, S/T = 0.3	149.52	135.69	144.96	137.91	148.79	124.94	137.20
EA = 63%, S/T = 0.3	169.81	153.07	160.57	162.48	156.76	159.94	170.89
EA = 77%, S/T = 0.3	185.96	168.65	185.20	178.82	181.96	176.96	195.05
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 43%, S/T = 0.3	134.42	141.15	124.57	127.07	119.28	119.37	120.36
EA = 63%, S/T = 0.3	153.00	148.93	153.12	156.23	142.63	139.49	152.65
EA = 77%, S/T = 0.3	195.35	163.19	152.83	123.93	136.02	160.24	174.04

ตารางที่ จ.4 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนรัศมี ที่ $S/T = 0.5$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนรัศมี h_{local} (W/m^2K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 42%, S/T = 0.5	178.22	176.33	167.15	182.00	180.37	168.59	195.06
EA = 57%, S/T = 0.5	190.00	177.84	191.44	208.67	194.48	184.01	196.65
EA = 81%, S/T = 0.5	225.60	230.50	204.38	218.36	196.67	213.31	214.46
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 42%, S/T = 0.5	177.98	162.32	149.86	150.85	155.98	163.21	166.54
EA = 57%, S/T = 0.5	185.06	161.76	179.48	182.74	184.20	171.13	193.45
EA = 81%, S/T = 0.5	223.28	193.19	205.68	214.11	205.25	204.85	215.94
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 42%, S/T = 0.5	223.53		201.68		236.79		
EA = 57%, S/T = 0.5	234.75		189.47		236.15		
EA = 81%, S/T = 0.5	234.49		223.44		265.27		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 42%, S/T = 0.5	139.08	116.27	121.25	121.04	125.75	114.36	136.62
EA = 57%, S/T = 0.5	162.55	157.31	131.27	158.79	151.50	145.49	162.23
EA = 81%, S/T = 0.5	174.59	169.86	140.81	176.40	163.52	144.34	189.40
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 42%, S/T = 0.5	122.60	100.92	115.94	124.63	91.15	107.09	108.34
EA = 57%, S/T = 0.5	148.07	135.95	148.64	134.82	143.70	135.35	144.79
EA = 81%, S/T = 0.5	165.21	147.03	130.05	151.49	138.39	141.01	170.52

ตารางที่ จ.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนรัศมี ที่ $EF_2 = 0$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนรัศมี h_{local} (W/m ² K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 39%, $EF_2 = 0$	219.94	213.73	223.17	210.53	215.48	218.83	216.80
EA = 58%, $EF_2 = 0$	226.77	202.35	217.11	234.56	222.12	222.70	225.10
EA = 79%, $EF_2 = 0$	251.97	232.98	251.45	247.89	229.76	223.46	234.48
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 39%, $EF_2 = 0$	204.95	187.28	179.79	199.25	182.93	179.96	205.54
EA = 58%, $EF_2 = 0$	215.97	214.20	195.26	221.60	211.64	198.37	210.45
EA = 79%, $EF_2 = 0$	236.84	224.37	216.67	244.61	219.77	216.59	227.22
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 39%, $EF_2 = 0$	246.90		222.16		250.92		
EA = 58%, $EF_2 = 0$	255.74		232.88		256.51		
EA = 79%, $EF_2 = 0$	278.53		273.27		277.57		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 39%, $EF_2 = 0$	162.93	156.00	157.41	143.79	152.86	135.94	153.10
EA = 58%, $EF_2 = 0$	184.17	172.26	163.15	180.82	177.49	187.01	181.58
EA = 79%, $EF_2 = 0$	221.21	216.62	188.76	206.11	178.45	188.90	225.29
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 39%, $EF_2 = 0$	159.95	137.51	144.98	146.26	137.38	127.10	144.40
EA = 58%, $EF_2 = 0$	190.51	172.65	165.77	174.45	169.76	153.69	169.27
EA = 79%, $EF_2 = 0$	216.21	174.97	189.32	171.16	172.27	184.38	210.39

ตารางที่ จ.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนอนที่ $EF_2 = 0.28$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนอน h_{local} (W/m ² K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 38%, $EF_2 = 0.28$	216.23	234.03	226.03	255.05	236.48	219.78	188.90
EA = 59%, $EF_2 = 0.28$	218.15	197.93	228.67	238.27	233.26	253.04	276.04
EA = 81%, $EF_2 = 0.28$	237.78	215.51	288.63	279.75	252.85	234.88	246.42
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 38%, $EF_2 = 0.28$	202.95	199.50	215.26	227.01	204.57	204.23	181.40
EA = 59%, $EF_2 = 0.28$	190.76	205.03	247.75	224.40	204.81	245.86	237.60
EA = 81%, $EF_2 = 0.28$	231.15	222.56	232.44	264.87	235.81	234.00	216.58
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 38%, $EF_2 = 0.28$	235.14		239.17		209.29		
EA = 59%, $EF_2 = 0.28$	246.14		225.44		250.05		
EA = 81%, $EF_2 = 0.28$	284.85		255.42		271.83		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 38%, $EF_2 = 0.28$	124.72	110.61	145.76	127.31	174.27	169.68	148.58
EA = 59%, $EF_2 = 0.28$	146.17	160.07	155.15	151.77	177.68	164.68	171.84
EA = 81%, $EF_2 = 0.28$	186.76	167.26	186.18	170.36	149.95	163.33	186.67
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 38%, $EF_2 = 0.28$	132.24	122.13	132.39	124.61	124.30	114.48	141.88
EA = 59%, $EF_2 = 0.28$	147.02	131.32	143.95	142.74	146.56	156.67	129.11
EA = 81%, $EF_2 = 0.28$	164.93	137.62	136.48	146.98	134.94	143.77	160.32

ตารางที่ จ.7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนอนที่ $EF_2 = 0.53$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนอน h_{local} (W/m ² K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 41%, $EF_2 = 0.53$	212.75	238.15	256.96	238.41	250.31	228.57	222.89
EA = 58%, $EF_2 = 0.53$	258.61	274.87	233.41	241.09	276.91	263.86	171.41
EA = 78%, $EF_2 = 0.53$	264.89	247.70	255.63	267.27	235.73	248.21	251.08
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 41%, $EF_2 = 0.53$	198.27	210.82	234.65	218.29	188.53	220.25	250.90
EA = 58%, $EF_2 = 0.53$	260.91	205.82	243.66	244.76	147.68	244.02	258.77
EA = 78%, $EF_2 = 0.53$	266.86	225.98	261.03	253.71	225.97	222.82	231.89
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 41%, $EF_2 = 0.53$	215.67		237.93		223.32		
EA = 58%, $EF_2 = 0.53$	242.55		210.17		247.32		
EA = 78%, $EF_2 = 0.53$	277.68		241.40		260.52		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 41%, $EF_2 = 0.53$	154.13	138.89	124.09	142.11	136.93	133.45	143.01
EA = 58%, $EF_2 = 0.53$	177.65	144.21	138.35	154.92	154.11	134.36	145.11
EA = 78%, $EF_2 = 0.53$	169.84	152.49	154.71	163.78	136.87	139.96	155.14
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 41%, $EF_2 = 0.53$	127.23	105.40	116.06	127.93	129.60	116.06	121.45
EA = 58%, $EF_2 = 0.53$	134.27	119.01	131.71	139.39	151.50	129.16	132.41
EA = 78%, $EF_2 = 0.53$	140.13	121.78	140.56	153.92	132.77	137.33	162.54

ตารางที่ จ.8 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนอนที่ $EF_2 = 0.77$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนอน h_{local} (W/m ² K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 39%, $EF_2 = 0.77$	237.81	201.62	227.16	253.85	272.24	264.63	220.65
EA = 63%, $EF_2 = 0.77$	248.82	250.04	267.34	233.95	253.72	224.12	253.60
EA = 82%, $EF_2 = 0.77$	295.21	257.59	253.06	275.44	250.94	249.63	240.98
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 39%, $EF_2 = 0.77$	227.08	237.10	250.27	211.37	230.23	216.57	214.89
EA = 63%, $EF_2 = 0.77$	266.91	230.82	251.06	256.24	181.59	203.25	244.32
EA = 82%, $EF_2 = 0.77$	233.17	212.25	254.93	229.07	241.94	247.76	277.85
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 39%, $EF_2 = 0.77$	215.62		209.90		233.54		
EA = 63%, $EF_2 = 0.77$	237.16		223.94		216.42		
EA = 82%, $EF_2 = 0.77$	244.21		269.98		244.31		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 39%, $EF_2 = 0.77$	127.90	132.82	126.65	126.65	111.75	96.51	109.34
EA = 63%, $EF_2 = 0.77$	137.01	115.32	118.41	124.68	140.70	121.86	139.98
EA = 82%, $EF_2 = 0.77$	146.46	129.53	130.66	140.96	140.47	124.96	118.40
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 39%, $EF_2 = 0.77$	97.65	104.42	114.55	106.76	98.20	100.28	120.73
EA = 63%, $EF_2 = 0.77$	135.58	131.88	114.61	132.30	120.71	118.48	102.57
EA = 82%, $EF_2 = 0.77$	128.69	144.93	145.16	126.97	115.39	115.23	124.70

ตารางที่ จ.9 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนรัศมี ที่ $EF_2 = 1$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวนรัศมี h_{local} (W/m ² K)							
$Z_1 = 0.46$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 42%, $EF_2 = 1$	259.36	246.05	269.81	254.32	231.24	235.53	251.72
EA = 64%, $EF_2 = 1$	266.52	234.88	228.68	272.63	295.57	262.02	262.58
EA = 79%, $EF_2 = 1$	256.54	278.58	267.75	295.95	290.68	263.72	268.77
$Z_2 = 0.95$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 42%, $EF_2 = 1$	245.86	217.77	236.58	240.76	256.65	218.78	235.73
EA = 64%, $EF_2 = 1$	244.45	268.45	231.57	243.19	256.19	237.69	250.75
EA = 79%, $EF_2 = 1$	274.96	236.46	235.80	259.52	238.78	259.43	266.16
$Z_3 = 1.47$ m	r_1		r_2		r_3		
EA = 42%, $EF_2 = 1$	209.33		188.27		221.22		
EA = 64%, $EF_2 = 1$	235.07		195.37		216.96		
EA = 79%, $EF_2 = 1$	240.03		245.29		236.73		
$Z_4 = 2.08$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 42%, $EF_2 = 1$	113.89	97.58	113.72	114.76	110.07	117.76	107.43
EA = 64%, $EF_2 = 1$	123.82	131.10	115.71	123.05	126.42	110.56	97.09
EA = 79%, $EF_2 = 1$	132.60	118.09	111.38	125.65	121.31	131.68	140.11
$Z_5 = 2.57$ m	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7
EA = 42%, $EF_2 = 1$	85.92	104.27	89.40	77.48	82.08	80.76	101.29
EA = 64%, $EF_2 = 1$	105.43	110.82	122.05	98.74	103.05	119.87	115.57
EA = 79%, $EF_2 = 1$	119.07	110.84	119.53	104.84	122.37	112.09	123.75

ภาคผนวก ฉ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงที่สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ ฉ.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ สำหรับการเผาไหม้แบบธรรมชาติและการเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง h_z (W/m^2K)					
S/T = 0	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.47 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 21%	194.77	180.60	218.09	137.00	126.45
EA = 39%	217.40	193.63	242.22	152.82	143.53
EA = 58%	221.10	209.74	250.31	179.38	172.05
EA = 79%	238.34	226.62	276.86	208.34	194.07
S/T = 0.1	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.47 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 41%	200.66	182.99	236.19	139.60	127.24
EA = 58%	209.58	197.99	245.43	172.98	164.42
EA = 78%	227.66	212.86	263.33	199.42	177.50
S/T = 0.3	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.47 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 43%	192.12	174.96	229.94	139.60	127.24
EA = 63%	202.30	192.41	237.90	163.34	149.42
EA = 77%	226.46	216.04	247.57	182.94	166.17
S/T = 0.5	Z = 0.46 m	Z = 0.95 m	Z = 1.47 m	Z = 2.08 m	Z = 2.57 m
EA = 42%	179.50	164.33	223.04	127.07	110.23
EA = 57%	190.34	180.33	223.95	154.79	142.28
EA = 81%	216.85	210.18	243.27	168.27	153.08

ตารางที่ ๑.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ สำหรับการเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลผสม

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง h_z (W/m^2K)					
$EF_2 = 0$	$Z = 0.46$ m	$Z = 0.95$ m	$Z = 1.47$ m	$Z = 2.08$ m	$Z = 2.57$ m
EA = 39%	217.40	193.63	242.22	152.82	143.53
EA = 58%	221.10	209.74	250.31	179.38	172.05
EA = 79%	238.34	226.62	276.86	208.34	194.07
$EF_2 = 0.28$	$Z = 0.46$ m	$Z = 0.95$ m	$Z = 1.47$ m	$Z = 2.08$ m	$Z = 2.57$ m
EA = 38%	218.83	200.71	226.45	141.54	128.79
EA = 59%	236.77	220.61	242.43	160.99	141.56
EA = 81%	244.54	229.73	272.61	175.50	149.75
$EF_2 = 0.53$	$Z = 0.46$ m	$Z = 0.95$ m	$Z = 1.47$ m	$Z = 2.08$ m	$Z = 2.57$ m
EA = 41%	230.68	218.93	224.10	140.91	120.03
EA = 58%	241.15	235.95	236.24	151.23	132.37
EA = 78%	253.12	240.74	262.18	154.36	141.94
$EF_2 = 0.77$	$Z = 0.46$ m	$Z = 0.95$ m	$Z = 1.47$ m	$Z = 2.08$ m	$Z = 2.57$ m
EA = 39%	235.83	225.82	220.91	117.99	106.37
EA = 63%	247.46	236.23	226.08	129.74	121.54
EA = 82%	261.01	244.56	250.69	131.93	128.44
$EF_2 = 1$	$Z = 0.46$ m	$Z = 0.95$ m	$Z = 1.47$ m	$Z = 2.08$ m	$Z = 2.57$ m
EA = 42%	249.91	234.85	208.52	110.21	90.78
EA = 64%	259.57	248.34	218.36	116.48	111.66
EA = 79%	270.50	256.57	240.11	128.35	117.18

ภาคผนวก ข

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมที่สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมเมื่อเผาไหม้แบบธรรมดา

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม h_{overall} (W/m ² K)				
S/T = 0	EA = 21%	EA = 39%	EA = 58%	EA = 79%
		159.51	176.34	195.63

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมเมื่อเผาไหม้โดยใช้อากาศเป็นชั้น

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม h_{overall} (W/m ² K)			
S/T = 0.1	EA = 41%	EA = 58%	EA = 78%
	162.44	186.31	203.52
S/T = 0.3	EA = 43%	EA = 63%	EA = 77%
	158.28	176.77	197.40
S/T = 0.5	EA = 42%	EA = 57%	EA = 81%
	145.07	166.83	187.01

ตารางที่ ข.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวมเมื่อเผาไหม้โดยใช้ชีวมวลผสม

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยรวม h_{overall} (W/m ² K)			
EF ₂ = 0	EA = 39%	EA = 58%	EA = 79%
	170.30	183.81	192.71
EF ₂ = 0.28	EA = 38%	EA = 59%	EA = 81%
	171.85	189.08	199.10
EF ₂ = 0.53	EA = 41%	EA = 58%	EA = 78%
	176.78	189.78	197.46
EF ₂ = 0.77	EA = 39%	EA = 63%	EA = 82%
	171.30	183.52	191.56
EF ₂ = 1	EA = 42%	EA = 64%	EA = 79%
	170.30	183.81	192.71

ภาคผนวก ข
ค่าความคลาดเคลื่อนของสมการ Nu

ตารางที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ $Nu_{experimental}$ กับ $Nu_{predict}$ (บริเวณ Dense zone)

Condition	Dense zone		
	$Nu_{experimental}$	$Nu_{predict}$	%Error
EA = 20%, S/T = 0, Z = 1	1.33	1.32	0.72
EA = 40%, S/T = 0, Z = 1	1.50	1.46	2.91
EA = 60%, S/T = 0, Z = 1	1.56	1.61	3.03
EA = 80%, S/T = 0, Z = 1	1.75	1.71	2.26
EA = 40%, S/T = 0.1, Z = 1	1.35	1.37	1.06
EA = 60%, S/T = 0.1, Z = 1	1.45	1.51	4.04
EA = 80%, S/T = 0.1, Z = 1	1.61	1.64	2.03
EA = 40%, S/T = 0.3, Z = 1	1.28	1.31	1.97
EA = 60%, S/T = 0.3, Z = 1	1.39	1.44	3.84
EA = 80%, S/T = 0.3, Z = 1	1.57	1.55	1.46
EA = 40%, S/T = 0.5, Z = 1	1.18	1.20	1.48
EA = 60%, S/T = 0.5, Z = 1	1.28	1.30	1.56
EA = 80%, S/T = 0.5, Z = 1	1.48	1.40	5.30
EA = 40%, EF2 = 0.28, Z = 1	1.49	1.48	0.85
EA = 60%, EF2 = 0.28, Z = 1	1.64	1.63	0.66
EA = 80%, EF2 = 0.28, Z = 1	1.76	1.75	0.51
EA = 40%, EF2 = 0.53, Z = 1	1.56	1.54	1.33
EA = 60%, EF2 = 0.53, Z = 1	1.63	1.66	1.38
EA = 80%, EF2 = 0.53, Z = 1	1.74	1.78	1.95
EA = 40%, EF2 = 0.77, Z = 1	1.56	1.52	2.42
EA = 60%, EF2 = 0.77, Z = 1	1.66	1.68	1.38
EA = 80%, EF2 = 0.77, Z = 1	1.83	1.80	1.19
EA = 40%, EF2 = 1, Z = 1	1.58	1.54	2.79
EA = 60%, EF2 = 1, Z = 1	1.69	1.70	0.53
EA = 80%, EF2 = 1, Z = 1	1.84	1.83	0.27
%MRD			1.88

ตารางที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ $Nu_{experimental}$ กับ $Nu_{predict}$ (บริเวณ Splash zone)

Condition	Splash zone		
	$Nu_{experimental}$	$Nu_{predict}$	%Error
EA = 20%, S/T = 0, Z = 1	1.18	1.15	2.58
EA = 40%, S/T = 0, Z = 1	1.28	1.32	2.59
EA = 60%, S/T = 0, Z = 1	1.43	1.45	1.23
EA = 80%, S/T = 0, Z = 1	1.58	1.57	0.71
EA = 40%, S/T = 0.1, Z = 1	1.20	1.27	5.39
EA = 60%, S/T = 0.1, Z = 1	1.31	1.43	9.18
EA = 80%, S/T = 0.1, Z = 1	1.43	1.59	11.51
EA = 40%, S/T = 0.3, Z = 1	1.14	1.16	1.91
EA = 60%, S/T = 0.3, Z = 1	1.26	1.31	3.61
EA = 80%, S/T = 0.3, Z = 1	1.42	1.46	2.77
EA = 40%, S/T = 0.5, Z = 1	1.06	1.02	3.14
EA = 60%, S/T = 0.5, Z = 1	1.17	1.16	1.01
EA = 80%, S/T = 0.5, Z = 1	1.37	1.29	5.89
EA = 40%, EF2 = 0.28, Z = 1	1.33	1.35	1.85
EA = 60%, EF2 = 0.28, Z = 1	1.50	1.49	0.82
EA = 80%, EF2 = 0.28, Z = 1	1.60	1.61	0.45
EA = 40%, EF2 = 0.53, Z = 1	1.44	1.38	3.96
EA = 60%, EF2 = 0.53, Z = 1	1.60	1.53	4.39
EA = 80%, EF2 = 0.53, Z = 1	1.67	1.66	0.85
EA = 40%, EF2 = 0.77, Z = 1	1.48	1.44	2.35
EA = 60%, EF2 = 0.77, Z = 1	1.59	1.57	1.61
EA = 80%, EF2 = 0.77, Z = 1	1.69	1.70	0.65
EA = 40%, EF2 = 1, Z = 1	1.53	1.47	3.74
EA = 60%, EF2 = 1, Z = 1	1.67	1.60	4.39
EA = 80%, EF2 = 1, Z = 1	1.77	1.73	2.23
%MRD			3.15

ตารางที่ ๓.3 แสดงความสัมพันธ์ Nu (บริเวณ Freeboard zone ที่ $EF_2 = 0$)

Condition	Freeboard zone ($EF_2 = 0$)		
	$Nu_{\text{experimental}}$	Nu_{predict}	%Error
EA = 40%, $EF_2 = 0.28$, $Z = 1$	0.96	0.98	1.78
EA = 60%, $EF_2 = 0.28$, $Z = 1$	1.10	1.15	3.87
EA = 80%, $EF_2 = 0.28$, $Z = 1$	1.22	1.24	1.84
EA = 40%, $EF_2 = 0.53$, $Z = 1$	0.98	0.92	6.54
EA = 60%, $EF_2 = 0.53$, $Z = 1$	1.09	1.02	6.37
EA = 80%, $EF_2 = 0.53$, $Z = 1$	1.15	1.09	5.10
EA = 40%, $EF_2 = 0.77$, $Z = 1$	0.85	0.86	0.55
EA = 60%, $EF_2 = 0.77$, $Z = 1$	0.97	0.97	0.23
EA = 80%, $EF_2 = 0.77$, $Z = 1$	1.02	1.01	0.83
EA = 40%, $EF_2 = 1$, $Z = 1$	0.78	0.86	10.15
EA = 60%, $EF_2 = 1$, $Z = 1$	0.90	0.94	4.53
EA = 80%, $EF_2 = 1$, $Z = 1$	0.96	0.95	0.96
%MRD			3.56

ตารางที่ ๓.4 แสดงความสัมพันธ์ Nu (บริเวณ Freeboard zone ที่ $0 < EF_2 \leq 1$)

Condition	Freeboard zone ($EF_2 > 0$)		
	$Nu_{\text{experimental}}$	Nu_{predict}	%Error
EA = 20%, $S/T = 0$, $Z = 1$	0.90	0.87	3.00
EA = 40%, $S/T = 0$, $Z = 1$	1.03	1.04	1.46
EA = 60%, $S/T = 0$, $Z = 1$	1.25	1.33	5.88
EA = 80%, $S/T = 0$, $Z = 1$	1.45	1.42	1.88
EA = 40%, $S/T = 0.1$, $Z = 1$	0.91	0.95	3.51
EA = 60%, $S/T = 0.1$, $Z = 1$	1.18	1.18	0.14
EA = 80%, $S/T = 0.1$, $Z = 1$	1.32	1.29	2.02
EA = 40%, $S/T = 0.3$, $Z = 1$	0.90	0.86	4.30
EA = 60%, $S/T = 0.3$, $Z = 1$	1.07	1.05	2.46
EA = 80%, $S/T = 0.3$, $Z = 1$	1.21	1.18	2.30
EA = 40%, $S/T = 0.5$, $Z = 1$	0.79	0.83	4.33
EA = 60%, $S/T = 0.5$, $Z = 1$	1.01	1.04	2.58
EA = 80%, $S/T = 0.5$, $Z = 1$	1.10	1.09	0.51
%MRD			2.64

รายการอ้างอิง

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. *โครงการโรงไฟฟ้าชุมชนเพื่อเศรษฐกิจฐานราก*. 2563; Available from: <https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/%E0%.pdf>.
2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. *แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580 (AEDP2018)*. 2561; Available from: https://www.dede.go.th/download/Plan_62/20201021_TIEB_AEDP2018.pdf.
3. Zhu, S., Q. Lyu, and J. Zhu, *Experimental investigation of NO_x emissions during pulverized char combustion in oxygen-enriched air preheated with a circulating fluidized bed*. Journal of the Energy Institute, 2019. 92(5): p. 1388-1398.
4. Ninduangdee, P. and V.I. Kuprianov, *Fluidized bed co-combustion of rice husk pellets and moisturized rice husk: The effects of co-combustion methods on gaseous emissions*. Biomass and Bioenergy, 2018. 112: p. 73-84.
5. Sirisomboon, K. and P. Charernporn, *Effects of air staging on emission characteristics in a conical fluidized-bed combustor firing with sunflower shells*. Journal of the Energy Institute, 2017. 90(2): p. 316-323.
6. Kunii, D. and O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*, ed. 2. 1991, Boston Butterworth.
7. พงษ์ศักดิ์ เหลลาทอง, *การศึกษาระบบที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไชน์เบดชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแนวด*. 2561, มหาวิทยาลัยศิลปากร: สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม.
8. Kaewklum, R., V.I. Kuprianov, and P.L. Douglas, *Hydrodynamics of air-sand flow in a conical swirling fluidized bed: A comparative study between tangential and axial air entries*. Energy Conversion and Management, 2009. 50(12): p. 2999-3006.
9. Geldart, D. and A.R. Abrahamsen, *Homogeneous Fluidization of Fine Powders using various gases and pressures*. Powder Technology, 1978. 19: p. 133-136.
10. Stefanova, A., H.T. Bi, J.C. Lim, and J.R. Grace, *Local hydrodynamics and heat*

- transfer in fluidized beds of different diameter. Powder Technology, 2011. 212(1): p. 57-63.*
11. Di Natale, F., A. Lancia, and R. Nigro, *A single particle model for surface-to-bed heat transfer in fluidized beds. Powder Technology, 2008. 187(1): p. 68-78.*
 12. Flamant, G., N. Fatah, and Y. Flitris, *Wall-to-bed heat transfer in gas-solid fluidized beds: prediction of heat transfer regimes. Powder Technology, 1992. 69: p. 223-230.*
 13. Denloye, A.O.O. and J.S.M. Botterill, *Bed to Surface Heat Transfer in a Fluidized Bed of Large Particles Powder Technology, 1978. 19: p. 197-203.*
 14. Kim, S.W., Y.A. Jung, D.K. Sang, and H.L. Dong, *Heat transfer and bubble characteristics in a fluidized bed with immersed horizontal tube bundle. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. 46: p. 399-409.*
 15. Kim, S.W. and S.D. Kim, *Heat transfer characteristics in a pressurized fluidized bed of fine particles with immersed horizontal tube bundle. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013. 64: p. 269-277.*
 16. Tawfik, M.H.M., M. Refaat Diab, and H. Mohamed Abdelmotalib, *An experimental investigation of wall-bed heat transfer and flow characteristics in a swirling fluidized bed reactor. Applied Thermal Engineering, 2019. 155: p. 501-507.*
 17. Lu, P., Y. Cao, W.P. Pan, and C. Ma, *Heat transfer characteristics in a horizontal swirling fluidized bed. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011. 35(6): p. 1127-1134.*
 18. Sirisomboon, K. and P. Laowthong, *Experimental investigation and prediction of heat transfer in a swirling fluidized-bed combustor. Applied Thermal Engineering, 2019. 147: p. 718-727.*
 19. Tawfik, M.H.M., M.R. Diab, and H.M. Abdelmotalib, *Heat transfer and hydrodynamics of particles mixture in swirling fluidized bed. International Journal of Thermal Sciences, 2020. 147.*
 20. Mohideen, M.F., B. Sreenivasan, S.A. Sulaiman, and V.R. Raghavan, *Heat transfer in a swirling fluidized bed with geldart type-D particles. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012. 29(7): p. 862-867.*
 21. Pisters, K. and A. Prakash, *Investigations of axial and radial variations of heat*

- transfer coefficient in bubbling fluidized bed with fast response probe. Powder Technology, 2011. 207(1-3): p. 224-231.*
22. Yaman, O., G. Kulah, and M. Koksak, *Surface-to-bed heat transfer for high-density particles in conical spouted and spout-fluid beds. Particuology, 2019. 42: p. 35-47.*
 23. Jia, D., X. Bi, J. C. Lim, S. Sokhansanj, and A. Tsutsumi, *Heat transfer in a tapered fluidized bed of biomass particles with pulsed gas flow. Particuology, 2019. 42: p. 2-14.*
 24. Huang, Y., Z. Bao, L. Duan, and Y. Duan, *Bed-to-tube heat transfer characteristics with an immersed horizontal tube in the pressurized fluidized bed at high temperature. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021. 124.*
 25. Eder, C., G. Hofer, and T. Pröll, *Wall-to-Bed Heat Transfer in Bubbling Fluidized Bed Reactors with an Immersed Heat Exchanger and Continuous Particle Exchange. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021. 60(19): p. 7417-7428.*
 26. Masoumifard, N., N. Mostoufi, A. A. Hamidi, and R. Sotudeh-Gharebagh, *Investigation of heat transfer between a horizontal tube and gas-solid fluidized bed. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008. 29(5): p. 1504-1511.*
 27. Sjösten, J., M.R. Golriz, and J.R. Grace, *Further study on the influence of particle coating on fluidized bed heat transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. 49(21-22): p. 3800-3806.*
 28. Taofeeq, H. and M. Al-Dahhan, *Investigation of the effect of vertical immersed tube diameter on heat transfer in a gas-solid fluidized bed. International Journal of Thermal Sciences, 2019. 135: p. 546-558.*
 29. Unchaisri, T. and S. Fukuda, *Co-firing of coal and rice straw pellet in a circulating fluidized-bed reactor. Energy Procedia, 2017. 138: p. 766-771.*
 30. ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์, เจษฎา แก้วกำกัฒ, สรวุฒิ สังวรกาญจน์, และธรรณิทย เมธิยานนท์, *การเผาไหม้ถ่านหินร่วมกับไม้ยางพาราสับและไม้ยางพาราอัดเม็ดในเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33. 2562, จังหวัดอุดรธานี.*

31. ณัฐชัย คำมัน, การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเตาฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวนภายในไซโคลนแฝด. 2558, มหาวิทยาลัยศิลปากร: สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม.
32. Gnanasundaram, N., M. Loganathan, and K. Perumal, *Solid holdup in liquid solid circulating fluidized bed with viscous liquid medium*. Alexandria Engineering Journal, 2014. 53(4): p. 959-968.
33. Sirisomboon, K. and V.I. Kuprianov, *Effects of Fuel Staging on the NO Emission Reduction during Biomass–Biomass Co-combustion in a Fluidized-Bed Combustor*. Energy Fuels, 2017. 31(1): p. 659-671.
34. สมชาติ ฉันทศิริวรรณ, *วิศวกรรมโรงไฟฟ้า (Power Plant Engineering)*. 2563.
35. กษมา ศิริสมบุรณ์, *วิศวกรรมโรงจักรต้นกำลัง (Power Plant Engineering)*. 2560: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐวัฒน์ โสภามาตร
วัน เดือน ปี เกิด	24 มกราคม 1997
สถานที่เกิด	จังหวัดอุดรธานี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	96/5 ม.7 ต.บ้านแลง อ.เมือง จ.ระยอง 21000

