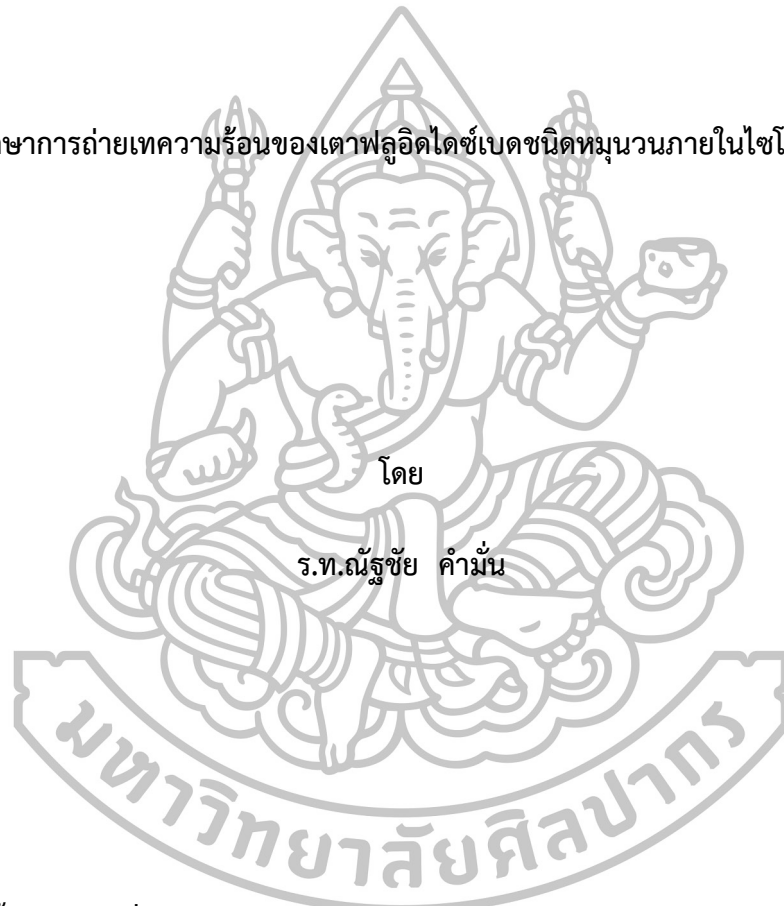




การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเตาฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนวนภายในไซโคลนแฝด



โดย

ร.ท.ณัฐชัย คำมัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเตาฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนวนภายในไซโคลนแฝด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN A TWIN CYCLONICS SWIRLING FLUIDIZED BED
COMBUSTOR



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Engineering Program in Energy Engineering

Department of

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2016

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเตาฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนวนภายในไซโคลนแฝด ” เสนอโดย ร้อยโทณัฐชัย คำมัน เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษมา ศิริสมบุญ

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ คูวรัญญู)

...../...../.....

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิศเรศ ฐุชกัลยา)

...../...../.....

กรรมการ

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิษณินทร์ แสงสว่าง)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษมา ศิริสมบุญ)

...../...../.....

...../...../.....



55406205 : สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คำสำคัญ : ฟลูอิดไดซ์เบด, ทฤษฎีกลศาสตร์, อากาศพลศาสตร์, การยกตัวของอนุภาค

ร.ท.ณัฐชัย คำมั่น : การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเตาฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนวนภายในไซโคลนแฟลต. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.กษมา ศิริสมบุญ. 295 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฟลต ซึ่งได้ทำการแบ่งรูปแบบในการทดลอง 1) อุทกพลศาสตร์การไหลของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฟลต และ 2) รูปแบบการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน ซึ่งทฤษฎีกลศาสตร์ที่ขนาดอนุภาค 300–500 600–710 และ 710–1000 μm ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเบด โดยมีความสูงเบด 30 cm ค่าความเร็วอากาศปฐมภูมิตั้งแต่ $U_{mf}-3U_{mf}$ และปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนอัตราการไหลของอากาศพลศาสตร์และตติยภูมิต่ออัตราการไหลอากาศปฐมภูมิเท่ากับ 0, 0.3 และ 0.5 โดยใช้หัวกระจายอากาศแบบ $S_w=2.76$ และ 2.98 สำหรับการทดลองอุทกพลศาสตร์การไหลจะดำเนินการที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและวัดค่าที่ตำแหน่งระดับความสูงเหนือจากระบบป้อนอากาศเท่ากับ 40, 50, 60 และ 125 cm ตามลำดับ ในขณะที่การทดลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน ดำเนินการทดสอบที่อุณหภูมิเบด 300 องศาเซลเซียส และวัดค่าที่ตำแหน่งระดับความสูงเหนือจากระบบป้อนอากาศเท่ากับ 60 125 223 และ 288 cm จากผลการทดลอง ในส่วนของอุทกพลศาสตร์การไหล พบว่า หัวกระจายอากาศแบบ $S_w=2.76$ และ 2.98 การยกตัวของอนุภาคที่บริเวณจุดกึ่งกลางเตา และตำแหน่งความสูงที่ใกล้เคียงบริเวณที่มีอนุภาคหนาแน่น (Dense phase zone) จะมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้ผลของค่า swirl number, ความเร็วของอากาศปฐมภูมิ และสัดส่วนอากาศพลศาสตร์และตติยภูมิที่ ส่งผลให้ค่าการยกตัวมากขึ้น ในทางตรงข้ามผลของขนาดอนุภาคเบดและความสูง จะส่งผลแบบผกผันกับค่าการยกตัวของอนุภาค สำหรับการถ่ายเทความร้อนภายในเตาไซโคลนแฟลต พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนค่า (h_{local}) มากที่สุด ณ กึ่งกลางเตา และลดลงตามแนวรัศมี จากนั้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่บริเวณผนังเตา ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศปฐมภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาครวมถึงอัตราการไหลของอากาศพลศาสตร์และตติยภูมิที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง ทั้งนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นนั้นพบว่า สมการความสัมพันธ์ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (h_z) ในส่วนพื้นที่ที่มีอนุภาคอย่างหนาแน่น
$$Nu_z=0.26(Ar)^{0.37}(Pr)^{-6.94}(Re_f)^{-0.19}(U_z/U_{mf})^{0.39}(H/Z)^{-2.88}(S)^{4.01}$$
 และ
$$Nu_z=0.35(Ar)^{0.20}(Pr)^{-6.36}(Re_f)^{-0.19}(U_z/U_{mf})^{0.39}(Z/d_p)^{0.51}(S)^{4.01}$$
 โดยมีค่า $R^2=0.87$ และ $MBD=20.49$ เท่ากันทั้งสองสมการ ในขณะที่ในพื้นที่ที่มีฟลูอิดไดซ์เบดแบบเบาบางสมการที่ได้ $Nu_z=0.46 (Ar)^{-12.53}(Pr)^{-6.36}(Re)^{-0.47}(1-Q_{SA}/Q_{TA})^{0.39}(H/Z)^{0.26}(S)^{7.70}$ ซึ่งมีค่า $R^2=0.87$ และ $MBD=8.77$

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

55406205 : MAJOR : (ENERGY ENGINEERING)

KEY WORD : FLUIDIZED BED, SILICA SAND SECONDARY AIR, SOLID HOLD-UP

NUTTACHAI KAMMUN : HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN TWIN CYCLONICS SWIRLING FLUIDIZED BED COMBUSTOR. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. DR.KASAMA SIRISOMBOON. 295 pp.

The aims of this project were to study the 1) hydrodynamic and solid hold up and 2) heat transfer behavior of swirling fluidized bed in a twin cyclone combustor. The silica sand used as insert bed material in the test at different particle size of 300–500, 600–710, and 710–1000 μm at the fixed static bed height 30 cm for secondary and tertiary air flow rate with primary air flow 0, 0.3, and 0.5 at superficial velocity range were U_{mf} – $3U_{mf}$. During the experimental test, the different air distributor system at $S_w=2.76$ and 2.98 were used. Measurement location were at level of 40, 50, 60, and 125 cm above the air distributor systems. For solid hold up were used ambient air condition for test. For the heat transfer investigation the sampling point were measure at 60 125 223 and 288 cm above air distributor for the fixed bed temperature at $300\text{ }^\circ\text{C}$. From hydrodynamic result, shown that a solid holdup increased with the increasing of swirl number, superficial velocity, and secondary and tertiary air ratio, meanwhile it decreased for the increasing of particle diameter. In all of the test result, it was found that the heat transfer coefficient was high at the center of the combustor and at combustor walls. The heat transfer was to increase with the increasing of superficial velocity while it showed the opposite tendency with the increasing of particle size diameter and secondary and tertiary air flow rate, the increased in heat transfer coefficient with increasing superficial velocity and decrease particle size and air stage ratio were found. The Buckingham's pi theorem was used to develop empirical equations for prediction of the heat transfer coefficient. The predicted heat transfer coefficients equation was found to be in good agreement with the coefficient of determination's values. At dense phase zone, empirical equation were used 2 model with both $Nu_z=0.26(Ar)^{0.37}(Pr)^{-6.94}(Re_f)^{-0.19}(U_z/U_{mf})^{0.39}(H/Z)^{-2.88}(S)^{4.01}$ and $Nu_z=0.35(Ar)^{0.20}(Pr)^{6.36}(Re_f)^{-0.19}(U_z/U_{mf})^{0.39}(Z/d_p)^{0.51}(S)^{4.01}$ which $R^2=0.87$ and $MBD=20.49$ for both models while free board zone, empirical equation was used 1 model $Nu_z=0.46(Ar)^{-12.53}(Pr)^{-6.36}(Re)^{-0.47}(1-Q_{SA}/Q_{TA})^{0.39}(H/Z)^{0.26}(S)^{7.70}$ with $R^2=0.87$ and $MBD=8.77$.

Department of Graduate School, Silpakorn University Student's
signature..... Academic Year 2016
Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดีจากการแนะนำและช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษมา ศิริสมบุญรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษาและ ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ยิ่งต่อการวิจัยอีกทั้งขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ คู่ วรวิญญู ประธานกรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิบดีนทร์ แสงสว่าง กรรมการสอบที่ให้ คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่ปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างดีและให้ความรู้เพิ่มเติมในการสอบทำให้ กลุ่มของกระผมมีความรู้ใหม่ ๆ เพิ่มมากขึ้น

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว และผู้เกี่ยวข้องอื่นๆอีกหลายท่านที่มีได้ เอ่ยนามได้ครบ ที่คอยรับฟังปัญหาและเป็นกำลังใจเสมอมา ความสำเร็จใด ๆ ที่เกิดขึ้นขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้จัดทำคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเกิดประโยชน์ แก่การพัฒนาทางด้านพลังงานในอนาคตต่อไป

ผู้จัดทำ

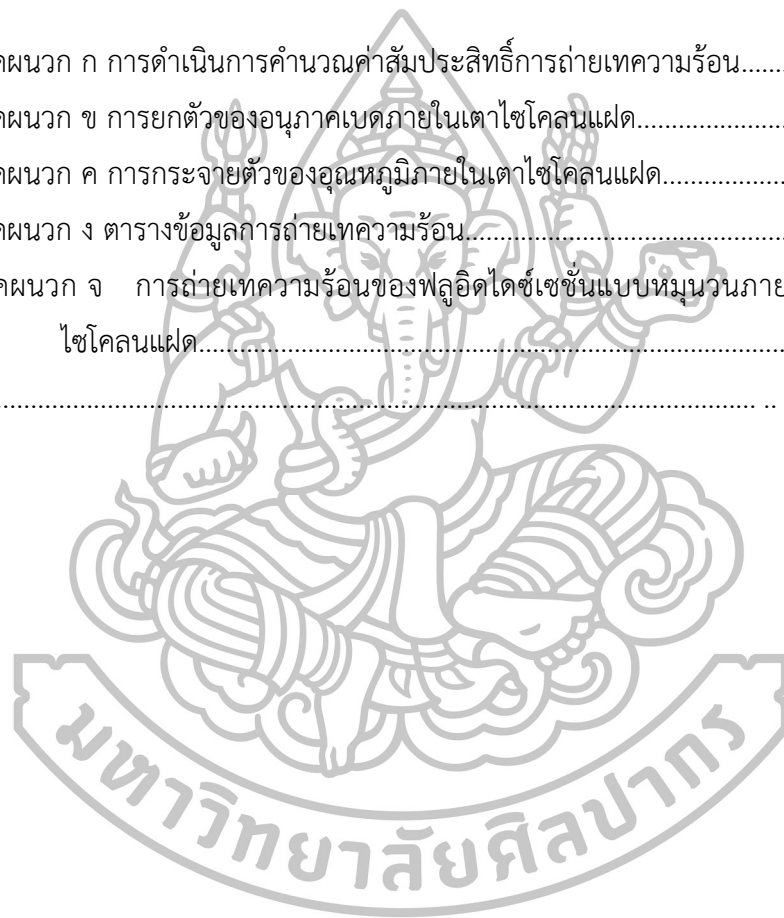
ร.ท.ณัฐชัย คำมัน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
แนวคิดงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ขั้นตอนของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
อุทกพลศาสตร์การไหลของฟลูอิดไฮด์เบต.....	4
กระบวนการถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไฮด์เบต.....	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
อุปกรณ์การทดลอง.....	32
เครื่องมือเก็บค่าการยกตัวของอนุภาค (Thief probe).....	35
อุปกรณ์เครื่องมือตรวจวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	37
การวางแผนการทดลอง.....	40
การติดตั้งเครื่องมือการทดลองตำแหน่งการวัด.....	42
การสร้างสมการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	44
อุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไฮด์เซชันแบบหมุนวนภายในเตาไฮโคลนแฝด.....	44
การยกตัวของอนุภาคเบตภายในเตาไฮโคลนแฝด.....	49
อุณหภูมิจากอากาศ ณ ตำแหน่งใดๆภายในเตาฟลูอิดไฮด์แบบไฮโคลนแฝด.....	59
การถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไฮด์เซชันแบบหมุนวนภายในเตาไฮโคลนแฝด.....	65

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	93
สรุปผลการทดลอง.....	93
ข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การดำเนินการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	101
ภาคผนวก ข การยกตัวของอนุภาคเบตภายในเตาไซโคลนแฝด.....	108
ภาคผนวก ค การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาไซโคลนแฝด.....	158
ภาคผนวก ง ตารางข้อมูลการถ่ายเทความร้อน.....	166
ภาคผนวก จ การถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด.....	261
ประวัติผู้วิจัย.....	295



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	กลุ่มของอนุภาคตาม Geldart's classification of powders.....	6
2.2	แสดงสมการการถ่ายเทความร้อน h_{gc} , h_{pc} และ h_r	18
3.1	ตารางแสดงขนาดของอุปกรณ์วัดค่าการยกตัวของอนุภาค.....	36
3.2	คุณลักษณะทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุลัมปี.....	38
3.3	ตารางแสดงขอบเขตการทดลอง.....	41
4.1	สมการภายในเตาไซโคลนแผ่นช่วงความสูงไม่เกิน 125 cm.....	84
4.2	สมการภายในเตาไซโคลนแผ่นช่วงความสูงตั้งแต่ 125 cm.....	88



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การแบ่งกลุ่มอนุภาค.....	5
2.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน.....	7
2.3 การวางท่อในแนวเส้นสัมผัสและในแนวรัศมี.....	10
2.4 แผ่นกระจายอากาศแบบใบพัดที่มี swirl number 2.76 และ 2.98.....	12
2.5 เครื่องมือการวัดการยกตัวของอนุภาคและผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดกับไฟเบอร์ ออปติก.....	13
2.6 ไดอะแกรมแสดงอิทธิพลในการถ่ายเทความร้อนของส่วนที่เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันอย่าง หนาแน่น.....	15
2.7 ผลของความเร็วฟลูอิดไดซ์เซชันที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	19
2.8 ตำแหน่งต่างๆของ ท่ออากาศปฐมภูมิ กล่องดักอากาศปฐมภูมิ ห้องฟลูอิดไดซ์เบด แผ่น กั้นให้เกิดการแปรปรวนของเบด ตำแหน่งวัดค่า หัวกระจายอากาศแบบ Nozzle ท่ออากาศทุติยภูมิ ตำแหน่งวัดความดันตกคร่อม ตำแหน่งวัด และ ท่อทางออก	20
2.9 ผลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	20
2.10 แสดงไดอะแกรมของเตาที่ใช้ทำการทดลอง.....	21
2.11 ขนาดวัสดุเบดที่มีกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	22
2.12 ขนาดวัสดุเบดที่มีกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	22
2.13 กราฟแสดงการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่อุณหภูมิเบดแตกต่างกันและที่ ตำแหน่งความสูง -127 mm วัดจากกลางเตา.....	23
2.14 กราฟแสดงการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่อุณหภูมิเบดแตกต่างกัน และ ที่ตำแหน่งความสูง 64 mm วัดจากกลางเตา.....	23
2.15 กราฟแสดงการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่อุณหภูมิเบดแตกต่างกัน และที่ตำแหน่งความสูง 406 mm วัดจากกลางเตา.....	23
2.16 กราฟแสดงผลของความเร็วอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ ร้อนที่ตำแหน่งความสูงแตกต่างกัน.....	24
2.17 กราฟแสดงผลของความเร็วอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความ ร้อนที่ตำแหน่งความสูงแตกต่างกัน.....	24
2.18 ผลกระทบของโพรบวัดตามแนวขวางที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	27
2.19 ผลกระทบของโพรบวัดตามแนวยาวที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	27

รูปที่	หน้า
2.20 เครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบใช้หลักการ 1 มิติ.....	28
2.21 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบสำเร็จรูป.....	28
3.1 แผ่นกระจายอากาศแบบใบพัดที่มี swirl number 2.76 และ 2.98.....	32
3.2 แผ่นออริฟิส.....	33
3.3 พัดลมอากาศปฐมภูมิ.....	33
3.4 พัดลมทุติยภูมิ.....	34
3.5 ทฤษฎีลีลา.....	34
3.6 เตาไซโคลนแฝด.....	35
3.7 อุปกรณ์วัดค่ายกตัวของอนุภาคเครื่องมือเก็บค่าการยกตัวของอนุภาคเบด และ กราฟแสดงการสอบเทียบจากการคำนวณกับการทดลองจากเครื่องมือ.....	36
3.8 กราฟแสดงค่าการยกตัวของอนุภาคที่ได้จากการทดลองเทียบกับสมการ.....	39
3.9 แสดงการติดตั้งการทดลอง และ แสดงตำแหน่งการวัดค่าการทดลอง.....	42
4.1 กราฟ $\Delta P-U$ แสดงผลของกระแทกของเบดทั้ง 3 ขนาดที่หัวกระจายอากาศที่มี Swirl number 2.76 และ 2.98	45
4.2 ภาพแสดงพฤติกรรมอุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนวน.....	46
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมระหว่างเบดเปรียบเทียบกับความเร็วฟลูอิด ไดซ์เซชันของเบดทั้ง 3 ขนาดที่หัวกระจายอากาศที่มี Swirl number 2.78 และ 2.98	48
4.4 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สถานะความเร็ว ปฐมภูมิ $2U_{mf}$ ที่ $(Q_S+Q_T)/Q_P = 0$ สำหรับ $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ ขนาด อนุภาคเบด 300–500 μm 600–710 μm และ 700–1000 μm	50
4.5 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกัน ขนาดอนุภาคเบด 600–710 μm ที่ $(Q_S+Q_T)/Q_P = 0$ สำหรับ $S_w=2.76$ และ $S_w=2.98$ ระดับความสูงในการวัด 40 cm 50 cm 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศ	51
4.6 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาค เบด 300–500 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ และ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด 40 cm 50 cm และ 60 cm เหนือหัว กระจายอากาศ.....	53
4.7 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคเบดแตกต่างกันความเร็ว อากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$ สำหรับ $S_w= 2.76$ และ ที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด 40 cm 50 cm และ 60 cm เหนือหัว กระจายอากาศ.....	55

รูปที่	หน้า
4.8 การจำลองการยกตัวของอนุภาคเบด.....	56
4.9 กราฟ $E-S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ 40 cm 50 cm และ 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$	57
4.10 กราฟ $E-S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 600-710 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ 40 cm 50 cm และ 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$	57
4.11 กราฟ $E-S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$	58
4.12 กราฟแสดงผลตำแหน่งความสูงโดยวัดจากระบบป้อนอากาศต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยความเร็วอากาศปฐมภูมิมี่ค่าเท่ากับ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 710-1000 \mu m$ ของ $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ โดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ ตติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5	60
4.13 กราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคมีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยภายในเตา สำหรับความเร็วอากาศปฐมภูมิมี่ค่าเท่ากับ $2.5U_{mf}$ โดย $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 สำหรับ Swirl Number เท่ากับ 2.76 และ 2.98.....	61
4.14 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งเตา ณ S_w เท่ากับ 2.76 และ 2.98 สำหรับ $U_{mf}-3U_{mf}$ สำหรับ d_p เท่ากับ 300-500 μm 600-710 μm และ 710-1000 μm	63
4.15 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากความเร็วอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งเตา สำหรับอนุภาคขนาด 600-710 μm ของ S_w เท่ากับ 2.76 และ 2.98 โดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิตติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5.....	64
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300-500 μm ที่ $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5	66
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600-710 μm สำหรับ $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ.....	67

รูปที่	หน้า
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710 - 1000 μm $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ ที่ อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ	68
4.19 ภาพแสดงจำลองลักษณะการพาความร้อนที่บริเวณขอบเตา ณ ขนาดอนุภาค 300-500 μm สภาวะ $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$ ที่ตำแหน่ง $Z = 60$ cm.....	69
4.20 ภาพแสดงการจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300-500 μm $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$ ที่ตำแหน่ง ความสูงที่ตำแหน่ง $Z = 125$ 223 และ 288 cm.....	70
4.21 แสดงผลของความเร็วจานอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาด อนุภาค 300-500 μm โดยใบพัด $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 ที่ ตามลำดับที่ตำแหน่งความสูง 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศ.....	71
4.22 แสดงผลของความเร็วจานอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300-500 μm โดยใบพัด $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 ที่ตำแหน่งความสูง 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ.....	72
4.23 แสดงผลของความเร็วจานอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300-500 μm โดยใบพัด $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 ที่ตำแหน่งความสูง 223 cm เหนือหัวกระจายอากาศ.....	73
4.24 แสดงผลของความเร็วจานอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300-500 μm โดยใบพัด $S_w = 2.76$ และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 ที่ตำแหน่งความสูง 288 cm เหนือหัวกระจายอากาศ.....	74
4.25 กราฟแสดงผลตำแหน่งความสูงโดยวัดจากระบบป้อนอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยขนาดอนุภาค 600-710 μm Swirl number = 2.76 และ 2.98 ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$ 0.3 และ 0.5	76
4.26 กราฟแสดงผลกระทบของอนุภาคเบดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ความเร็วจานอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับ d_p เท่ากับ 300-500 600-710 และ 710-1,000 μm สำหรับใบพัด $S_w = 2.76$ โดย $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5.....	78

รูปที่	หน้า
4.27 กราฟแสดงผลกระทบของอนุภาคเบดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับสำหรับ d_p เท่ากับ 300–500 600–710 และ 710–1,000 μm สำหรับใบพัด $S_w = 2.98$ โดย [(Q_s+Q_T)/ Q_p] เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5.....	79
4.28 ภาพจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนของอนุภาค.....	80
4.29 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีต่อ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตลอดทั้งความสูงเตา ที่ $S_w = 2.76$ และ ที่ $S_w = 2.98$ ของ d_p เท่ากับ 300–500 μm 600–710 μm และ 710–1000 μm	81
4.30 แสดงกราฟ $Z < 125$ cm เหนือหัวกระจายอากาศ $Nu - (U_z / U_{mf})$, $Nu - (U_{sf}/U_z)$, $Nu - (H/Z)$, $Nu - (Z/d_p)$ และ $Nu - S_w$	86
4.31 แสดงกราฟแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง ใน ช่วงความสูงการวัดในการทดลองไม่เกิน 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศของ กราฟชนิด $Nu-Ar$, $Nu-Pr$, $Nu-Re$ และ $Nu - \{1 - [(Q_s+Q_T)/Q_p]\}$	87
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt Number เฉลี่ย (แนวรัศมี) ที่ได้จากการ ทดลองกับ Nusselt Number เฉลี่ย (แนวรัศมี) การทำนายจากก) รูปแบบที่ 1 ถึง 6	89
4.33 แสดงกราฟแนวโน้มของ $Nu - H/Z$ และ $Nu - Z/d_p$ ที่มีผลต่อค่า Nusselt Number ใน ช่วงความสูงการวัดในการทดลองตั้งแต่ 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ.....	90
4.34 แสดงกราฟแนวโน้มของ $Nu - Pr$, $Nu - Re$, $Nu - 1 - \{Q_s+Q_T\}/Q_p$, $Nu - (U_z / U_{mf})$ $Nu - (U_{sf}/U_z)$ และ ฉ) $Nu - S_w$ ที่มีผลต่อค่า Nusselt Number ใน ช่วงความสูงการวัดในการทดลองตั้งแต่ 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ.....	91
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt Number เฉลี่ย (แนวรัศมี) ที่ได้จากการ ทดลองกับ Nusselt Number เฉลี่ย (แนวรัศมี) จากสมการทำนายจาก รูปแบบที่ 1 ถึง 6.....	92

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
Ar	Archimedes Number
$C_{p, g}$	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ, J/kgK
$C_{p, lump}$	ค่าความจุความร้อนของวัตถุ lump, J/kgK
d_p	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
h	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, W/m^2K
h_{avg}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในแต่ละสภาวะการทดลอง, W/m^2K
h_{gc}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอากาศ, W/m^2K
h_{pc}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค, W/m^2K
h_{local}	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆภายในเตา, W/m^2K
h_r	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี, W/m^2K
$h_{z,avg}$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามความสูงของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, W/m^2K
H, Z_r	ความสูงเตาทั้งหมด, m
J	อัตราการแผ่รังสีความร้อน, W/m^2
k_g	ค่าการนำความร้อนของก๊าซ,
L_s	ความยาวของวัสดุ lump, m
Nu	Nusselt Number
P	ความดัน,
Pr	Prandtl Number
Q_{sf}	อัตราการไหลของอากาศขาเข้าหวักระจ่ายอากาศ,
Q_{mf}	อัตราการไหลของอากาศต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน,
Q_p	อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ,
Q_s	อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ,
Q_T	อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ,
Q_Z	อัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งความสูงใดๆ,
r_o	รัศมีภายนอกหวักระจ่ายอากาศ, m

สัญลักษณ์	ความหมาย
R	ค่าความต้านทานความร้อน, $W / m \cdot K$
Re	Reynolds Number
Re_f	Reynolds Number fluidized bed
S_w	Swirl Number
T	อุณหภูมิ, $^{\circ}C$
T_s	อุณหภูมิของวัสดุลัมป์, $^{\circ}C$
T_b	อุณหภูมิของเบด, $^{\circ}C$
T_i	อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุลัมป์, $^{\circ}C$
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในเตา, $^{\circ}C$
t	เวลาในการวัด, sec
U	ความเร็วอากาศในการทำฟลูอิดไดซ์เซชันณ จุดใดๆ, m/s
U_{sf}	ความเร็วอากาศขาเข้าหัวกระจายอากาศ, m/s
U_{mf}	ความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน, m/s
U_p	ความเร็วอากาศอากาศปฐมภูมิ, m/s
U_s	ความเร็วอากาศทุติยภูมิ, m/s
U_T	ความเร็วอากาศตติยภูมิ, m/s
U_Z	ความเร็วอากาศที่ความสูงในการวัดที่ตำแหน่งใดๆ, m/s
V	ปริมาตร, m^3
Z	ความสูงในการวัดที่ตำแหน่งใดๆ เหนือหัวกระจายอากาศ, m
ตัวห้อย	ความหมาย
b	วัสดุเบด
pc	การพาความร้อนของอนุภาคเบดทำฟลูอิดไดซ์เซชัน
gc	การพาความร้อนของก๊าซทำฟลูอิดไดซ์เซชัน
mf	เริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน
mff	เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันอย่างไม่สมบูรณ์
msf	เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันอย่างสมบูรณ์
p	อนุภาค
R	รัศมีทั้งหมดของเตา
สัญลักษณ์	

ϵ	ค่าการปลดปล่อยรังสีของวัสดุ,ค่าการยกตัวของอนุภาค
ξ	พารามิเตอร์ในสมการที่ 2.5
σ	ค่าคงที่ของสแตนพาร์น-โบล์แมน
μ	ค่าความหนืด, $kg/m \cdot s$
φ	คุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุที่บรรจุ
ρ	ค่าความหนาแน่น, kg/m^3



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเผาไหม้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนนั้น เป็นวิธีการหนึ่งในการสร้างพลังงานความร้อนเพื่อใช้เชิงอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่พบว่าการเผาไหม้เพื่อเป็นพลังงานความร้อนนั้น จะเป็นการเผาไหม้แบบตรง ซึ่งการเผาไหม้แบบนี้จะส่งผลให้เกิดมลพิษ ทั้งยังให้ประสิทธิภาพที่ต่ำ เนื่องด้วยการเผาไหม้ตรง ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้ให้คงที่ได้ ดังนั้นการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดจึงถูกนำเสนอขึ้นเพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเผาไหม้ เนื่องด้วยการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบดสามารถควบคุมอากาศและควบคุมอุณหภูมิในการเผาไหม้ให้คงที่ได้

ในการนำพลังงานความร้อนไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ระบบทำความร้อนจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมี การเดินระบบท่อรับความร้อน เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานเชิงกล, พลังงานไฟฟ้า ฯลฯ สำหรับในการออกแบบท่อความร้อนนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยทั่วไปการถ่ายเทความร้อนสำหรับการเผาไหม้โดยตรง (ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 เฟส) อาจสามารถคำนวณได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนแบบทั่วไป แต่สำหรับในการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบด จะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 เฟส ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด สำหรับการติดตั้งระบบแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาฟลูอิดไดซ์เบดในเชิงอุตสาหกรรม โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะนำสารทำงานที่มีอุณหภูมิต่ำ เข้ามารับความร้อนภายในเตา เพื่อนำความร้อนจากภายในเตาไปใช้ทำประโยชน์ในด้านต่างๆ

จากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องพบว่า ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบพองอากาศ ทั้งยังไม่มีผู้ศึกษาวิจัยการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน ซึ่งเตาไซโคลนแผ่นนั้นได้ถูกสร้างขึ้นจากหลักการเดียวกับไซโคลนดักฝุ่น เพื่อดักจับอนุภาคของเชื้อเพลิงที่ไม่ถูกเผาไหม้ ไม่ให้หลุดลอยสู่สภาวะแวดล้อม ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนและสร้างสมการไว้มิติเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแผ่น ซึ่งใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดวัสดุเบดตำแหน่งความสูงในการวัดตำแหน่งการวัดในแนวรัศมี, ความเร็วในการทำฟลูอิดไดซ์เซชันอีกทั้งความเร็วทุติยภูมิและตติยภูมิ สำหรับความสูงเบดที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่

30 cm นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้ดำเนินการศึกษาอุทกพลศาสตร์ที่เกิดจากการใส่อากาศหุติยภูมิ และตติยภูมิ เพื่อใช้อธิบายกระบวนการถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาอุทกพลศาสตร์และการถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด

1.2.2 สร้างสมการไร้มิติเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบดชนิดหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด

1.3 แนวคิดงานวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมด พบว่าการศึกษาส่วนใหญ่เป็นการถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ ทั้งนี้ในการศึกษาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนยังไม่มีการศึกษาด้วยเหตุนี้จึงเหมาะสมอย่างยิ่งหากทำการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 การทดลองอุทกพลศาสตร์การไหลและการถ่ายเทความร้อน ใช้หัวกระจายอากาศแบบใบพัดที่มีค่า $S_w = 2.76$ และ $S_w = 2.98$

1.4.2 อุทกพลศาสตร์การไหลวัดค่าที่ระดับความสูง เท่ากับ 40, 50, 60 และ 125 cm วัดจากหัวกระจายอากาศ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะวัดค่าที่ตำแหน่งสัดส่วนแนวรัศมี เท่ากับ ± 1 , $\pm 2/3$, $\pm 1/3$ และ 0 ที่ตำแหน่งระดับความสูงเท่ากับ 60, 125, 223 และ 288 cm วัดจากหัวกระจายอากาศ

1.4.3 ทำการทดลองที่ความสูงเบด 30 cm วัดจากระดับแผ่นกระจายอากาศ ทุกการทดลอง

1.4.4 สัดส่วนการไหลของอากาศหุติยภูมิและตติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ คือ 0, 0.3 และ 0.5

1.4.5 การทดลองการถ่ายเทความร้อนและอุทกพลศาสตร์ ใช้ทรายซิลิกาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเบดขนาด 300–500, 600–710 และ 710–1,000 μm ทำการทดลองที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1U_{mf}$, $1.5U_{mf}$, $2U_{mf}$, $2.5U_{mf}$ และ $3U_{mf}$

1.4.6 การทดลองอุทกพลศาสตร์จะทำการทดลองที่สภาวะสิ่งแวดลอม

1.4.7 การทดลองการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิเบดในช่วง $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

1.5 ขั้นตอนของการวิจัย

1.5.1 ดำเนินการทดลองอุทกพลศาสตร์ในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนในเตาไซโคลนแฝด

1.5.2 ดำเนินการทดลองการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนในเตาไซโคลนแฝด

1.5.3 ทำการศึกษาผลที่ได้จากการทดลองเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมและสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนที่เกิดในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด

1.5.4 สรุปผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ได้ พร้อมเขียนรายงานสรุปการวิจัย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการของฟลูอิดไดซ์เซชัน ก็คือสภาวะที่กลุ่มอนุภาคของแข็งถูกเปลี่ยนให้มีพฤติกรรมคล้ายของไหล เมื่อเพิ่มอากาศที่มีความเร็วต่ำจะทำให้เกิดสภาวะเบตนิ่งจนกระทั่งมีการเพิ่มความเร็วของอากาศ อนุภาคจะเริ่มขยับตัวและเริ่มเคลื่อนที่ในบริเวณจำกัด ทำให้เกิดสภาวะเบตขยายตัว หากเพิ่มขนาดความเร็วอากาศต่อไปจนถึงสภาวะที่น้ำหนักของเบตเท่ากับแรงเสียดทานของการไหลที่กระทำต่ออนุภาคของแข็ง อนุภาคจะลอยตัวอย่างอิสระในลักษณะที่เหมือนกับของไหล จุดนี้จะเป็นจุดของความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบต

2.1 อุทกพลศาสตร์การไหลของฟลูอิดไดซ์เบต

2.1.1 การแบ่งกลุ่มอนุภาคของเบตด้วยวิธีของ Geldart

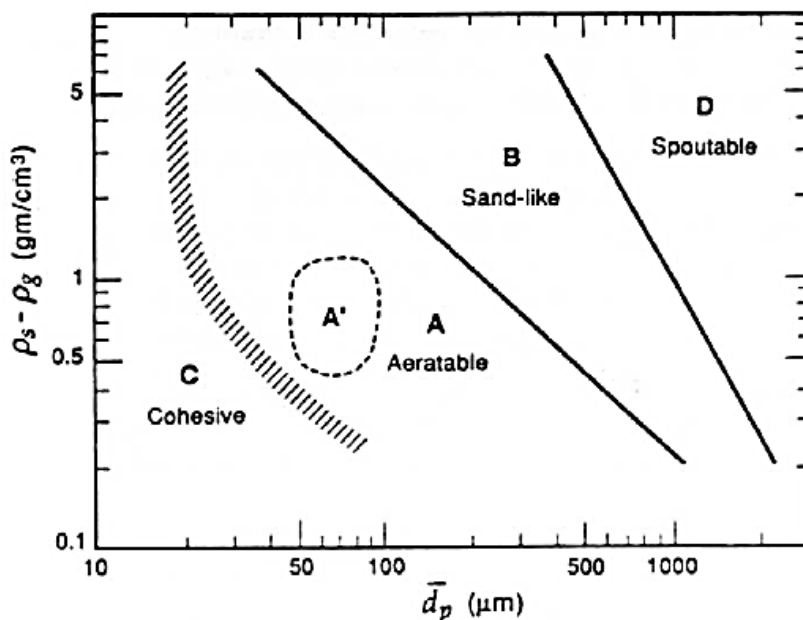
ในการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart โดยทั่วไปจะมีวิธีที่นิยมใช้กันมากก็คือ Geldart powder classification สามารถจัดเรียงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคได้แตกต่างกัน 4 กลุ่ม [1] โดยจัดเรียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจากขนาดเล็กสุดไปยังใหญ่สุด ดังแสดงตามรูปแผนผังการจัดหมวดหมู่ของ Geldart สำหรับฟลูอิดไดซ์เซชัน (Fluidization) ในรูปที่ 2.1

1) กลุ่ม C เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีการยึดเกาะได้ดี มีขนาดเล็กมาก และมีความละเอียดที่สุด โดยปกติ อนุภาคในกลุ่มนี้จะเกิดการฟลูอิดไดซ์เซชันได้ยาก เนื่องจากแรงยึดเกาะของอนุภาคมีค่าสูงกว่าแรงดันของก๊าซของไหล และอนุภาคมักจะจับตัวกันเป็นก้อน

2) กลุ่ม A เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำ (1400 kg/m^3) และมีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นกลุ่มที่อากาศสามารถผ่านอนุภาคได้ อนุภาคของแข็งนี้สามารถทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ง่ายที่ความเร็วต่ำของก๊าซที่ใช้เป็นของไหล อนุภาคของเบตจะมีลักษณะการเคลื่อนที่สม่ำเสมอเหมือนของไหลแบบราบเรียบ (Smooth fluidization) ที่ความเร็วก๊าซสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ (Minimum bubbling) วัสดุเบตจะเปลี่ยนไปเป็นช่วงของการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ (Bubbling mode)

3) กลุ่ม B เป็นกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายกับทราย (Sandlike particles) โดยปกติแล้วในกลุ่มนี้จะใช้เป็นวัสดุเบตในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบตแบบพองอากาศ จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40-500 μm และความหนาแน่นของอนุภาคอยู่ระหว่าง 1400-4000 kg/m^3 สามารถเคลื่อนที่ได้ดีในรูปแบบพองอากาศ (Bubbling action) เมื่อความเร็วของก๊าซที่ใช้เป็นของไหลมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน อนุภาคกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ง่าย อีกทั้งการเกิดพองฟลูอิดไดซ์เซชันจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความเร็วของก๊าซที่เป็นของไหลมีมากขึ้น

4) กลุ่ม D เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นมาก สำหรับอนุภาคเบตของกลุ่มนี้ ลักษณะพองอากาศจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่ากลุ่มอื่นๆ เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้อากาศสามารถไหลพุ่งผ่านขึ้นมาได้ง่าย (Spouting fluidization) ถึงแม้ว่าวัสดุเบตจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่แต่ก็สามารถที่จะเกิดการฟลูอิดไดซ์เซชันได้ แต่อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบตในกลุ่มนี้ จะรูปแบบการเกิดขึ้นอย่างไม่แน่นอน เนื่องจากก๊าซของไหลที่ไหลผ่านอย่างไม่สม่ำเสมอ



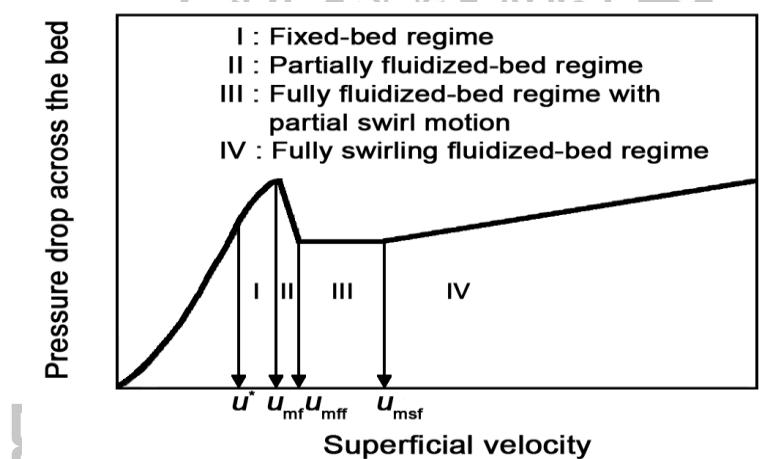
รูปที่ 2.1 การแบ่งกลุ่มอนุภาคที่จะส่งผลให้เกิดกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชัน [1]

ตารางที่ 2.1 กลุ่มของอนุภาคตาม Geldart's classification of powders [2]

Group คุณสมบัติ	Group C	Group A	Group B	Group D
ประเภทของแข็ง	แป้ง, ซีเมนต์	ของแข็งที่มีมวลเบา	ทราย	กรวด
พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ยากที่จะเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน	เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการไหลที่ไม่ใช้การเกิดฟลูอิดไดซ์แบบพองอากาศ	เริ่มการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันต่ำสุดที่ U_{mf}	เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ช้า
การขยายตัวของวัสดุเบด	ต่ำ เนื่องจากไม่มีช่องว่างอากาศ	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
อัตราการใช้อากาศที่ต้องให้กับวัสดุเบด	เริ่มต้นมีอัตราความเร็วที่สูง จากนั้นเป็นเอ็กโพเนนเชียล	ต่ำ, เชิงเส้น	สูง	สูง
คุณสมบัติการเกิดพองอากาศ	No bubbles	พองอากาศแยกและรวมกัน, เกิดขนาดพองอากาศใหญ่ที่สุด	ไม่มีขนาดที่แน่นอน	ไม่มีขนาดที่แน่นอน
การผสมกันของวัสดุ	ต่ำมาก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
การผสมของอากาศ	ต่ำมาก	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
การพ่นของวัสดุ	ไม่เกิด	ไม่เกิด	เกิดเฉพาะที่ต้น	เกิดที่ทุกระดับเบด

2.1.2 พฤติกรรมของฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวน

ในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนนั้น โดยพฤติกรรมฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนในเตาทรงกรวย [3] พบว่า จะเกิดเบตนิ่งซึ่งเป็นช่วงที่เบตไม่มีการขยับตัว (Fixed bed) เกิดเบตบางส่วนขยับตัว (Partial fluidized bed region) ซึ่งความดันจะต่ำลงอย่างรวดเร็วตามการขยายตัวที่สูงขึ้นของเบตจากด้านล่าง และเบตขยับตัวแบบพองอากาศโดยมีส่วนด้านล่างของเบตหมุนวน ในช่วงนี้ความดันจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Fully fluidized bed region with partial swirl motion) และเกิดช่วงของเบตที่มีการหมุนวนอย่างสมบูรณ์ (Fully swirling fluidized region) โดยในช่วงนี้เป็นจะขยับตัวแบบหมุนวนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับพฤติกรรมฟลูอิดไดซ์เบดแบบอากาศหมุนวนสามารถจำแนกได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน [3]

2.1.2.1 เบตนิ่ง (I : Fixed bed)

เมื่อแก๊สไหลผ่านเบตขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบต เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบตที่วางนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหลกระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางการไหล เรียกแรงนี้ว่า แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Draft force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันตกต่างตกคร่อม (Pressure drop)

ในขณะที่ของไหลไหลผ่านเบตนั้น จะเกิดแรงเสียดทานทำให้พลังงานของของไหลลดลง เมื่อวัดความดันตกคร่อมของเบตพบว่า ความดันตกนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergum Equation ดังนี้

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

เมื่อ

- ΔP คือ ความดันตกคร่อมระหว่างเบด (kPa)
 μ คือ ความหนืดของตัวกลางทำฟลูอิดไดซ์เซชัน (m^2/s)
 U คือ ความเร็วของอากาศของตัวกลางทำฟลูอิดไดซ์เซชัน (m/s)
 g คือ ความพรุนของวัสดุเบด
 L คือ ความสูงเบด (m)
 φ คือ คุณสมบัติวัสดุที่บรรจุ [4] หาได้จาก $\varphi = \pi^{1/3} (6V_p)^{2/3} / A_p$ โดย V_p คือ ปริมาตรของอนุภาค (m^3) และ A_p คือ พื้นที่ผิวของอนุภาค (m^2)

2.1.2.2 เบดเริ่มเคลื่อนตัว (II : Partial fluidized bed region)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนผ่านเบดนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่งอนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วจุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน (Minimum fluidization velocity ; U_{mf}) ในขณะที่เดียวกันความดันตกความระหว่างเบดจะมีค่าสูงสุด โดยจะเรียกพฤติกรรมของความเร็ว ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพุดิตัวคล้ายของไหลสำหรับค่าความดันตกคร่อมเบด ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด จากการศึกษาการไหลของอากาศและทรายในการเกิดอุทกพลศาสตร์ในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน ได้ทำการหาสมการสำหรับ U_{mf} และ ΔP_{max} เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมหลักหลักที่เกิดขึ้น [3] ซึ่งสามารถหาได้โดย

$$U_{mf} = 0.06 \frac{\mu}{d_p \rho_f} \left[\frac{\rho_f d_p^3 (\rho_s - \rho_f) g}{\mu} \right]^{0.61} \left(\frac{h}{D_0} \right)^{1.67} \quad (2.2)$$

เมื่อ

- U_{mf} คือ ความเร็วของอากาศของตัวกลางทำฟลูอิดไดซ์เซชัน (m/s)
 ρ_f, ρ_s คือ ความหนาแน่นของของไหลและวัสดุเบด ตามลำดับ (kg/m^3)
 g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$

h ความสูงของเบด, m หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, W/m^2K

D_0 เส้นผ่านศูนย์กลางฐานทรงกรวย, m

โดยสมการ 2.2 ใช้เพื่อการทำนายความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอซ์เซชันที่เกิดขึ้นในฟลูอิดไอซ์เบด

$$\Delta P = 3.43U_{mf}^{0.33} \left(\frac{h}{D_0}\right)^{1.03} \quad (2.3)$$

โดยสมการที่ 2.3 ใช้เพื่อทำนายความดันสูงสุดทำให้เกิดฟลูอิดไอซ์เซชันที่เกิดขึ้นในฟลูอิดไอซ์เบด

2.1.2.3. เบดฟองอากาศ (III : Fully fluidized bed region with partial swirl motion)

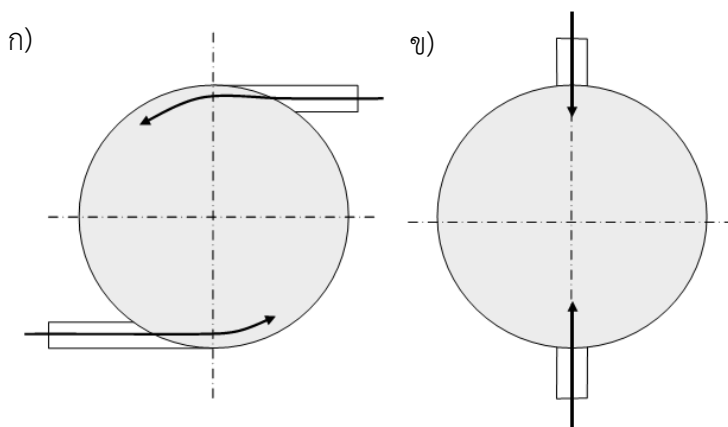
พฤติกรรมของเบดในลักษณะนี้ จะพบที่ $u > u_{mf}$ ซึ่งจะเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ โดยในช่วงนี้ ด้านบนของวัสดุเบดจะแสดงลักษณะของฟลูอิดไอซ์เซชันแบบฟองอากาศแต่ยังไม่เกิดการหมุนวนของวัสดุเบด แต่อย่างไรก็ตาม ที่ด้านล่างของเบดเกิดการหมุนวนของเบดอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อเพิ่มความเร็วมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วเป็นการเพิ่มโมเมนตัมซึ่งมีผลต่อหมุนวนของอากาศ ในพฤติกรรมนี้ความดันตกคร่อมระหว่างเบดจะมีค่าคงที่ ถึงแม้จะเพิ่มขึ้นของความเร็วในการทำฟลูอิดไอซ์เซชันก็ตาม หรือ $d(\Delta p)/du \approx 0$

2.1.2.4. เบดหมุนวนอย่างสมบูรณ์ (IV : Fully swirling fluidized-bed)

สำหรับพฤติกรรมการไหลแบบหมุนวนที่มีสมบูรณ์ สามารถสังเกตได้ที่ $U \geq U_{msf}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อทำการทดสอบที่วัสดุเบดที่มีความหยาบ จะพบว่าพฤติกรรมที่เบดหมุนวนอย่างสมบูรณ์นั้น จะขึ้นอยู่กับความสูงของเบด ซึ่ง U_{msf} มีค่าสูงกว่า U_{mf} อยู่ประมาณ 30-60 % สำหรับพฤติกรรมในขอบเขตนี้ กราฟมีลักษณะของความชันเป็นบวก $d(\Delta p)/du > 0$

2.1.3 อุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไอซ์เบดเมื่อใส่อากาศทุติยภูมิ

Koksal และคณะ [4] ได้ดำเนินการศึกษากระบวนการฟลูอิดไอซ์เซชันในเตาทรงกระบอกแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized-bed) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.23 m และสูง 7.62 m



รูปที่ 2.3 การวางท่อในแนวเส้นสัมผัส (ก) และในแนวรัศมี (ข) [4]

ซึ่งได้ศึกษาผลของการเติมอากาศทุติยภูมิเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ เนื่องจากการใส่อากาศทุติยภูมินั้น จะช่วยลดมลพิษของกระบวนการเผาไหม้ก่อนออกสู่สิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มเวลาในการยกตัวของอนุภาคเบต ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาอุทกพลศาสตร์เมื่อมีการเติมอากาศทุติยภูมิเข้าสู่ระบบ

จากงานวิจัยผลกระทบของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อค่าการยกตัวของอนุภาคในเตาฟลูอิดซ์เบดชนิดหมุนเวียน [4] โดยดำเนินการศึกษาผลของลักษณะการวางท่อแบบแนวรัศมีและในแนวเส้นสัมผัสที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาคเบต ซึ่งสามารถนำพฤติกรรมยกตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในเตามาใช้อธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในเตาแบบไซโคลนแพลตฟอร์มได้ แสดงดังรูปที่ 2.3 ได้แสดงให้เห็นว่า การวางท่อในแนวเส้นสัมผัสจะส่งผลให้การยกตัวของอนุภาคสูงกว่าแนวรัศมี แต่อย่างไรก็ตามการวางท่อในแนวรัศมีและในแนวเส้นสัมผัสต่างก็ให้ค่าการยกตัวของอนุภาคมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไม่มีการใส่อากาศทุติยภูมิ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลภายในเตา ทั้งนี้ในงานวิจัยยังพบอีกว่า การเพิ่มความเร็วทุติยภูมิจะส่งผลให้อนุภาคยกตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังได้สร้างรูปแบบสมการการยกตัวของอนุภาคที่ตำแหน่งเหนือกว่าท่อทุติยภูมิ และใต้ท่อทุติยภูมิ สำหรับเตาฟลูอิดซ์เบด ชนิดหมุนเวียน ดังแสดงดังสมการที่ 2.4–2.7

ท่อในแนวรัศมี

$$\text{Primary zone} \quad \varepsilon_{sus} = 3.30(Ar)^{0.27} \left(1 - \frac{H_{SA}}{H_r}\right)^{-3.24} \left(\frac{G_s}{\rho_p(U_0 - U_{SA})}\right)^{1.26} \quad (2.4)$$

$$\text{Secondary zone} \quad \varepsilon_{sus} = 1.16(Ar)^{0.06} \left(1 - \frac{H_{SA}}{H_r}\right)^{-0.86} \left(\frac{G_s}{\rho_p(U_0 - U_{SA})}\right)^{0.97} \quad (2.5)$$

ท่อในแนวเส้นสัมผัส

Primary zone
$$\varepsilon_{sus} = 63.20(Ar)^{0.52} \left(1 - \frac{H_{SA}}{H_r}\right)^{-3.11} \left(\frac{G_s}{\rho_p(U_0 - U_{SA})}\right)^{1.94} \quad (2.6)$$

Secondary zone
$$\varepsilon_{sus} = 12.93(Ar)^{0.35} \left(1 - \frac{H_{SA}}{H_r}\right)^{-2.06} \left(\frac{G_s}{\rho_p(U_0 - U_{SA})}\right)^{1.64} \quad (2.7)$$

โดย

$$Ar = \frac{d_p^3 g (\rho_p - \rho_g) \rho_g}{\mu^2} \quad (2.8)$$

H_{SA} คือ ความสูงท่อทุติยภูมิ (m)

H_r คือ ความสูงส่วนfreeboard (m)

G_s คือ อัตราการไหลเวียน ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

U_0 คือ ความเร็วในการทำฟลูอิดไดซ์เซชัน (m/s)

U_{SA} คือ ความเร็วอากาศทุติยภูมิ (m/s)

ε_{sus} คือ การยกตัวของอนุภาคเบต

Ar คือ Archimedes Number

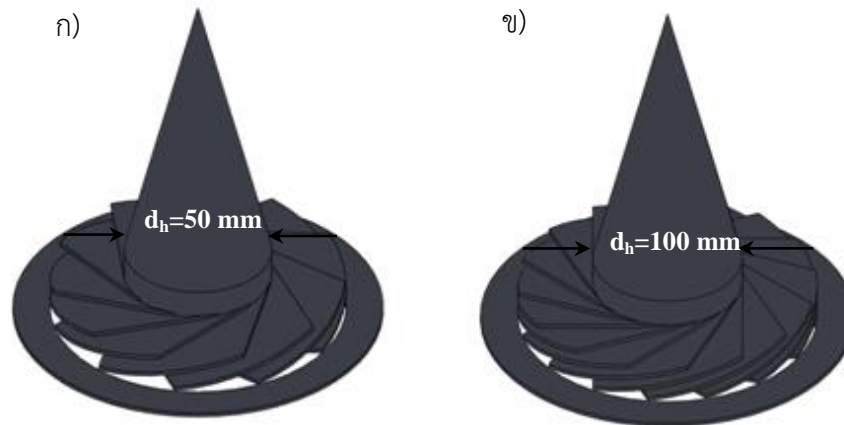
d_p คือ ขนาดของอนุภาคเบต (μm)

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก(m/s^2)

ρ_p คือ ค่าความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)

ρ_g คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศ ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)



รูปที่ 2.4 แผ่นกระจายอากาศแบบใบพัดที่มี swirl number 2.76 (ก) และ 2.98 (ข)

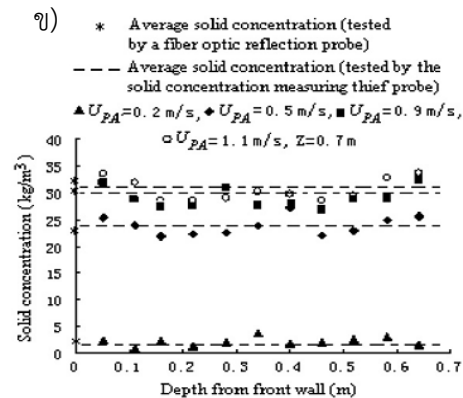
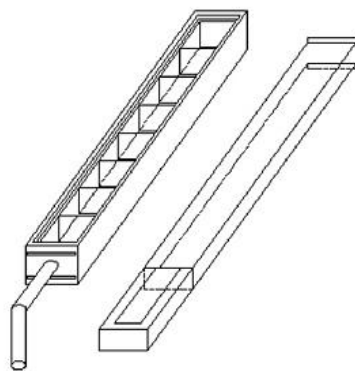
2.1.4 หัวกระจายอากาศแบบใบพัด

หัวกระจายอากาศแบบใบพัดนั้น มีหน้าที่ในการปรับเปลี่ยนอากาศให้มีรูปแบบหมุนวนก่อนเข้าสู่ภายในเตา เมื่ออากาศที่ถูกปรับรูปแบบแล้ว จะซึมผ่านอนุภาคเบดและทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวนตามลักษณะของอากาศไปด้วย ซึ่งผลให้อนุภาคเบดกระจายตัวมากกว่าอากาศแบบทั่วไป โดยหัวกระจายอากาศที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิด โดยแผ่นกระจายอากาศมีจำนวนใบพัด 11 และ 16 ใบ สำหรับรูปแบบของใบพัดจะมีลักษณะ axial impeller blade ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแต่ละชนิด จะมีมุมองศาของใบพัดกระทำกับแนวตั้ง 76 องศา โดยหัวกระจายอากาศ 11 ใบ และ 16 ใบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (d_o) 0.25 m ในขณะที่ใบพัด $S_w = 2.76$ และ 2.98 มีเส้นผ่านศูนย์กลางคุม (hub diameter, d_h) ของหัวกระจายลม 0.05 m และ 0.1 m ตามลำดับ โดยมีพื้นที่ตัดรวม $1.66 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ และ $0.70 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ตามลำดับ เพื่อทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศและเบด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากขนาด d_h ที่แตกต่างกันของหัวกระจายลม ทำให้มีค่า swirl number ตามที่ Basu และคณะ (2000) กล่าวไว้คือสามารถคำนวณได้จาก [5]

$$S_w = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_h / d_o)^3}{1 - (d_h / d_o)^2} \right] \tan \beta \quad (2.9)$$

2.1.5 อุปกรณ์สำหรับเก็บค่าการยกตัวของอนุภาคเบด

Chen และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการยกตัวของอนุภาค เมื่อมีการใส่อากาศทุติยภูมิเข้าสู่ภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบแบบหมุนเวียน โดยในงานวิจัยได้ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Thief probe ที่ขนาดความยาว 1.2 m กว้าง 40 mm สูง 30 mm ในการวัดค่าการยกตัวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก) ซึ่งจากการทดลอง พบว่า Thief probe สามารถให้ค่าการยกตัวของอนุภาคถูกต้องได้



รูปที่ 2.5 เครื่องมือการวัดการยกตัวของอนุภาค ก) ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดกับ ข) ไฟเบอร์ออปติก [8]

เมื่อเปรียบเทียบค่าการยกตัวที่ได้จากเส้นใยนำแสงซึ่งมีความแตกต่างของค่าที่เกิดขึ้นไม่เกิน $\pm 10\%$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ข) แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความถูกต้องของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าการยกตัวของอนุภาค เราสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้ด้วยสมการ 2.10 [6, 7] ซึ่งสามารถนำไปใช้ในเตารูปแบบใดๆ ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{\Delta H} = (\rho_p(1-\varepsilon) + \rho_g\varepsilon)g \quad (2.10)$$

โดย

ε คือ ค่าการยกตัวของอนุภาค

ΔP คือ ความดันตกคร่อมระหว่าง 2 จุด (kPa)

ΔH คือ ระยะห่างของตำแหน่งในการวัดค่าความดันตกคร่อม (m)

ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของอนุภาคเบด (kg/m^3)

ρ_g คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก 9.81 m/s^2

2.2 กระบวนการถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบด

ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของอนุภาค มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและใช้ในการวิเคราะห์เพื่อสร้างเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายที่มีความพยายามที่จะหาปริมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของความสัมพันธ์บนพื้นฐานความหลากหลายของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองและดำเนินการเชื่อมโยงตัวแปรข้อมูลเหล่านั้นเข้าด้วยกัน ซึ่งรูปแบบหลักของการถ่ายเทความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบดระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและวัตถุแขวนลอย (เบด) นั้นประกอบด้วย การพาความร้อนของอนุภาค, การพาความร้อนของแก๊สและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งในการพาความร้อนเนื่องจากอนุภาคเกิดจากการไหลของความร้อนจากอนุภาคที่อยู่ในวัสดุเบดส่งผ่านไปสู่อุณหภูมิที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับการพาความร้อนของแก๊สเกิดจากการที่แก๊สทำฟลูอิดไดซ์เซชันทะลุผ่านชั้นเบดและซึมผ่านตามช่องว่างของวัสดุเบด การพาความร้อนอันเกิดจากแก๊สทำฟลูอิดไดซ์เซชันนั้น มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบการถ่ายเทความร้อนที่มีการใช้วัสดุเบดที่มีอนุภาคใหญ่และการทำงานที่ความดันสูง และการแผ่รังสีความร้อนเกิดจากการปลดปล่อยความร้อนของอนุภาคหรือพื้นผิวของวัสดุเบดที่มีอุณหภูมิสูง จากองค์ความรู้ข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (h) สามารถสรุปได้ดังนี้ [1, 7]

$$h = h_{pc} + h_{gc} + h_r \quad (2.11)$$

โดย

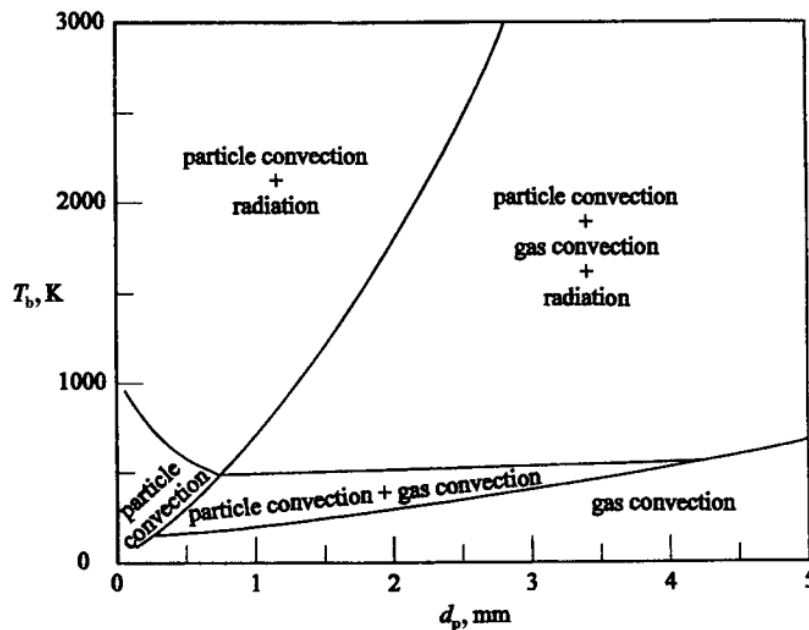
h_{pc} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค (W/m^2K)

h_{gc} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซทำฟลูอิดไดซ์เซชัน (W/m^2K)

h_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี (W/m^2K)

2.2.1 การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค (Particle convection, h_{pc})

ในระบบฟลูอิดไดซ์เซชันที่มีก๊าซ-ของแข็งอยู่อย่างหนาแน่น, การหมุนเวียนของอนุภาค จะเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนอันเกิดจากอนุภาค โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคจะสูงเมื่อมีการแลกเปลี่ยนคลอบคลุมบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัสดุเบดกับพื้นผิวที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้หากทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและขนาดอนุภาคเบด จากงานวิจัยของ Flamant M. et.al.(1992) ในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขสถานะ



รูปที่ 2.6 ไดอะแกรมแสดงอิทธิพลในการถ่ายเทความร้อนของส่วนที่เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน
อย่างหนาแน่น [9]

การทำงานของฟลูอิดไดซ์เบตตั้งที่กล่าวมานั้น มีอิทธิพลอย่างมากต่อลักษณะการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นความเข้าใจกลไกกระบวนการถ่ายเทความร้อนมีผลอย่างยิ่งต่อการพัฒนาการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการเข้าใจ โดยจากรูปได้บ่งบอกถึงอิทธิพลการถ่ายเทความร้อนนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดวัสดุเบตและอุณหภูมิของวัสดุเบต เมื่อสังเกตในไดอะแกรม จะพบว่า การพาความร้อนจากอนุภาคมีอิทธิพลผลต่อทุกสภาวะอุณหภูมิ ยกเว้นที่อุณหภูมิเบตต่ำกว่า 500°C และอนุภาคขนาดตั้งแต่ 4 mm ขึ้นไปการพาความร้อนจากแก๊สทำฟลูอิดไดซ์เซชันจะมีผลต่อระบบมากขึ้น

การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคเกิดจากการผสมตัวหรือการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเบต และมีการส่งถ่ายความร้อนให้กับอนุภาคใกล้เคียง (h_{pc}) ซึ่งมีอิทธิพลอย่างยิ่งในการถ่ายเทความร้อนกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกสัมผัส ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอันเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคสามารถแสดงได้ดังนี้ [10]

$$h_{pc} = \frac{1 - \alpha_b}{R_p} \quad (2.12)$$

โดย

h_{pc} คือ การพาความร้อนจากอนุภาค ($\text{W m}^{-2}\text{-K}^{-1}$)

α_b คือ ค่าความพรุนของวัสดุ

R_p คือ ค่าความต้านทานความร้อนของอนุภาค (W/m-K)

ทั้งนี้การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคนั้น สามารถวิเคราะห์ด้วยองค์ความรู้จากการนำความร้อน 1 มิติ โดยแบ่งการต้านทานความร้อนได้ 2 ส่วนคือ 1) ความต้านทานจากอนุภาค, $1/h_p$ 2) ความต้านทานอันเกิดจากฟิล์มอากาศ, $1/h_f$ ดังนั้นในสมการที่ 2.13 จึงสามารถเขียนได้ ดังนี้ [10]

$$h_{pc} = \frac{1 - \alpha_b}{1/h_p + 1/h_f} \quad (2.13)$$

ซึ่ง h_p และ h_f สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$h_p = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{K_{em} \rho_p (1 - \alpha_{mf}) c f_b}{1 - \alpha_b} \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

$$h_f = \frac{\xi K}{d_p} \quad (2.15)$$

ซึ่ง ξ คือ ค่าแฟกเตอร์อยู่ในช่วง 4 ถึง 10 [10] ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค สามารถหาได้จากสมการที่ 2.13

K_{em} คือ ค่าการนำความร้อนเมื่อเบตอยู่ในสถานะแขวนลอย (W/m-K)

c คือ ค่าความจุความร้อน (kJ/kg-K)

f_b คือ ความถี่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของเบต (Hz)

α_{mf} คือ ค่าความพรุนของวัสดุเบตในช่วงที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน

α_b คือ ค่าความพรุนของวัสดุเบต

K คือ ค่าการนำความร้อนของอนุภาคเบตใน (W/m-K)

h_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอนุภาคเบต (W/m-K)

h_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ (W/m-K)

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซทำฟลูอิดไดซ์เซชัน (Gas convection, h_{gc})

การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซทำฟลูอิดไดซ์เซชัน เกิดจากก๊าซที่ทำฟลูอิดไดซ์เซชันไหลซึมผ่านส่วนของอนุภาคจากนั้นเกิดการสัมผัสกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซ สำหรับในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชันที่ใช้เบดที่มีอนุภาคเล็ก การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากก๊าซนั้นจะมีผลกระทบน้อยมาก (บริเวณที่มีฟลูอิดไดซ์เซชันอย่างหนาแน่น) แต่อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซจะมีอิทธิพลอย่างมากในบริเวณที่ไม่มีอนุภาคเบดลอยขึ้นไป (Freeboard zone) โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากก๊าซจะเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่ผิวที่ถูกละเปลี่ยนความร้อน แต่อย่างไรก็ตามสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากก๊าซได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซนั้น ไม่ขึ้นอยู่กับรูปร่างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่ง Baskakov et. al [11] ได้แสดงดังสมการที่ 2.16 Denloye และคณะ.(1978) แสดงดังสมการที่ 2.17 นอกจากนี้ ยังพบว่า การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซจะมีบทบาทโดดเด่นต่อกระบวนการ ฟลูอิดไดซ์เซชัน ก็ต่อเมื่ออนุภาคและความดันในการทำฟลูอิดไดซ์เซชันเพิ่มขึ้น [12]

$$\frac{h_{gc} d_p}{K} = 0.009 Ar^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.16)$$

$$\frac{h_{gc} \sqrt{d_p}}{K} = 0.86 Ar^{0.29} \quad (2.17)$$

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อน (Radiation, h_r)

การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนจะมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดที่มีกระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (สูงกว่า 500 °C) หากฟลูอิดไดซ์เบดถูกกำหนดให้เป็น “วัตถุกะทก” ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน h_r ระหว่างเบดที่มีอุณหภูมิ T_b กับพื้นที่ผิวที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ T_s สามารถแสดง [13] ได้ดังนี้

$$h_r = \frac{J_r}{T_b - T_s} = \sigma_b \epsilon_{bs} (T_b^2 - T_s^2) (T_b - T_s) \quad (2.18)$$

โดย J_r เป็นสนามความร้อนในการแผ่รังสีความร้อน, σ_b เป็นค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลส์แมน, T_b คืออุณหภูมิเบด, T_s คืออุณหภูมิผิวรับความร้อน และ ϵ_{bs} เป็นค่าความปลดปล่อย, ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่าง,คุณสมบัติของวัสดุ และความสามารถในการดูดกลืนของวัตถุนั้น [13] ซึ่ง ϵ_{bs} สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\epsilon_{bs} = (1/\epsilon_b + 1/\epsilon_s - 1)^{-1} \quad (2.19)$$

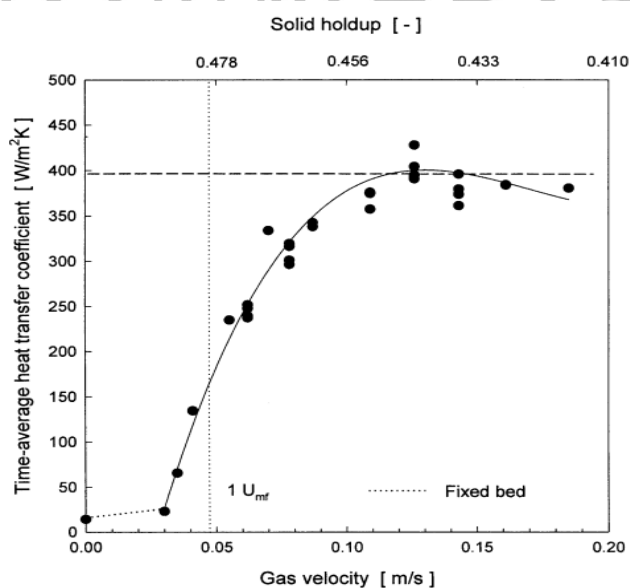
ตารางที่ 2.2 แสดงสมการการถ่ายเทความร้อน h_{gc} ; h_{pc} และ h_r

สมการที่	ผู้ศึกษา	ความสัมพันธ์ในการศึกษา	รูปแบบเฟสที่ศึกษา	สมการ	ช่วงในการศึกษา
2.13	Baskakov และคณะ [11]	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอนุภาค	แก๊ส-ของแข็ง	$h_{pc} = \frac{1 - \alpha_b}{1/h_p + 1/h_f}$	-
2.16	Baskakov และคณะ [11]	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแก๊ส	แก๊ส-ของแข็ง	$\frac{h_{gc} d_p}{K} = 0.009 Ar^{1/2} Pr^{1/3}$	$0.166 \text{ mm} < d_p < 4 \text{ mm}$
2.17	Denloye and Botterill [12]	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแก๊ส	แก๊ส-ของแข็ง	$\frac{h_{gc} \sqrt{d_p}}{K} = 0.86 Ar^{0.29}$	$10^3 < Ar < 2 \times 10^6$ ที่ความดันการทำงาน $< 1 \text{ MPa}$
2.18	Baskakov [13]	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี	แก๊ส-ของแข็ง	$h_r = \sigma_b \epsilon_{bs} (T_b^2 - T_s^2)(T_b - T_s)$	อุณหภูมิเบดตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียส
-	Kunii and Levenspiel [16]	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่าง อนุภาค-แก๊ส	ก๊าซ-ของแข็ง	$Nu_{gp} = \frac{h_{gp} d_p}{K} \approx 2 + (0.6 - 1.8) Re_{pf}^{1/2} Pr^{1/3}$	$Re_{pf} > 100$
-	Molerus และคณะ [17,18]	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่าง พื้นผนัง-เบด	ก๊าซ-ของแข็ง	$\frac{hL}{K} = \frac{0.125(1 - \alpha_{mf})(1 + A)^{-1}}{1 + (K/2c\mu)(1 + BC)}$ <p>where $L = \left[\frac{\mu}{\sqrt{g(\rho_p - \rho_g)}} \right]^{2/3}$;</p> $A = 33.3 \left\{ \sqrt[3]{\frac{\rho_p c}{Kg} (U - U_{mf})} \sqrt[3]{\frac{U - U_{mf}}{U_{mf}}} \right\}^{-1}$ $B = 0.28(1 - \alpha_{mf})^2 \left[\frac{\rho_g}{\rho_p - \rho_g} \right]^{0.5}$ $C = \left[\sqrt[3]{\frac{\rho_p c}{Kg} (U - U_{mf})} \right]^2 \frac{U - U_{mf}}{U_{mf}}$ $E = \left(\frac{\rho_g}{\rho_p - \rho_g} \right)^{1/3} \left[1 + 0.05 \left\{ \frac{U - U_{mf}}{U_{mf}} \right\} \right]^{-1}$	$Ar < 10^8$ โดย $Ar = \frac{d_p^3 g (\rho_p - \rho_g) \rho_g}{\mu^2}$

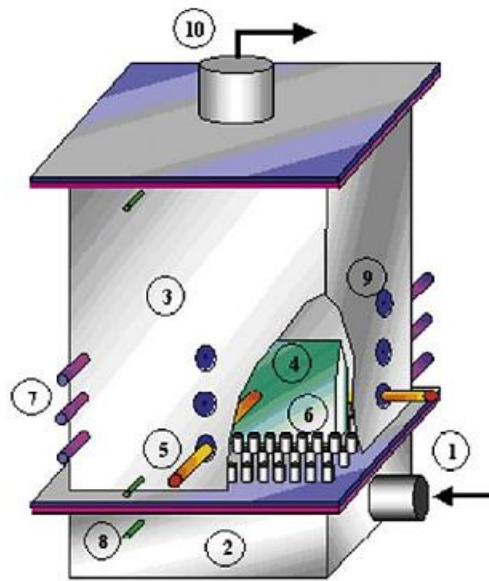
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการถ่ายเทความร้อน

2.3.1. ผลของความเร็วปฏุนุมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

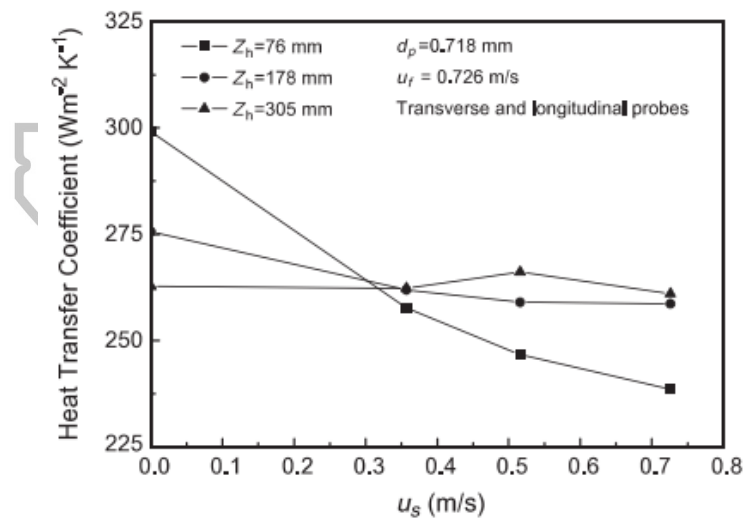
ความเร็วในการทำฟลูอิดไดซ์เซชันมีผลอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน Won และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างเบตกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและพฤติกรรมการยกตัวของอนุภาคในเตาฟลูอิดไดซ์เบตแบบพองอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็วในการทำฟลูอิดไดซ์เซชัน จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะค่อยๆลดลง จากเหตุการณ์ดังกล่าวได้ถูกอธิบายว่า การที่ความเร็วที่มากขึ้นไปนั้น จะทำให้การยกตัวของอนุภาคต่ำลง ส่งผลให้บทบาทการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซทำฟลูอิดไดซ์เซชันมีมากกว่าการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค จึงส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ดังรูปที่ 2.7 นอกจากนี้ยังได้ศึกษางานวิจัยการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวน โดยใช้หัวกระจายอากาศแบบ Nozzle [15] ซึ่งลักษณะของเตาฟลูอิดไดซ์เบตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งการทดลอง พบว่า ความเร็วอากาศทุติยภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบตกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณที่อยู่ใต้อากาศทุติยภูมิและบริเวณอากาศทุติยภูมิ ($Z_h = 78$ และ 178 mm) ลดลง ดังแสดงผลในรูปที่ 2.9 เนื่องด้วยอากาศทุติยภูมิจะส่งผลให้วัสดุเบตเกิดการกระจายตัวมากขึ้น ทั้งนี้ในบริเวณที่มีเหนืออากาศทุติยภูมิจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่



รูปที่ 2.7 ผลของความเร็วฟลูอิดไดซ์เซชันที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [14]



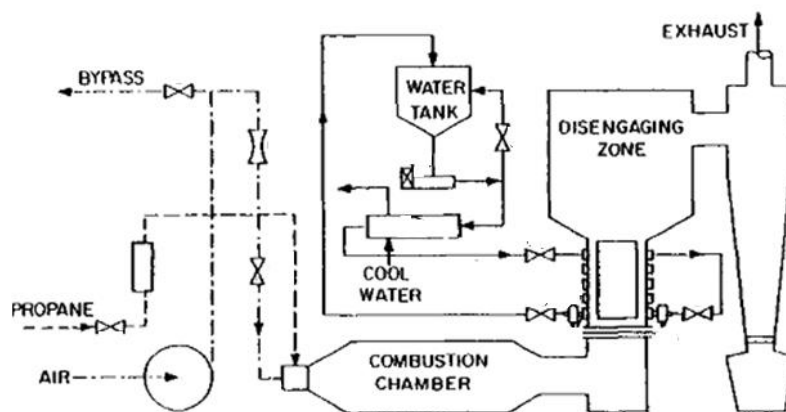
รูปที่ 2.8 ตำแหน่งต่างๆของเตา (1) ท่ออากาศปฐมภูมิ (2) กล่องดักอากาศปฐมภูมิ (3) ห้องฟลูอิดไดซ์เบด (4) แผ่นกั้นให้เกิดการแปรปรวนของเบด (5) ตำแหน่งวัดค่า (6) หัวกระจายอากาศแบบ Nozzle (7) ท่ออากาศทุติยภูมิ (8) ตำแหน่งวัดความดันตกคร่อม (9) ตำแหน่งวัด (10) ท่อทางออก [15]



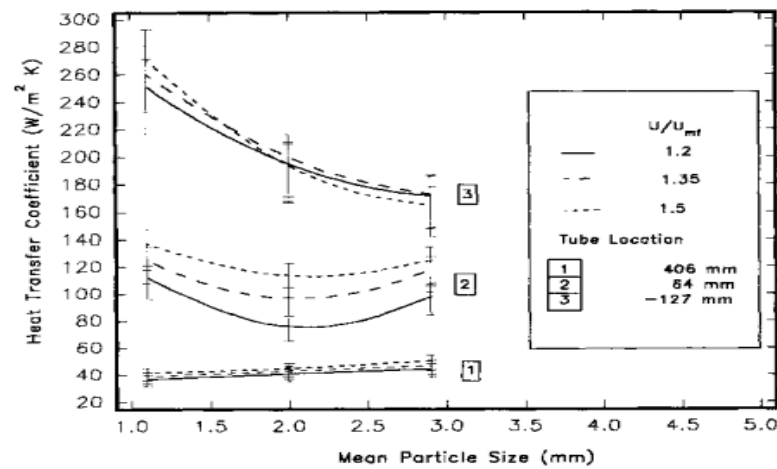
รูปที่ 2.9 ผลของอากาศทุติยภูมิที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [15]

2.3.2 ผลของขนาดอนุภาคเบตที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

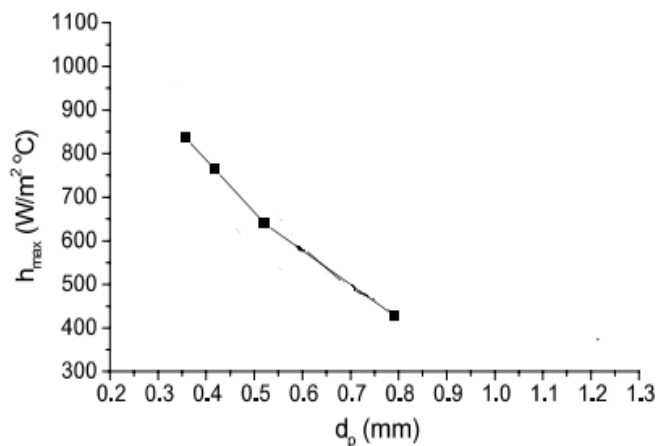
ขนาดของอนุภาคเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากงานวิจัยการศึกษาผลของอนุภาคเบตที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบตกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในเตาฟลูอิดไดซ์เบตแบบพองอากาศ [19] ดังแสดงดังรูปที่ 2.10 พบว่าผลการทดลองถูกแบ่งเป็น 2 แนวโน้ม โดยแนวโน้มที่ 1 ณ ความสูง -127 mm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดฟลูอิดไดซ์ชั้นอย่างหนาแน่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดเบตที่มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเบตมากขึ้นส่งผลโดยตรงให้การถ่ายเทความร้อนจากแก๊สทำฟลูอิดไดซ์ชั้นมีบทบาทมากขึ้น และแนวโน้มที่ 2 พบว่า ที่ตำแหน่งความสูง 64 และ 406 mm (Free board) ขนาดของอนุภาคไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เนื่องด้วยบริเวณดังกล่าวไม่มีอนุภาคของเบตที่เคลื่อนที่ถึงได้ ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 จากงานวิจัยศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบตแบบพองอากาศที่สถานะอุณหภูมิสูง [20] โดยใช้วัสดุที่มีลักษณะทรงกลมเป็นพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการนำเสนอผลทดลอง ได้แสดงผลค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงสุดที่ได้ในการทดลองแต่ละครั้ง (h_{max}) พบว่า ที่สถานะการทดลองเดียวกัน การเพิ่มขนาดวัสดุเบต (ทรายซิลิกา) จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง เนื่องด้วยอนุภาคเบตที่ใหญ่ขึ้น จะมีขนาดของช่องว่างระหว่างเบตมากขึ้นส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากอากาศมีอิทธิพลสูงกว่าการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาค ดังแสดงผลในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.10 แสดงไดอะแกรมที่ใช้ทำการทดลอง [19]



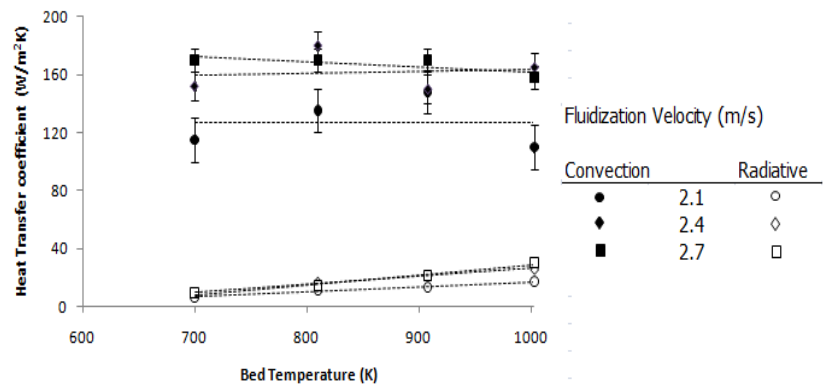
รูปที่ 2.11 ขนาดวัสดุเบดที่มีกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [19]



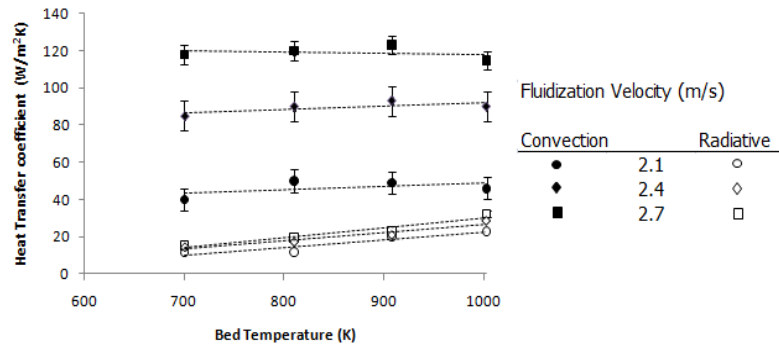
รูปที่ 2.12 ขนาดวัสดุเบดที่มีกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [20]

2.3.3 ผลของอุณหภูมิเบดที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

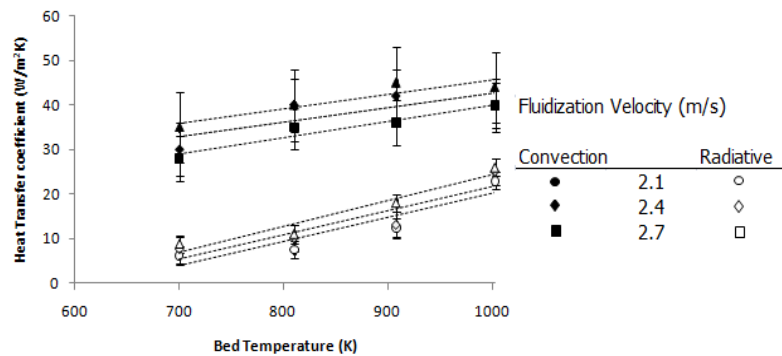
จากงานวิจัยการศึกษาผลของอุณหภูมิเบดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบดกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน [21] ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำที่อุณหภูมิเบด 700 810 908 และ 1003 K จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิเบดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมากขึ้น ทั้งนี้หากทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีออกจากค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนรวม พบว่า การแผ่รังสีความร้อนไม่ได้ขึ้นอยู่กับสถานะใดๆ นอกจากสถานะที่ อุณหภูมิเบดเท่านั้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนนั้นมีค่า 6.9, 9.9, 13.0 และ 16.9% ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมทั้งหมด สำหรับอุณหภูมิเบด 700 810 908 และ 1003 K ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มากขึ้นนั้น เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนมีผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อน ไม่ได้เกิดจากการพาความร้อนจากอนุภาคหรือตัวกลางทำฟลูอิดไดซ์เซชัน ดังแสดงผลในรูปที่ 2.13–2.15



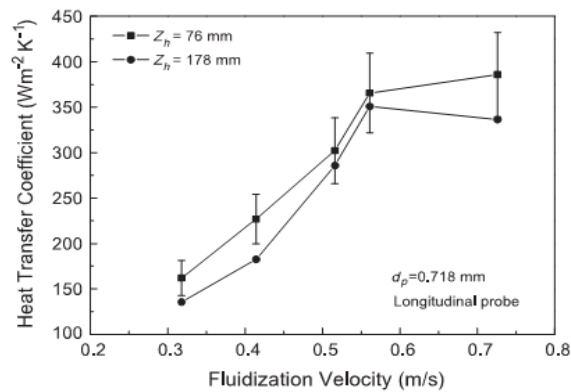
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่อุณหภูมิเบดแตกต่างกัน และที่ตำแหน่งความสูง -127 mm วัดจากกลางเตา [21]



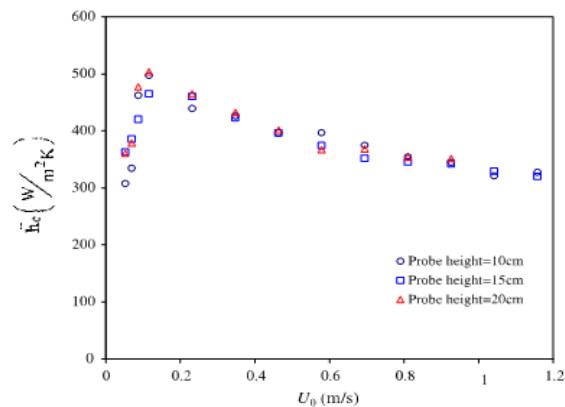
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่อุณหภูมิเบดแตกต่างกัน และที่ตำแหน่งความสูง 64 mm วัดจากกลางเตา [21]



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่อุณหภูมิเบดแตกต่างกัน และที่ตำแหน่งความสูง 406 mm วัดจากกลางเตา [21]



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงผลของความเร็วอากาศปฐุมภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งความสูงแตกต่างกัน [15]



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงผลของความเร็วอากาศปฐุมภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งความสูงแตกต่างกัน [22]

2.3.4 ผลของตำแหน่งความสูงภายในเตาที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ความสูงเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งจากผลการวิจัย ของ Lu P. และคณะ (2011) ได้ดำเนินการทดลองภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดหมุนวน (รูปที่ 2.8) ที่สภาวะสิ่งแวดลอม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อตำแหน่งการวัดสูงถูกเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในช่วงความเร็ว 0.3–0.6 m/s แต่อย่างไรก็ตามที่ความเร็วตั้งแต่ 0.53 ขึ้นไป (รูปที่ 2.16) พบว่า ตำแหน่งความสูงไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เนื่องด้วยความเร็วที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคเบดกระจายทั่วทั้งเตา การเพิ่มความเร็วให้สูงขึ้นกว่าค่าดังกล่าว จึงไม่ทำให้อนุภาคเบดมีการเปลี่ยนแปลง และส่งผลให้อธิพลาจากการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคมีบทบาทน้อย จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากัน [15] นอกจากนี้การศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเบด ของ Masoumifard N. และคณะ (2008) ได้ทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ที่มีความสูง เตา 11 m ณ การทดลองที่สภาวะสิ่งแวดลอม จากการ

ทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 พบว่า การเพิ่มความสูงนั้นจะส่งผลให้ค่าการยกตัวของอนุภาคลดลง ซึ่งมีจากงานวิจัยพบว่า ผลของความสูงที่มีต่อการยกตัวของอนุภาคนั้น มีแนวโน้มของพฤติกรรมในรูปแบบเดียวกัน [22]

จากการรวบรวมงานวิจัยข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างเบตกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเปลี่ยนแปลง คือ ความเร็วในการทำฟลูอิด ไตซ์เซชัน อากาศหุติยภูมิ ขนาดอนุภาคเบต อุณหภูมิของเบต และตำแหน่งความสูงในการวัด โดยปัจจัยที่กล่าวมานี้จะมีแนวโน้มของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเหมือนกันเสมอ แม้จะมีการเปลี่ยนรูปแบบของเตาก็ตาม

2.4 เครื่องมือและวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

จากการรวบรวมงานวิจัยพบว่า การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไตซ์เบตมีด้วยกัน 3 วิธี คือ 1) การใช้คุณสมบัติของวัสดุลัมป์ ซึ่งง่ายต่อการหาอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายน้อย แต่อย่างไรก็ตามความถูกต้องที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุ 2) การใช้หลักการนำความร้อน 1 มิติ โดยเป็นการประยุกต์การนำความร้อนของอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนคงที่ ร่วมกับการวัดค่าอุณหภูมิเบตและผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งให้ความถูกต้องที่ดี แต่อุปกรณ์มีความสับซ้อนค่อนข้างมากและ 3) การวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการใช้เครื่องมือสำเร็จรูป (Thin film sensor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่หาได้ยากและมีราคาแพง แต่อย่างไรก็ตามก็ให้ค่าความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ถูกต้องตามไปด้วย

2.4.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ด้วยการวิเคราะห์ระบบลัมป์

จากงานวิจัยการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัสดุลัมป์และวัสดุเบตในกระบวนฟลูอิดไตซ์เซชัน [25] ได้กล่าวไว้ว่า การนำความร้อนของวัตถุในระบบ Lump เป็นวัตถุที่มีการนำความร้อนที่ดี เมื่อเทียบกับค่าการพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อม จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าเท่ากันทั้งวัตถุ ทั้งนี้การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 2.20

$$\ln \frac{T_s - T_b}{T_{ini} - T_b} = - \frac{hA_s}{\rho VC_p} t \quad (2.20)$$

โดย

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2K)

A_s คือ พื้นผิวที่รับความร้อน (m^2)

t คือ เวลา (s)

V คือ ปริมาตรวัตถุ)

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

T_b คือ อุณหภูมิที่เบด ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ini} คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุล้มปี่ ($^{\circ}\text{C}$)

อย่างไรก็ตามวิธีการของ Lump analysis ใช้วิเคราะห์สำหรับวัตถุที่มีการนำความร้อนภายในวัตถุสูงๆ เท่านั้น โดยวิธีการดังกล่าวจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ ค่า Biot (B_i) ของวัตถุมีค่าน้อยกว่า 0.1 เท่านั้น ค่า Biot หาได้จากสมการ

$$B_i = \frac{hL_s}{k_s} < 0.1 \quad \text{โดยที่} \quad L_s = \frac{V}{A_s} \quad (2.21)$$

เมื่อ

B_i = Biot Number

L_s = ค่าความยาวคุณลักษณะ

k_s = ค่าการนำความร้อนของทองแดง ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

A_s = พื้นที่ผิวทรงกระบอกทั้งหมด (m^2)

V = ปริมาตรทรงกระบอก (m^3)

ρ = ความหนาแน่นของวัตถุล้มปี่ (kg/m^3)

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

จากรูปที่ 2.18 - 2.19 แสดงผลกระทบของลักษณะการวัดตามแนวขวางและแนวยาวที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พบว่าการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มุม 0 องศา ($\beta = 0$) มีค่าน้อยกว่าในการวัดในมุมอื่นๆ อธิบายได้จากการวัดที่ตำแหน่ง 180 องศา ($\beta = 180$) มีอัตราการไหลที่มากกว่า ในกรณีนี้การพาความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างอุปกรณ์วัด (Probe) กับเฟสของฟองอากาศ (Bubble phase) หรือเฟสของผสม (Emulsion phase) เนื่องจากความร้อนที่ได้จากเฟสที่เป็นแก๊สมีค่าน้อยจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้มาจากเฟสของฟองอากาศที่มุมวัดด้านบน (Upward) มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้มาจากเฟสของผสมที่มุมวัดด้านล่าง (Backward)

$$h = (1 - f_b) \left(k_e \rho_e C_{p,c} \frac{n_w}{1 - f_b} \right) \quad (2.22)$$

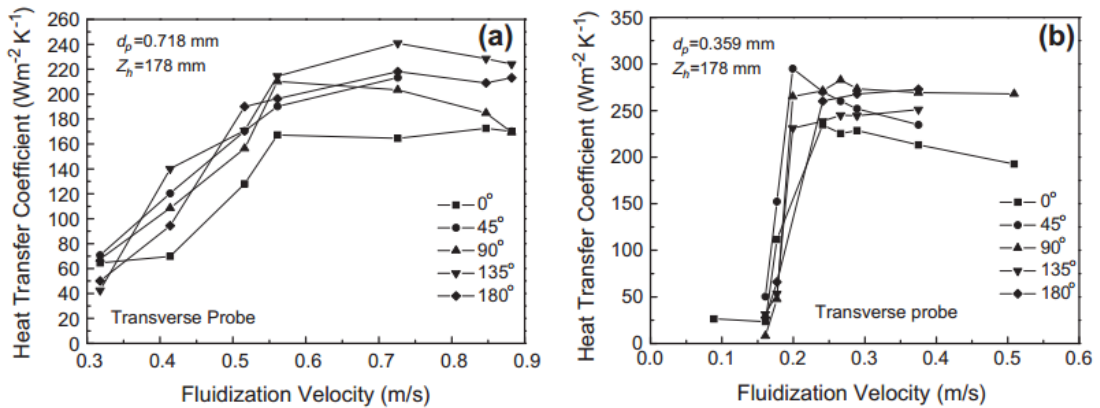
เมื่อ f_b คือ เวลาในการสัมผัสกันระหว่างฟองอากาศและอุปกรณ์วัด

k_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

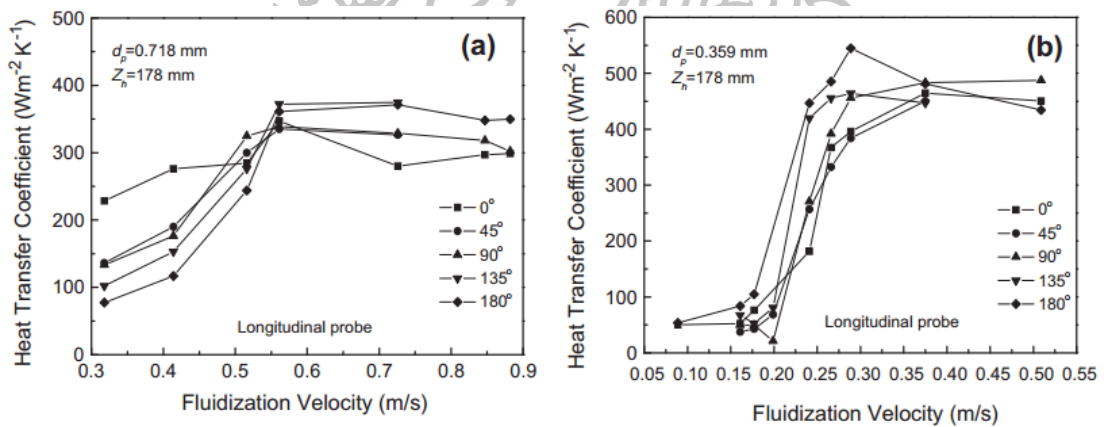
ρ_e คือ ค่าความหนาแน่นของเฟสของผสม (Kg/m^3)

C_{pc} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($W \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

n_w คือ ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (s^{-1})



รูปที่ 2.18 ผลกระทบของโพรบวัดตามแนวขวางที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [4]



รูปที่ 2.19 ผลกระทบของตำแหน่งการวัดตามแนวยาวที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [4]

2.4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้หลักการการนำความร้อน 1 มิติ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการสร้างเครื่องมือจากหลักการการนำความร้อนใน 1 มิติ มาสร้างเป็นเครื่องมือซึ่งเหมาะสำหรับการทดลองแบบสภาวะทั่วไป (cold test) ดังแสดงรูปที่ 2.20 โดยเครื่องมือประกอบด้วยท่อทำจากทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางผ่านนอก 25.4 mm ยาว 80 mm จากนั้นทำการเจาะรูที่ตรงกึ่งกลางท่อเพื่อใส่อุปกรณ์ให้ความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 16 mm ยาว 50 mm ที่ปลายทั้งสองด้านของท่อติดตั้ง Teflon เพื่อป้องกันการนำความ

ร้อนจากด้านข้างของวัตถุและติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในทองแดง [14] จากนั้นใช้สมการที่ 2.23 ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$$h = \frac{Q}{A_s(T_s - T_b)} = \frac{IV}{A_{surface}(T_s - T_b)} \quad (2.23)$$

โดย

Q คือ ความร้อนที่ได้รับ (W)

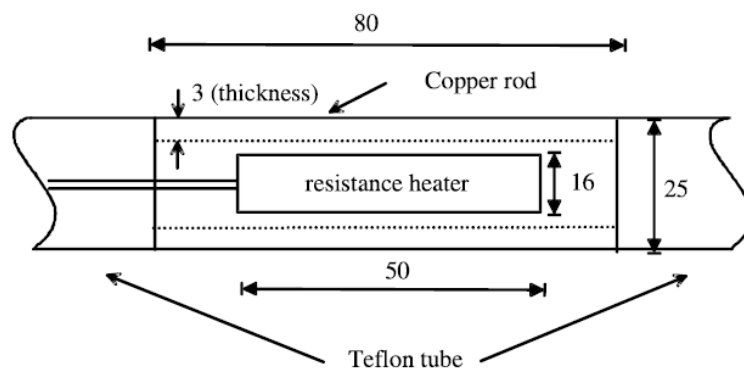
A_s คือ พื้นที่ผิวที่รับความร้อน (m^2)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อน (Amp)

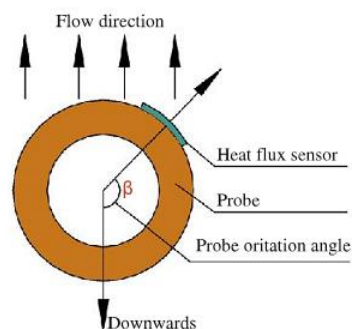
V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ให้ความร้อน (Volt)

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

T_b คือ อุณหภูมิที่เบด ($^{\circ}C$)



รูปที่ 2.20 เครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบใช้หลักการ 1 มิติ [14]



รูปที่ 2.21 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบสำเร็จรูป [15]

2.4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์โดยใช้เครื่องมือสำเร็จรูป (Thin film sensor)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาได้ทำการศึกษารายละเอียดการถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศที่สภาวะสิ่งแวดลอม โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์สำเร็จรูปในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Thin film sensor) ดังแสดงรูปที่ 2.22 ซึ่งให้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ชนิดนี้มีราคาที่สูงทั้งยังมีความทนทานที่ต่ำเมื่อนำไปใช้กับการทดลองที่อุณหภูมิสูง [15]

จากการศึกษารายละเอียดการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนข้างต้น จะพบว่า ในการใช้วัสดุลัมป์มีสมการที่ยุ่ยากกว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุลัมป์ยังคงให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ถูกต้อง ทั้งยังเป็นเครื่องมือที่ทำได้ง่ายและค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ที่ต่ำอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยนี้จึงนำวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบลัมป์มาใช้

2.5 การสร้างสมการเพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

เพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์ผลการทดลองและลดความยุ่งยากในการแก้ปัญหาสามารถนำเอาความสัมพันธ์ของปริมาณทางฟิสิกส์ที่ได้จากการสังเกตและทดลอง มาวิเคราะห์ในรูปของเทอมตัวแปรไร้มิติ [22] โดยนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์มาใช้ ซึ่งการวิเคราะห์มีด้วยกันสองวิธี คือ

2.5.1 วิธีของเลย์ไลท์ซ์ คือ การวิเคราะห์ที่ทำในรูปความสัมพันธ์การยกกำลัง โดยกำหนดให้ ϕ เป็นฟังก์ชันใด ๆ ซึ่งแปรผันตามฟังก์ชัน $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n$ ซึ่งสามารถเขียนในความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.24

$$\phi = f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n) \quad (2.24)$$

ในการทดลองใด ๆ นั้นมักจะมีค่าคงที่ C ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติเหมือนตัวปรับแก้ค่าที่ได้จากการทดลอง จะได้สมการ 2.25 เป็น

$$\phi = C(\phi_1^a, \phi_2^b, \phi_3^c, \dots, \phi_n^n) \quad (2.25)$$

โดยในกรณีตัวแปรต้นมีจำนวนมาก วิธีของเลย์ไลท์ซ์จะมีความยุ่งยากมาก

2.5.2 วิธีของบัคลิงแฮม-ไพล์ คือวิธีการวิเคราะห์โดยเป็นการจัดกลุ่มกำลังของตัวแปร ให้เข้ารูปอยู่ในแบบของตัวแปรไร้มิติ ในการวิเคราะห์ของ บัคลิงแฮม-ไพล์ นั้นอาศัยข้อมูลของการทดลองมาจัดกลุ่มให้อยู่ในเทอร์มที่เรียกว่า เทอร์มของไพล์, π ซึ่งแปรผันตามตัวแปรจำนวน n ตัว จำนวนของเทอร์มไพล์ จะมีค่าเท่ากับจำนวนของตัวแปร n ลบด้วยจำนวนมิติพื้นฐาน m ตัว

ก. ในที่นี้มีตัวแปรจากการทดลองจำนวน n ตัว : A_1, A_2, \dots, A_n

จะได้
$$F(A_1, A_2, \dots, A_n) = 0 \quad (2.26)$$

ข. มิติพื้นฐานจำนวน m ตัว : MLT or FLT

ค. จะมีเทอร์มไพล์เป็น $n-m$ ตัว : $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}$

ซึ่งสามารถนำตัวแปรเหล่านี้เขียนในรูปฟังก์ชันเป็น

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (2.27)$$

หาค่าพารามิเตอร์ของกลุ่ม π โดยทำการเลือกมิติพื้นฐาน m ของตัวแปร A ที่มีค่าแตกต่างกันที่ปรากฏอยู่ใน m และเลือกค่ามิติอื่นเป็นตัวแปรซ้ำ ถ้า A_1, A_2, A_3 เป็นตัวแปรที่ประกอบด้วยมิติพื้นฐาน M, L และ T ดังนั้นจะได้กลุ่ม π เป็น

$$\pi_1 = A_1^{x_1}, A_2^{y_1}, A_3^{z_1}, A_4$$

$$\pi_2 = A_1^{x_2}, A_2^{y_2}, A_3^{z_2}, A_4$$

$$\pi_{n-m} = A_1^{x_{n-m}}, A_2^{y_{n-m}}, A_3^{z_{n-m}}, A_4$$

สมการที่ได้มีลักษณะเป็นสมการชี้กำลัง (Exponential) ซึ่งสามารถทำการคำนวณได้ ดังนั้นในแต่ละเทอร์ม π จะเป็นค่าไร้มิติ โดยที่กำหนดให้ชี้ตของตัวเลขชี้กำลังของมิติพื้นฐาน M, L และ T มีค่าเท่ากับศูนย์

2.5.3 การวิเคราะห์มิติแบบตัวแปรไร้มิติตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดไดซ์เบด จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเทอมไร้มิติ ซึ่งเทอมไร้มิติบางตัวรู้จักแพร่หลายตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์หรือวิศวกรผู้ค้นพบ [7,26] ดังนี้

1) Reynolds Number (Re)

การเปลี่ยนแปลงการไหลจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน จะขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหล ความหนาแน่น และความหนืดของของไหล รวมทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ Reynolds number เป็นตัวเลขที่แสดงถึง อัตราสวนของแรงจากความเฉื่อย ต่อแรงจากความหนืดที่กระทำต่อของไหล ดังสมการ

$$Re = \rho_g U d_p / \epsilon \mu_g \quad (2.28)$$

เมื่อ ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m^3

- U คือ ความเร็วอากาศในการทำฟลูอิดไดซ์เซชัน ณ จุดใดๆ, m/s
 d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเบต, m
 μ_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซ, $kg/m \cdot s$
 ε คือ ค่าการยกตัวของอนุภาคเบต

2) Prandtl Number (Pr) เป็นปริมาณไร้มิติ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของของไหลในการส่งผ่านโมเมนตัมในของไหลเมื่อเทียบกับการส่งผ่านความร้อนในของไหล

$$Pr = C_{p,g} \mu_g / k_g \quad (2.29)$$

- เมื่อ $C_{p,g}$ คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ, $J/kg \cdot K$
 μ_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซ, $kg/m \cdot s$
 k_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซ, $W/m \cdot K$

3) Nusselt Number (Nu) มีประโยชน์ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) โดยจะขึ้นอยู่กับ Reynold Number และ Prandtl Number เป็นหลัก Nusselt Number สามารถหาได้ดังสมการ

$$Nu = h d_p / k_g \quad (2.30)$$

- เมื่อ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 K$
 d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค, m
 k_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซ $W/m \cdot K$

4) Archimedes Number (Ar) ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่น Archimedes Number เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงหนืด สามารถหาได้ดังสมการ

$$Ar = d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) / \mu_g^2 \quad (2.31)$$

- เมื่อ d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค, m
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m^3
 ρ_s คือ ความหนาแน่นของอนุภาคเบต, kg/m^3
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก, m/s^2
 μ_g คือ ค่าความหนืดของก๊าซ, $kg/m \cdot s$

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

สำหรับในการวิจัยเรื่อง “การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผลิตโดซ์เบตชนิดหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด” มีรายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย ดังนี้

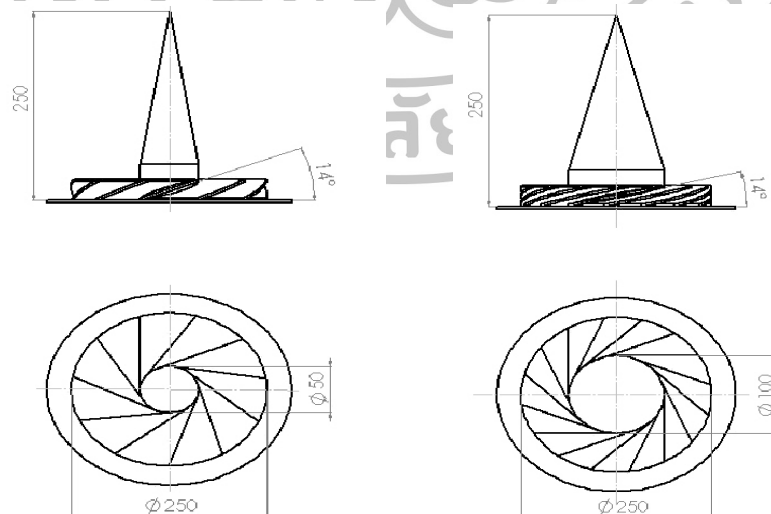
3.1 อุปกรณ์การทดลอง

3.1.1. มานอมิเตอร์ (Manometer)

มานอมิเตอร์ (U-tube manometer) ใช้ในการวัดความดันตกคร่อมระหว่างเบตและแรงดันตกคร่อมระหว่างแผ่นออริฟิสเพื่อใช้ควบคุมอัตราการไหล

3.1.2 แผ่นกระจายอากาศแบบใบพัด

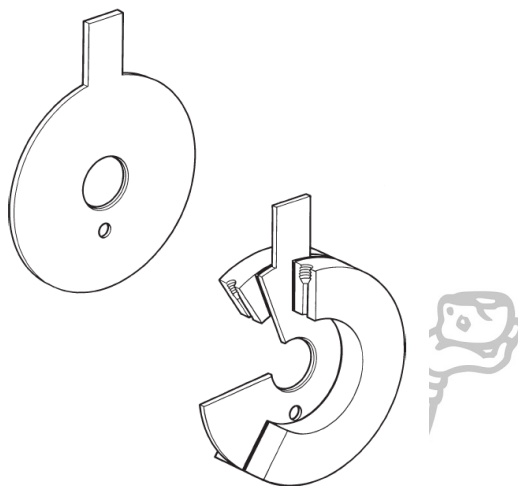
แผ่นกระจายอากาศแบบใบพัด เป็นแผ่นกระจายอากาศที่มีลักษณะเป็นใบพัด ซึ่งมีจำนวน 11 ใบ และ 16 ใบ ซึ่งมี $S_w = 2.76$ และ 2.98 ตามลำดับ โดยมีพื้นที่หน้าตัดทางออกของใบพัดรวม 165.60 cm^2 และ 70.3 cm^2 ตามลำดับ โดยหัวกระจายอากาศ 11 ใบ และ 16 ใบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (d_o) 0.25 m ในขณะที่ใบพัด $S_w = 2.76$ และ 2.98 มีเส้นผ่านศูนย์กลางคัม (hub diameter, d_h) ของหัวกระจายลม 0.05 m และ 0.1 m ตามลำดับ มีตะแกรง 3 ชั้น วางตะแกรงกันเพื่อป้องกันทรายร่วงหล่นลงท่ออากาศ สำหรับแผ่นกระจายนี้จะมีส่วนทรงกระบอกเส้นผ่านขนาด 70 mm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรงที่ป้องกันทราย 250 mm ดังแสดงใน รูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผ่นกระจายอากาศแบบใบพัดที่มี swirl number (k) 2.76 และ (k) 2.98

3.1.3 แผ่นออริฟิส (Orifice plate)

แผ่นออริฟิสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 50 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่น 110 mm ใช้ในการสร้างความดันต่างระหว่างสองจุดคร่อมตัวแผ่นออริฟิสเอง และท่อที่ติดตั้งแผ่นออริฟิสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 105 mm จุดวัดความดันที่ด้านอากาศทางเข้าห่างจากแผ่นออริฟิสเท่ากับ 105 mm ทางด้านออกห่างจากแผ่นออริฟิสเท่ากับ 525 mm



รูปที่ 3.2 แผ่นออริฟิส

3.1.4.พัดลมป้อนอากาศปฐมภูมิ

พัดลมป้อนอากาศรุ่น APEF-711/A มีกำลังมอเตอร์ขนาด 7.5 hp ความเร็วรอบมอเตอร์ 2900rpm ความดันสูงสุดที่ทำได้ 975 mmH₂Oและอัตราการป้อนอากาศสูงสุด 30 m³/s ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 พัดลมอากาศปฐมภูมิ (Blower)

3.1.5 วาล์วควบคุมอัตราการไหล

วาล์วที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดเกจวาล์วติดตั้งอยู่ระหว่างท่ออากาศปฐมภูมิกับพัดลม ใช้ในการปรับอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของวาล์ว 4 นิ้ว และบอลวาล์วถูกติดตั้งกับพัดลมทุติยภูมิ เพื่อใช้ควบคุมอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและการตติยภูมิซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของวาล์ว 2 นิ้ว

3.1.6 พัดลมป้อนอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ

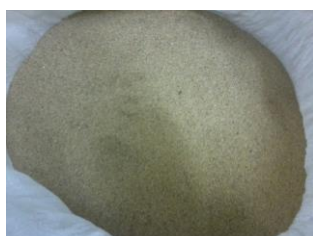
พัดลมป้อนอากาศรุ่น APE-711/A มอเตอร์ขนาด 7.5 hp เป็น high-pressure blower ความเร็วรอบมอเตอร์ 2900 rpm, ความดันสูงสุดที่ทำได้ 975 mmH₂O และอัตราการป้อนอากาศ 8 m³/minute



รูปที่ 3.4 พัดลมทุติยภูมิ (Blower)

3.1.7 วัสดุเบด

วัสดุเบดที่ใช้ในการทดลองคือ ทรายซิลิกาขนาด 300–500 μm , 600–710 μm และ 710–1000 μm เป็นอนุภาคกลุ่ม B ตาม Geldart's classification ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 1700 1660 และ 1640 kg/m³ ตามลำดับ



ก)



ข)

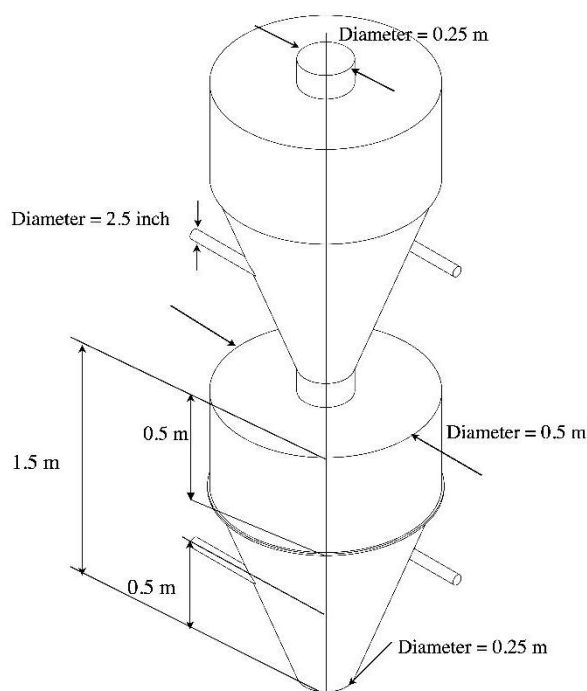


ค)

รูปที่ 3.5 ทรายซิลิกาขนาดอนุภาค ก) 300–500 μm ข) 600–710 μm และ ค) 710–1000 μm

3.1.8. เตาไซโคลนแฝด

เตาไซโคลนแฝดถูกสร้างด้วยหลักการของไซโคลนตักฝุ่น ซึ่งใช้แรงศูนย์กลางในการดักจับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และชีวมวล (solid fuel และ unburn carbon) ไม่ให้หลุดลอยจากเตาในชั้นล่างเข้าสู่ชั้นบนโดยเตามีความสูง 1 m ทำมุม 40° วัดจากแนวดิ่ง เส้นผ่านศูนย์กลางฐานกรวยหรือส่วนที่ติดระบบกระจายอากาศ 0.25 m มีท่อลมป้อนอากาศทางด้านล่างผ่านแผ่นกระจายอากาศก่อนเข้าสู่เบตตามลำดับ และมีส่วนทรงทรงกระบอกสูง 0.5 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5 m ถูกประกอบขึ้นให้เป็นไซโคลนแฝด และมีการติดตั้งท่ออากาศทุติยภูมิและตติยภูมิอยู่ในแนวรัศมีของเตา โดยมีความสูง 0.5 m และ 2.125 m วัดจากหัวกระจาย ความสูงเตารวม 3.25 m รายละเอียดตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เตาไซโคลนแฝด

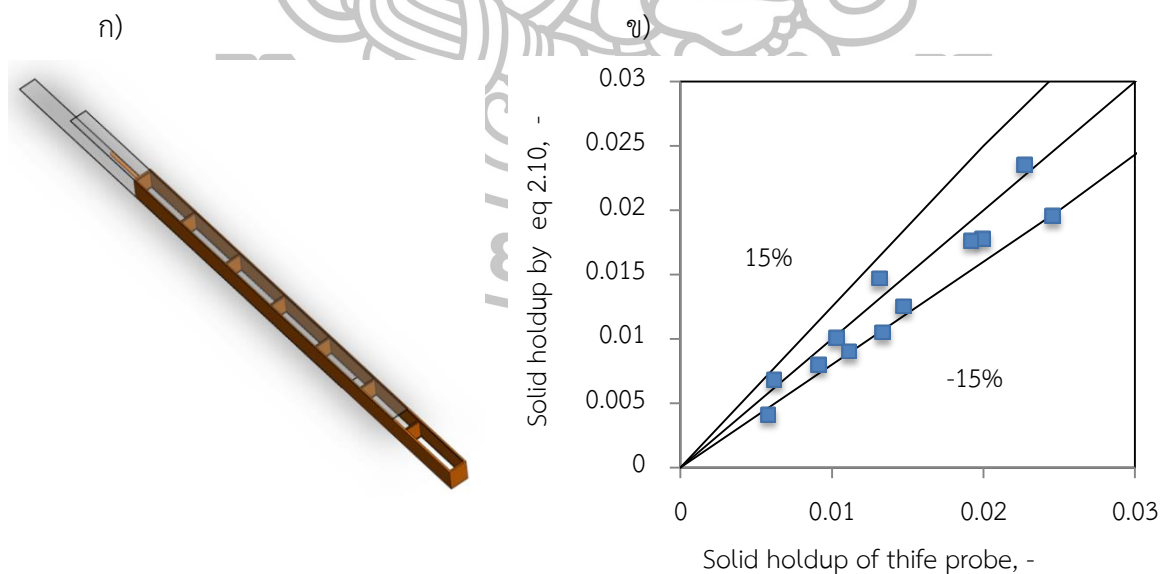
3.2 เครื่องมือเก็บค่าการยกตัวของอนุภาค (Thief probe)

3.2.1 เครื่องมือวัดค่าการยกตัวของอนุภาคในงานวิจัยนี้ ได้นำผลงานการประดิษฐ์เครื่องมือของ J.Chen et al. (2008) มาใช้ในการหาค่ายกตัวของอนุภาค โดยเครื่องมือมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ถูกแบ่งเป็นช่องเท่าๆกัน จำนวน 7 ช่อง เพื่อใช้ในการเก็บค่าในแนวรัศมีของเตา มีแผ่นปิดสำหรับสไลด์อย่างรวดเร็วเพื่อปิดช่องของเครื่องมือสำหรับเก็บค่าการยกตัว ซึ่งเครื่องมือถูกสร้างให้มีขนาดต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับลักษณะของเครื่องมือสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขนาดของอุปกรณ์วัดค่าการยกตัวของอนุภาค

วัดที่ตำแหน่ง (cm)	ขนาดต่อหนึ่งช่อง			ความยาวรวม (m)	ปริมาตรต่อหนึ่งช่อง (m ³)
	กว้าง(m)	ยาว(m)	สูง(m)		
40	0.013	0.072	0.019	0.53	0.0000178
50	0.013	0.089	0.019	0.65	0.0000219
60	0.013	0.099	0.019	0.72	0.0000245
125	0.013	0.138	0.019	1.00	0.0000341

แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความถูกต้องของอุปกรณ์โดยทำการสอบเทียบเครื่องมือโดยทำการทดลองจากสมการที่ 2.10 ขนาดเบดคือ 300–500 600–710 และ 710–1000 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $U_{mf} - 3U_{mf}$ ทำการเก็บอนุภาคที่ 50 cm เหนือหัวกระจายอากาศ และเก็บค่าการยกตัวของอนุภาคเทียบกับสมการการยกตัวของอนุภาคกึ่งแสดงผลในรูปที่ 3.7 ข) การหาค่าความหนาแน่นของอนุภาคโดยวิธีความหนาแน่นรวม (Bulk density) ตามมาตรฐาน ASTM E-873 โดยใส่อนุภาคภาชนะรองรับที่มีขนาด 1 ft³ ให้ตกอย่างอิสระลงมาที่อย่างอิสระ 2-5 ครั้งซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นของอนุภาค 300-500 600-710 และ 710-1000 μm เท่ากับ 1700.00 1660.60 และ 1640.26 kg/m³ ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์วัดค่ายกตัวของอนุภาค ก) เครื่องมือเก็บค่าการยกตัวของอนุภาคเบด และ ข) กราฟแสดงการสอบเทียบจากการคำนวณกับการทดลองจากเครื่องมือ [8]

3.2.2 การหาค่ายกตัวของอนุภาค สามารถดำเนินการหาค่าได้ดังนี้

- 1) ทำการสอบเทียบเครื่องมือ
- 2) ทำการชั่งอนุภาคเบดที่อยู่ใน Thief probe ทีละช่อง
- 3) ทำการหาปริมาตรแต่ละช่องของ Thief probe
- 4) ทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นในการแขวนลอย (Density suspension) ดังสมการ 3.1

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

โดย

- ρ คือ density suspension (kg/ m³)
 m คือ มวลของอนุภาคที่วัดได้ (kg)
 V คือ ปริมาตรของ thief probe 1 ช่อง (m³)

- 5) ทำการเปลี่ยนค่าความหนาแน่นในการแขวนลอยเป็นค่าการยกตัวของอนุภาค (solid hold-up) ดังสมการ 3.2

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho_p} \quad (3.2)$$

โดย

- ρ คือ density suspension (kg/m³)
 ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนั้น (kg/m³)
 ε คือ ค่าการยกตัวของอนุภาค

3.3 อุปกรณ์เครื่องมือตรวจวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

3.3.1 สำหรับเครื่องมือตรวจวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้พัฒนาจากงานวิจัยของ Jerry S. และคณะ (2006) โดยใช้คุณสมบัติของลัมป์ในการตรวจวัด ซึ่งจะมีด้วยกัน 2 ขนาด เพื่อใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในทรงกรวย ซึ่งมีขนาด 750 mm และขนาด 1150 mm เพื่อใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในส่วนองศาที่เป็นทรงกระบอก สำหรับอุปกรณ์การวัดจะถูกทำขึ้นจากท่อที่เป็นฉนวนเพื่อใช้เป็นโครงสร้าง ซึ่งใต้ท่อจะเป็นวัสดุลัมป์ (ในที่นี้คือทองแดง) ติดตั้งอยู่ด้านนอกท่อฉนวน ดังแสดงขนาดในรูปที่ 3.8 ก) โดยให้ส่วนของลัมป์สัมผัสกับกับสภาวะแวดล้อมที่ทำการวัดและติดอยู่ในลักษณะเป็นผิวสัมผัสกับท่อ จากนั้นทำการฝังเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ตัวอุปกรณ์ลัมป์เพื่อใช้วัดอุณหภูมิ ทั้งนี้ตัวท่อจะทำการทำให้เป็นฉนวนทั้งด้านบนและด้านข้างของท่อ เพื่อป้องกันความร้อนจากทิศทางอื่นๆ สำหรับคุณลักษณะทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุลัมป์แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุลัมป์

คุณลักษณะ	วัสดุลัมป์
เส้นผ่านศูนย์กลาง, mm	9.525
ความยาว, mm	25.4
พื้นที่ผิวรวม, m^2	9.0257×10^{-4}
ปริมาตร, m^3	7.24×10^{-6}
ความหนาแน่น, kg/m^3	8933
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ, J/kgK	385
ค่าการนำความร้อน, W/mK	401

เพื่อให้มีความถูกต้องของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจึงได้นำกลาumasobเทียบกับให้ความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งอาศัยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection) ที่เกิดจากการพาความร้อนของน้ำที่มีอุณหภูมิคงที่จากสมการที่ 3.3 จากนั้นเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจากอุปกรณ์ลัมป์ โดยแสดงรายละเอียดการทดสอบอุปกรณ์ไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งผลการสอบเทียบดังแสดงในรูปที่ 3.8 ข)

$$Nu = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559 Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.3)$$

$$\text{โดย } Ra_D = \frac{g \beta D^3 (T_s - T_\infty)}{\nu \alpha}$$

Ra_D คือ Rayleigh number

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร, $1/K$

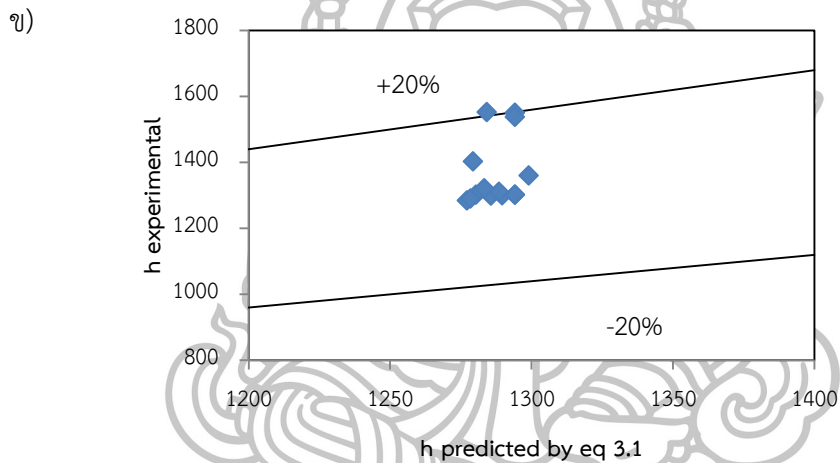
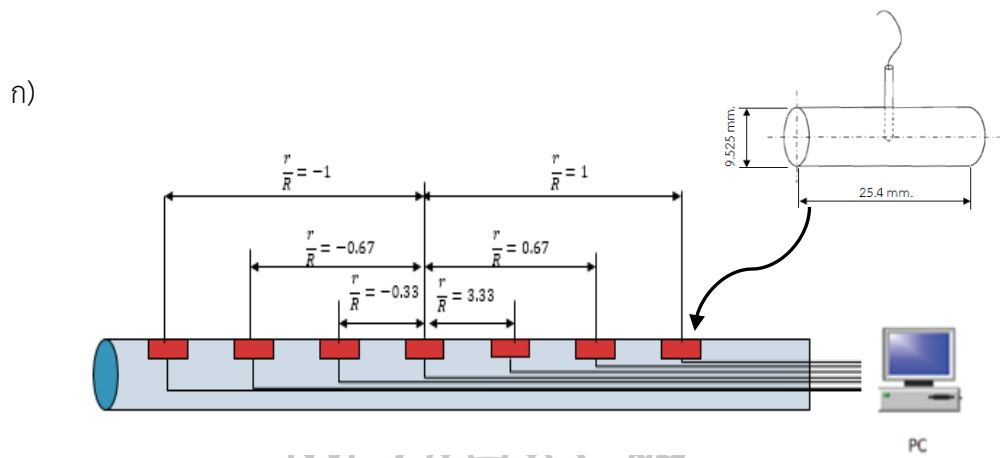
D คือ ขนาดของวัสดุลัมป์ (m)

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

T_∞ คือ อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม ($^{\circ}C$)

ν คือ ค่าความหนืดของของไหล ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (m^2/s)



รูปที่ 3.8 ก) แสดงส่วนประกอบอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และ ข) กราฟแสดงการสอบเทียบอุปกรณ์ที่จากลัมปีเทียบกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

3.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากวัสดุลัมปี สามารถแสดงได้ดังนี้

- 1) ติดตั้งวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องมือเก็บข้อมูล (Data logger)
- 2) ทำการใส่วัสดุลัมปีเข้าสู่เตา จากนั้นรอประมาณ 30 นาที จึงดึงวัสดุลัมปีออก
- 3) นำข้อมูลมาคำนวณด้วยสมการที่ 2.20
- 4) ทำการพลอตกราฟระหว่าง $\ln \frac{T_s - T_m}{T_{ini} - T_m}$ กับเวลา

โดย

T_s คือ อุณหภูมิของวัสดุลัมปี ณ เวลาใดๆ ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ini} คือ อุณหภูมิของวัสดุลัมปี ณ เวลาเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)

T_m คือ อุณหภูมิเบตเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)

- 5) นำ Slope ที่ได้จากกราฟในข้อ 4 มาคำนวณด้วยสมการ

$$h = slope \times \left(\frac{\rho V C_p}{A} \right) \quad (3.4)$$

3.4 การวางแผนการทดลอง

การวางแผนการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นแผนการดำเนินงานโดยรวมของงานวิจัยนี้และแผนการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 แผนการดำเนินงาน

- 1) จัดการติดตั้งระบบเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน
- 2) กำหนดตัวแปรของการวิจัยที่ต้องการศึกษา คือ ขนาดอนุภาคเบด ความเร็วอากาศปฐุมุมุมิ สัดส่วนความเร็วอากาศตูดิยุมุมิ,ตูดิยุมุมิต่ออากาศปฐุมุมุมิ ตำแหน่งความสูงในการวัดตำแหน่งการวัดในแนวรัศมี อุณหภูมิเบดและหัวกระจายอากาศ โดยค่าของตัวแปรของการวิจัยจะมีการปรับให้แตกต่างกัน คือ ขนาดอนุภาคเบดที่ 300–500 μm 600–710 μm และ 710–1000 μm อากาศปฐุมุมุมิตั้งแต่ $U_{mf}-3U_{mf}$ โดยมีสัดส่วนความเร็วอากาศตูดิยุมุมุมิ,ตูดิยุมุมุมิต่ออากาศปฐุมุมุมุมิ 0 0.3 และ 0.5 ตำแหน่งความสูง เท่ากับ 40 50 60 125 cm โดยวัดจากหัวกระจายอากาศสำหรับการทดลองอุทกพลศาสตร์การไหล และ 60 125 212.5 และ 287.5 mm เหนือหัวกระจายอากาศสำหรับการทดลองการถ่ายเทความร้อน โดยตำแหน่งการวัดในแนวรัศมี ± 1 , $\pm 2/3$, $\pm 1/3$ และ 0 ของทั้งสองการทดลอง และหัวกระจายอากาศที่มี swirl number 2.76 และ 2.98
- 3) ดำเนินการทดลองอุทกพลศาสตร์ที่เกิดจากอากาศปฐุมุมุมุมิเพียงอย่างเดียวทั้ง 2 หัวกระจายอากาศ ที่สภาวะสิ่งแวดลอม
- 4) เก็บค่า $\Delta P-U$ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทดลองขั้นต่อไป
- 5) ดำเนินการทดลองอุทกพลศาสตร์ที่เกิดจากอากาศตูดิยุมุมุมิ,ตูดิยุมุมุมิ ที่เบดอุณหภูมิ สภาวะสิ่งแวดลอมตามเงื่อนไขข้อ 2 เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบสำหรับอธิบายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน
- 6) เก็บค่าการยกตัวของอนุภาคตามแนวความสูงและแนวรัศมี ตามเงื่อนไขข้อ 2
- 7) ดำเนินการทดลองการถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน ตามเงื่อนไขข้อ 2 โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบดให้อยู่ที่ 300 °C
- 8) เก็บค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามแนวความสูงและแนวรัศมี ตามเงื่อนไขข้อ 2
- 9) วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งสามารถสมการไร้มิติเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงขอบเขตการทดลอง

Operating variable		Ranged
ค่าการหมุนวนของใบพัด		2.76 และ 2.98
ขนาดอนุภาคเบด (μm)		300-500 600-710 และ 710-1000 μm
ความสูงเบด (cm)		30
ตำแหน่งความสูงในการวัดเหนือหัวกระจายอากาศ (mm)		60 125 223 และ 288
อุณหภูมิเบด ($^{\circ}\text{C}$)	อุทกพลศาสตร์	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
	การถ่ายเทความร้อน	300
$(Q_s+Q_T)/Q_p$ ratio		0, 0.3, 0.5
ความเร็วอากาศปฐุมุมิ		U_{mf} , $1.5U_{mf}$, $2U_{mf}$, $2.5U_{mf}$ และ $3U_{mf}$

3.4.2 แผนการทดลอง

แผนการทดลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดหมุนวนภายในเตาไซโคลน แผลด คือ การศึกษาอุทกพลศาสตร์ การศึกษาอุทกพลศาสตร์ที่เกิดจากอากาศทุติยภูมิ, ตติยภูมิ และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน โดยทำการทดลองตามขอบเขต ดังแสดงในตารางที่ 3.3 สำหรับการปรับค่าอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิสามารถ ดำเนินการดังนี้ 1) ดำเนินการปรับความเร็วของอากาศปฐุมุมิตามสภาวะที่ต้องการ จากนั้น ดำเนินการหาอัตราการไหลของอากาศปฐุมุมิ ($Q_p = \text{superficial velocity} \times \text{พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศปฐุมุมิ}$)

2) หาความผลรวมการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิซึ่งหาจาก

$$(Q_s+Q_T) = \text{สัดส่วนที่ต้องการปรับ (0, 0.3 และ 0.5)} \times Q_p$$

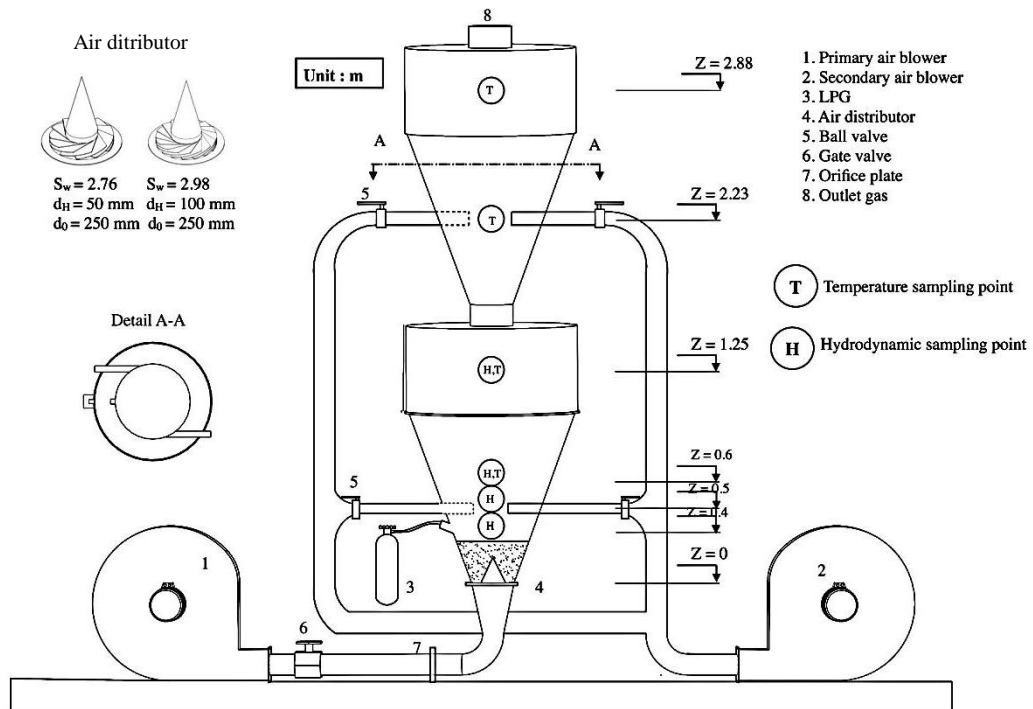
3) จากนั้นดำเนินการหาความเร็วของอากาศที่จะปรับให้เข้าท่อ (หลักเกณฑ์คือ $Q_s = Q_T$) ดังนี้

$$V_{ST} = \left(\frac{Q_s + Q_T}{4} \right) / A_{pipe} \quad (3.5)$$

โดย

V_{ST} คือ ความเร็วอากาศทุติยภูมิหรืออากาศตติยภูมิ

A_{pipe} คือ พื้นที่หน้าตัดท่ออากาศทุติยภูมิหรือตติยภูมิ



รูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งการทดลอง และแสดงตำแหน่งการวัดค่าการทดลอง

3.5 การติดตั้งการทดลองและตำแหน่งการวัด

สำหรับในการติดตั้งการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 จากรูปประกอบด้วยท่ออากาศปฐมภูมิซึ่งมีหน้าที่สำหรับทำฟลูอิดไดซ์เซชัน โดยมีเกทวาล์วทำหน้าที่ปรับปริมาณอากาศที่เข้าสู่เตา ทั้งนี้เตายังมีท่ออากาศทุติยภูมิเพื่อทำให้อากาศในเตาหมุนวนยิ่งขึ้น ซึ่งอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิสามารถปรับความอากาศด้วยบอลวาล์วซึ่งมีทั้งหมด 4 ตัว นอกจากนี้ได้ทำการติดตั้ง LPG เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเบด และติดตั้งบาร์มิเตอร์เพื่อวัดค่าความดันตกคร่อมระหว่างเบดอีกด้วย

3.6 การสร้างสมการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ในการสร้างสมการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแสดงได้ดังนี้

3.6.1 ทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

3.6.2 นำตัวแปรในข้อ 1 มาจัดพจน์ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ ด้วยวิธีการของ Buckingham's Pi Method

3.6.3 นำตัวแปรไร้มิติที่ได้ ใส่ดำเนินการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์

3.6.4 ตรวจสอบความถูกต้องของสมการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่มีอยู่ ด้วยค่า *R-Squared* และควบคู่กับค่าการกระตัวของสมการ (*MBD*) เพื่อใช้ตัดสินใจสมการที่เหมาะสมในการนำไปใช้มากที่สุด

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{model,i} - X_{obs,i})}{N} \quad (3.5)$$

ซึ่ง

$X_{model,i}$ = ค่าที่ได้จากโมเดล

$X_{obs,i}$ = ค่าจริงที่ได้

N = จำนวนข้อมูล



บทที่ 4

ผลการทดลอง

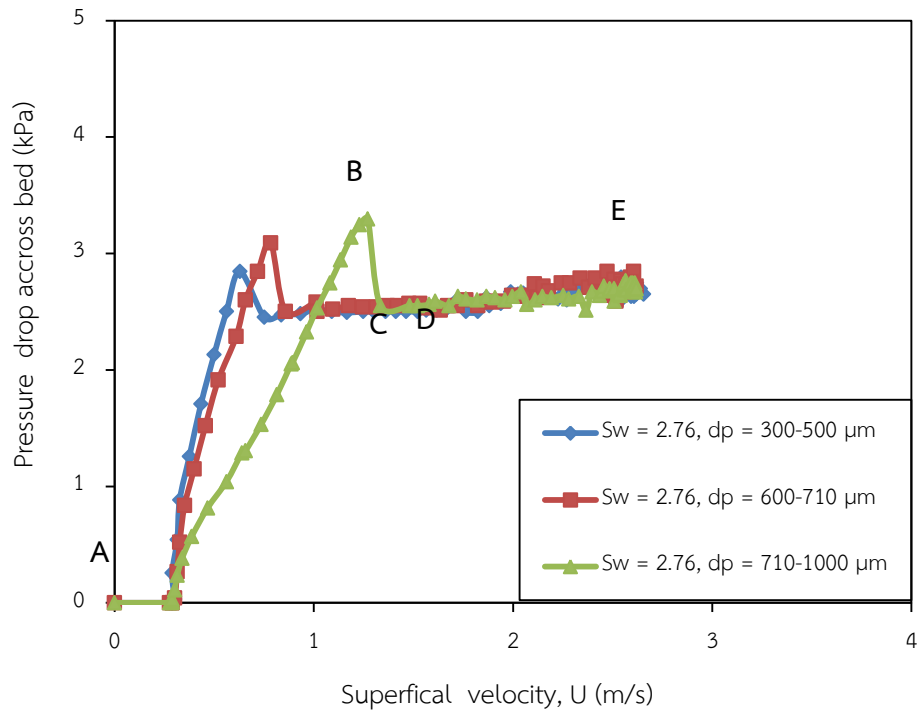
เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ง่ายต่อผู้ศึกษางานวิจัย ในงานวิจัยในส่วยผลการทดลอง จะดำเนินการแสดงผลการทดลองโดยแบ่งเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้ 1) อุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดได้ซ์เซชันแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด 2) การยกตัวของอนุภาคเบตภายในเตาไซโคลนแฝด 3) อุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งใดๆภายในเตาฟลูอิดซ์เบตแบบไซโคลนแฝด 4) การถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดได้ซ์เซชันแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด และ 5) การสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรไว้มิติเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดได้ซ์เบตแบบหมุนวนไซโคลนแฝด โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 อุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดได้ซ์เซชันแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด

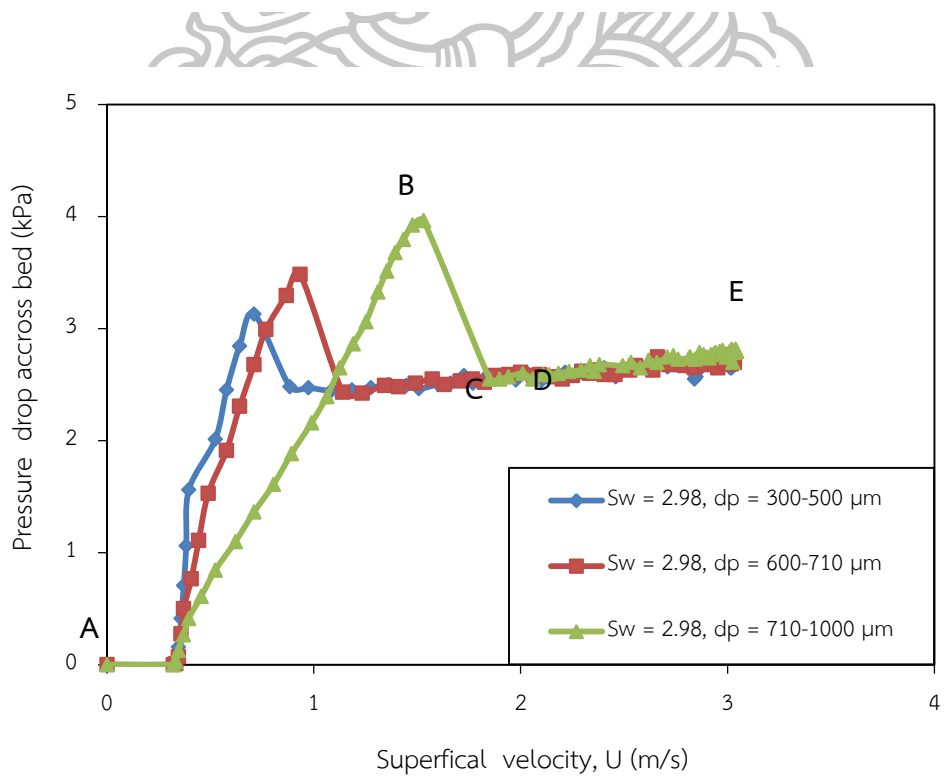
สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดได้ซ์เบตชนิดหมุนวนที่เกิดขึ้นโดยดำเนินการทดลองภายในเตาฟลูอิดซ์เบตหมุนวนชนิดไซโคลนแฝดและดำเนินการเก็บข้อมูลจากความเร็วของอากาศ (Superficial velocity, U) ที่เข้าสู่แผ่นกระจายอากาศกับค่าความดันตกคร่อมระหว่างเบต (Pressure drop across bed, ΔP) เพื่อนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของฟลูอิดได้ซ์เซชันแบบหมุนวนและใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการทดลองในส่วนของการถ่ายเทความร้อนต่อไป

4.1.1 พฤติกรรมของฟลูอิดได้ซ์เซชันแบบหมุนวนสำหรับหัวกระจายอากาศสำหรับใบพัดที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 4.1ก)–ข) แสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมระหว่างเบตกับความเร็วฟลูอิดได้ซ์เซชันของเบตทั้ง 3 ขนาดที่หัวกระจายอากาศที่มี Swirl number (S_w) เท่ากับ 2.78 และ 2.98 จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1ก) พบว่าก่อนเริ่มเกิดฟลูอิดได้ซ์เซชันความดันตกคร่อมระหว่างเบตที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบ $S_w=2.76$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศอย่างต่อเนื่อง จะเห็นได้ว่าการทดลองที่ขนาดเบต 300–500, 600–710, 710–1000 μm จะพบว่าเริ่มเกิดฟลูอิดได้ซ์เซชันที่ความเร็วของอากาศ 0.62 0.70 และ 1.3 m/s ในขณะที่ค่าความดันตกคร่อมระหว่างเบตมีค่าเท่ากับ 3.3 4.03 และ 4.2 kPa ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 4.1ข) หัวกระจายอากาศแบบ $S_w=2.98$ จากการทดลองที่ขนาดเบต 300–500, 600–710 และ 710–1000 μm พบว่าเริ่มเกิดฟลูอิดได้ซ์เซชันที่ความเร็วของอากาศ 0.71 0.94 และ 1.46 m/s ค่าความดันตกคร่อมระหว่างเบตมีค่าเท่ากับ 3.73 4.1 และ 4.8 kPa ตามลำดับ หากสังเกตจากผลการทดลอง จะพบว่า เมื่อมีการเพิ่มความเร็วอากาศปฐมภูมิอย่างต่อเนื่อง ความดันตกคร่อม

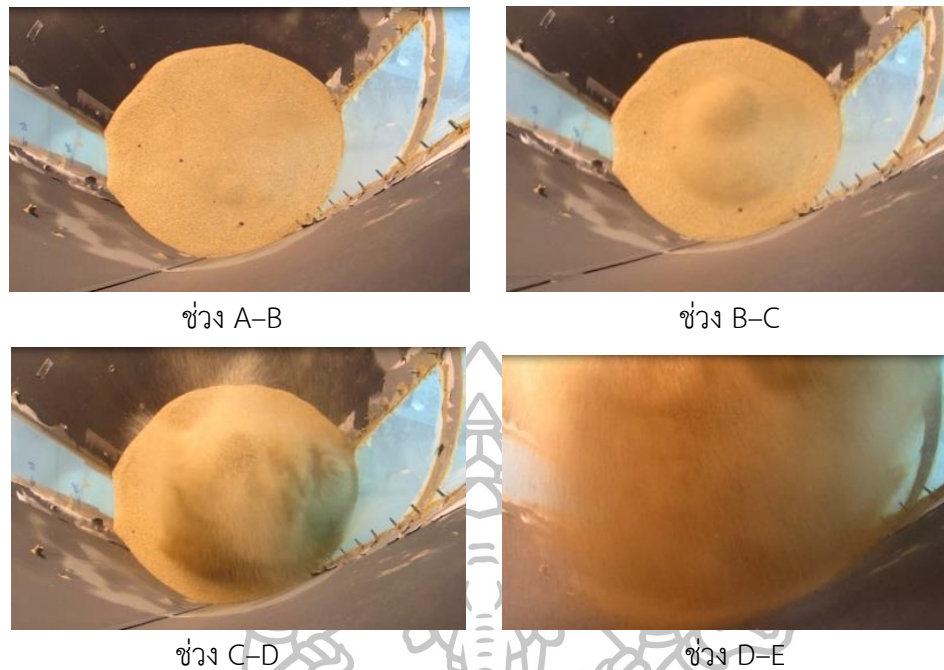
ก)



ข)



รูปที่ 4.1 กราฟ $\Delta P-U$ แสดงผลของกระแทกของเบตทั้ง 3 ขนาดที่หัวกระจายอากาศที่มี Swirl number ก) 2.76 และ ข) 2.98



รูปที่ 4.2 ภาพแสดงพฤติกรรมอุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไซเคิลแบบหมุนวน

ระหว่างเบตมีค่าจนถึงจุดสูงสุด (จุด B) และเริ่มเกิดฟลูอิดไซเคิล จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว จนถึงค่าต่ำที่สุด (จุด C) ต่อมาค่าความดันตกคร่อมจะคงที่ในช่วงสั้นๆ (ช่วง C-D) หากทำการเพิ่มความเร็วของอากาศให้สูงขึ้นต่อไปอีกความดันตกคร่อมระหว่างเบตจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในอัตราที่ไม่สูงนัก (จากจุด D ไป E) โดยความชันของกราฟที่เกิดขึ้นจะไม่สูงมากนักเนื่องจากทรายได้กระจายไปสู่ด้านข้างของเตา ทำให้ทรายรวมตัวที่ช่องอากาศหมุนวนที่ออกจากใบพัดจึงส่งผลทำให้ความดันเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง แต่อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ $\Delta P-U$ ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไซเคิลแบบหมุนวนทั้ง 2 หัวกระจายอากาศสามารถแบ่งเป็น 4 ช่วงพฤติกรรม ซึ่งตรงตามงานวิจัยของที่ได้ศึกษา [1,3] พร้อมคณะรายละเอียดดังนี้

1) ช่วงอนุภาคเบตหยุดนิ่ง (จากจุด A ถึง B) : เมื่อสังเกตจากผลการทดลองจากกราฟในรูปที่ 4.1ก)-ข) จะพบว่าที่สภาวะอัตราการไหลที่มีค่าน้อย อากาศได้ไหลซึมผ่านตามช่องว่างของอนุภาคเบต ซึ่งลักษณะของเบตในช่วงนี้ พบว่าเบตจะยังคงรักษาสภาพให้อยู่ในสภาพหยุดนิ่งโดยสามารถสังเกตได้จากความดันตกคร่อมระหว่างเบตที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสังเกตจากกราฟที่ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งนี้หากสังเกตในกราฟ $\Delta P-U$ เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะเข้าสู่สถานะที่ความเร็วอากาศส่งผลให้เริ่มเกิดฟลูอิดไซเคิล (U_{mf}) ณ ตำแหน่งนั้นจะพบว่าความดันตกคร่อมสูงสุด (ΔP_{mf}) เกิดขึ้นด้วยเช่นกันด้วย ซึ่งเรียกความเร็วที่สภาวะว่าเป็น “ความเร็วที่เข้าสู่สถานะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไซเคิล ($U = U_{mf}$)”

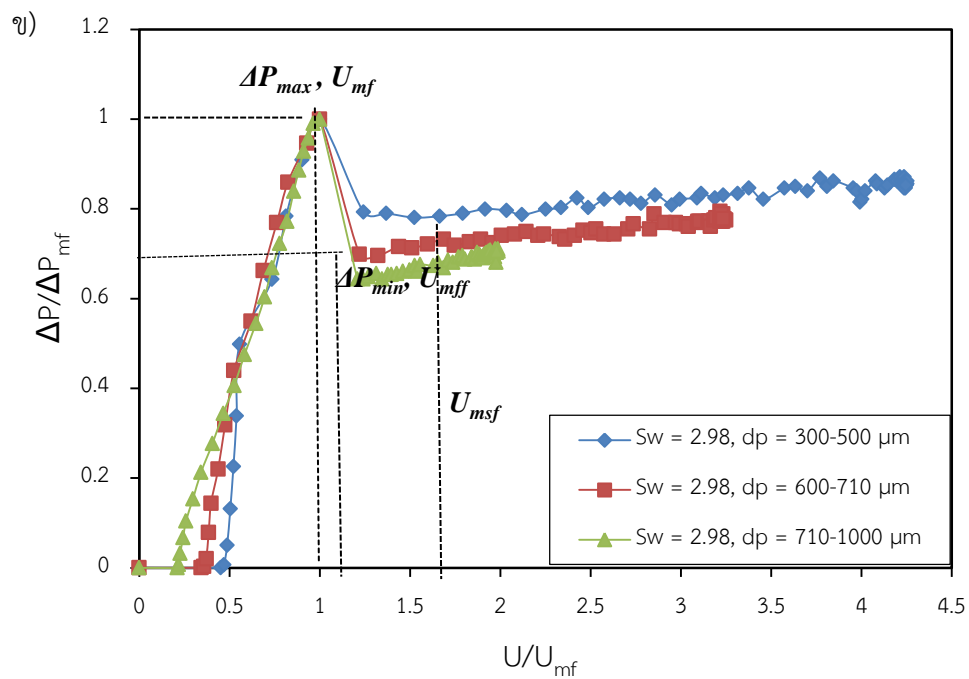
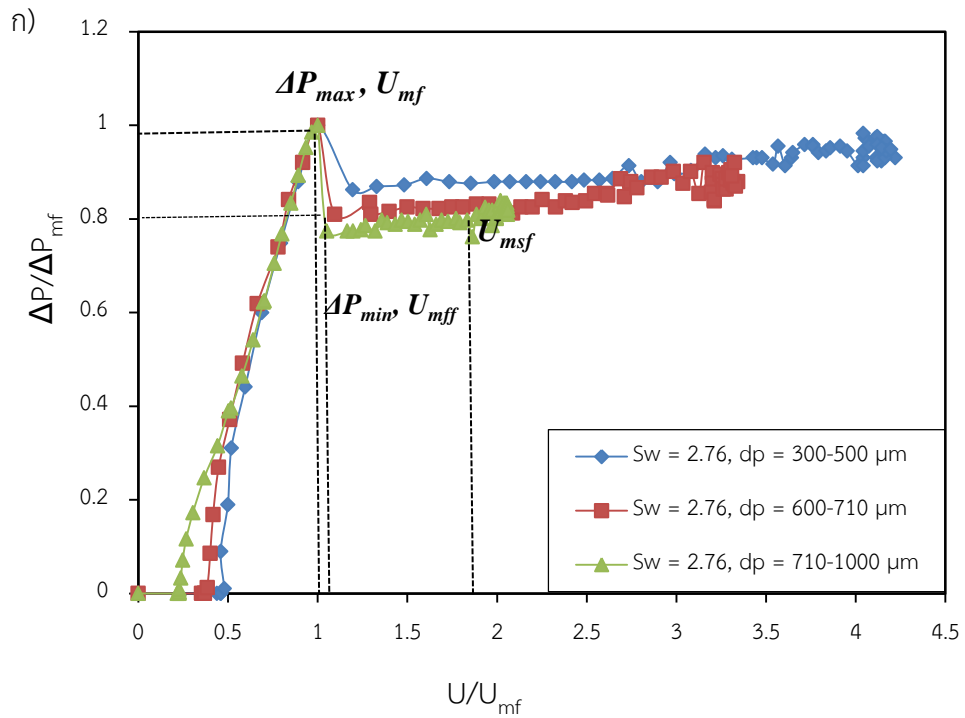
2) ช่วงบางส่วนของเบตเริ่มเกิดกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชัน (จากจุด B ถึง C) : ในสภาวะนี้จะเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศมากกว่าความเร็วที่เข้าสู่สถานะที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน ($U > U_{mf}$) ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศอย่างต่อเนื่อง พบว่า ความดันตกคร่อมระหว่างเบตลดลงอย่างรวดเร็ว โดยได้มีงานวิจัย [3] กล่าวว่า สำหรับพฤติกรรมของอนุภาคเบตในช่วงนี้อนุภาคเบตที่อยู่ด้านล่างเริ่มมีพฤติกรรมของกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชัน ในขณะที่อนุภาคเบตที่ชั้นด้านบนเบตจะรักษาสภาพผิวเบตให้หยุดนิ่งโดยไม่มีลักษณะเกิดฟองอากาศแต่อย่างใด

3) ช่วงฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนบางส่วน (จากจุด C ถึง D) : เมื่อมีการเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้น จะเกิดความเร็วต่ำสุดที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันอย่างสมบูรณ์ (U_{mf}) โดยช่วงนี้จะเริ่มขึ้นเมื่อสังเกตจากกราฟ $\Delta P-U$ พบว่าความดันตกคร่อมระหว่างเบตลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งยังมีค่าที่ต่ำสุดอีกด้วย (ΔP_{mf}) ซึ่งลักษณะของอนุภาคเบตในช่วงนี้ ด้านบนของผิวเบตจะมีลักษณะคล้ายฟลูอิดไดซ์เบตแบบฟองอากาศ แต่อย่างไรก็ตามด้านล่างของอนุภาคเบตมีการเคลื่อนเบตแบบหมุนวนอย่างเห็นได้ชัดเจน สำหรับการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนบางส่วนนี้ ความดันตกคร่อมเบตจะคงสภาพความดันตกคร่อมอยู่ในค่าที่ค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งความเร็วของอากาศเข้าสู่ช่วงการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันหมุนวนที่สมบูรณ์ (U_{msf}) โดยฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนบางส่วนนี้จะเกิดในช่วงความเร็วสั้นๆเท่านั้น

4) ช่วงฟลูอิดไดซ์เบตหมุนวนแบบสมบูรณ์ (จากจุด D ถึง E) : สำหรับพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนที่สมบูรณ์ จากกราฟจะพบว่าความดันตกคร่อมเบตจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจากเหตุการณ์ของความดันตกคร่อมเบตที่เพิ่มขึ้นนี้ ซึ่งมีงานวิจัยศึกษาได้กล่าวว่า [1] เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคเบตที่ได้รับแรงในแนวเหวี่ยงศูนย์กลาง (Centrifugal force) ที่เพิ่มขึ้นจากการความเร็วของอากาศที่มากขึ้นและเกิดการขยายตัวของอนุภาคเบตไปทางผนังเตา จึงส่งผลในการแรงต่อต้านกับอากาศที่มีทิศทางเคลื่อนที่ในแนวแกน [1]

4.1.2 ความสัมพันธ์ในรูปแบบไร้มิติของความดันตกคร่อมเบตและความเร็วของอากาศของใบพัด 2 ชนิด

จากการทดลองพฤติกรรมของฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนสำหรับหัวกระจายอากาศสำหรับใบพัดที่มีค่า S_w ที่แตกต่างกัน (หัวข้อ 4.1.1) จะพบว่า การอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างยาก สำหรับในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอความสัมพันธ์ในรูปแบบไร้มิติของความดันตกคร่อมเบตและความเร็วของอากาศของใบพัด 2 ชนิด เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษแต่ละช่วงของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวน โดยวิธีการนำเสนอในลักษณะนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการประเมินลักษณะการเกิดอุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวนที่มีลักษณะวัสดุเบตและสภาวะการทดลองที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งมีแนวโน้มความสัมพันธ์ในรูปแบบไร้มิติของความดันตกคร่อมระหว่างเบตเปรียบเทียบกับความเร็วฟลูอิดไดซ์เซชันของของหัวกระจายอากาศแบบใบพัดทั้ง 2 ชนิดจากกราฟจะพบว่าพฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนของหัวอากาศทั้ง 2 ชนิด จะมีลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์เบตที่เหมือนกันและแบ่งช่วงการเกิดฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวนได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมระหว่างเขตเปรียบเทียบกับความเร็วฟลูอิดไดซ์
 เซ็นของเขตทั้ง 3 ขนาดที่หัวกระจายอากาศที่มี Swirl number ก) 2.78 และ ข) 2.98

4.2 การยกตัวของอนุภาคเบตภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบตชนิดหมุนวนแบบไซโคลนแฝด

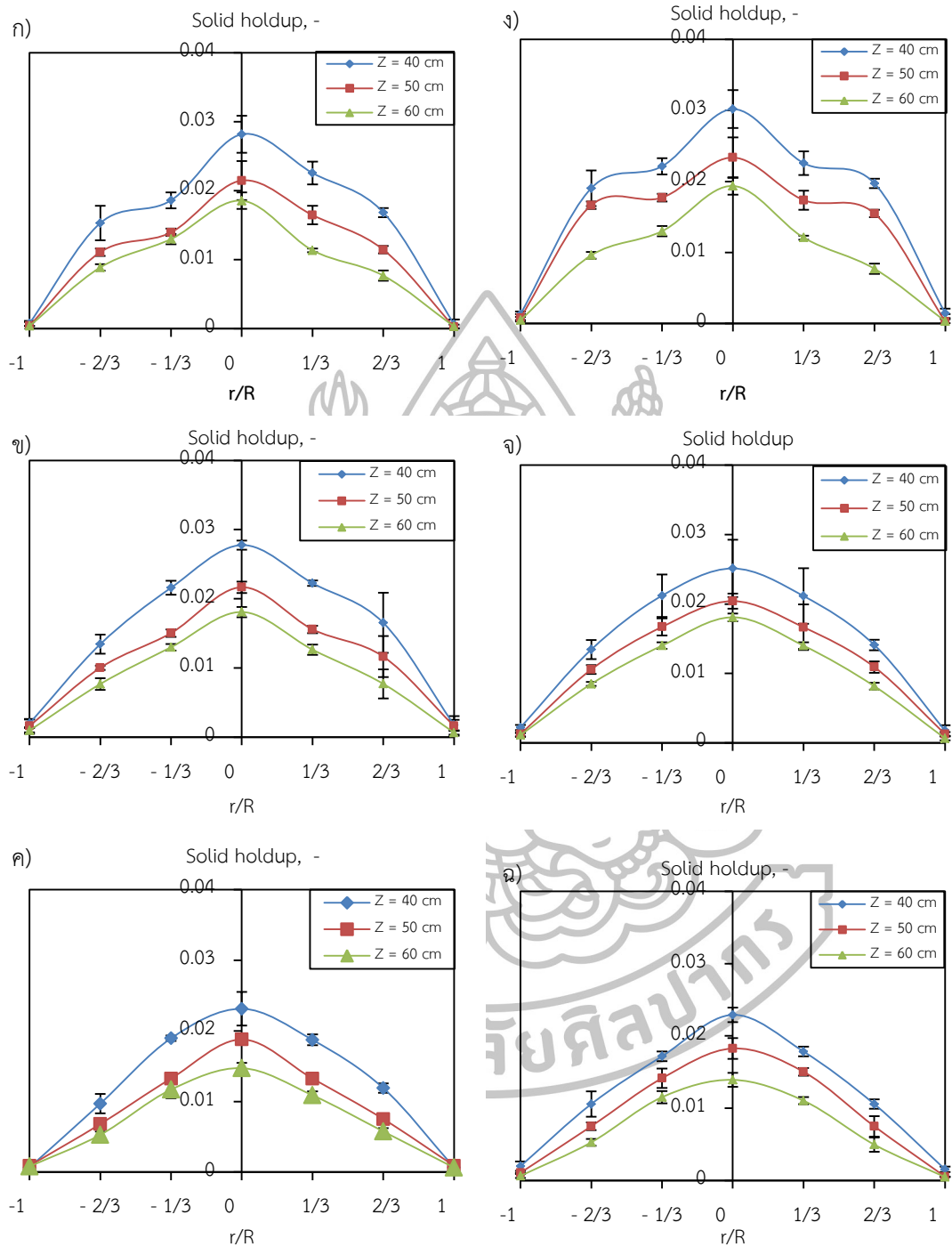
จากการผลทดลอง พบว่า ค่าการยกตัวของอนุภาคเบตภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวนมีปริมาณการยกตัวที่น้อยมาก (มีค่าเข้าใกล้ศูนย์) ที่ตำแหน่งความสูง $Z = 125$ cm ดังนั้นค่าการยกตัวของอนุภาคในตำแหน่งดังกล่าวจึงไม่ถูกนำมาพิจารณา

4.2.1 การกระจายตัวของอนุภาคเบตภายในเตาไซโคลนแฝด

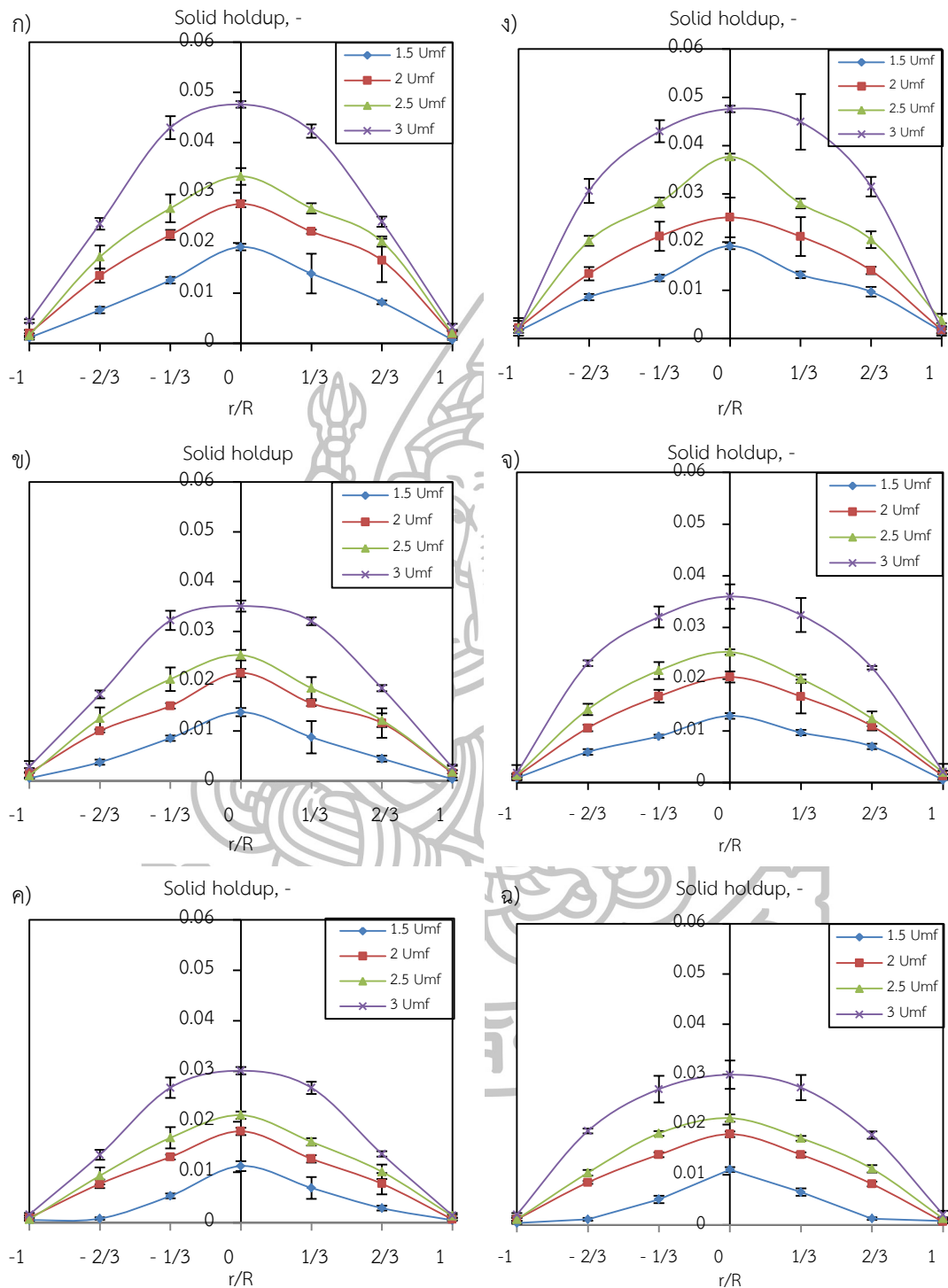
พฤติกรรมของฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวนนั้นเกิดได้จากอากาศปฐมภูมิได้ทะลุผ่านหัวกระจายอากาศแบบใบพัดที่ทำให้เกิดการหมุนวน จากนั้นอากาศได้ซึมผ่านอนุภาคเบตด้วยแรงที่เกิดในแนวแกนและแนวเส้นสัมผัส โดยความเร็วในแนวแกนจะส่งผลให้เกิดแรงแนวแกนขึ้นส่งผลต่อการยกตัวของอนุภาคให้เกิดกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชัน ในขณะที่อนุภาคเบตหมุนวนได้ด้วยอิทธิพลจากความเร็วของอากาศในแนวเส้นสัมผัส [4] แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า การศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวการยกตัวของฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวน ยังไม่พบผู้ศึกษา ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงได้แสดงรูปแบบการกระจายตัวของอนุภาคเบต โดยสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงค่าการยกตัวของอนุภาคเบตในแนวรัศมีที่ตำแหน่งความสูง (Z) ในการวัดที่แตกต่างกัน ($Z = 40$ 50 และ 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศ) ที่สภาวะปราศจากอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ สำหรับหัวกระจาย $S_w = 2.76$ และ 2.98 ทั้งยังเปรียบเทียบกับอนุภาคเบตที่มีขนาดแตกต่างกันอีกด้วย ($d_p = 300-500, 600-710$ และ $710-1000 \mu\text{m}$)

จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าค่าการยกตัวของอนุภาคลดลงเมื่อความสูงที่ถูกเพิ่มขึ้นทั้งนี้หากสังเกต ค่ายกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่สภาวะการทดลองแตกต่างกัน จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าการยกตัวของอนุภาคเบตค่อนข้างมีความสมมาตรกันที่ทุกระดับความสูงในการวัด โดยจะมีค่ายกตัวมากที่สุดกึ่งกลางเตาและลดลงอย่างรวดเร็วจนค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเข้าใกล้ผนังเตา จากเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดจากรูปแบบเตาที่มีลักษณะเป็นกรวย อีกทั้งพฤติกรรมการไหลของอากาศปฐมภูมิที่มีการหมุนวนและสลายตัวและกลายเป็นความเร็วในแนวตั้งอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้อากาศส่วนใหญ่ไหลในทิศทางแนวตั้งบริเวณที่กึ่งกลางเตาเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถตรวจสอบการลักษณะของกราฟผลการทดลองในภาคผนวก ข (ค่าการยกตัวในแนวรัศมี) พบว่า รูปแบบการยกตัวได้เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันที่ทุกสภาวะการทดลองของหัวกระจายอากาศทั้ง 2 ชนิด

จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ภายในเตาไซโคลนแฝดจะถูกแบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วน คือ 1) ส่วนที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบตอย่างหนาแน่น (Dense phase zone) ซึ่งมีความสูงตั้งแต่ผิวเบตจนถึง 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ และ 2) ส่วนที่มีเพียงอากาศหมุนเวียน (Freeboard zone) ซึ่งมีความสูงตั้งแต่ผิวเบตตั้งแต่ถึง 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ ขึ้นไป



รูปที่ 4.4 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $2U_{mf}$ ที่ $(Q_S+Q_T)/Q_P = 0$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเขต ก) 300–500 μm ข) 600–710 μm และ ค) 700–1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเขต ง) 300–500 μm จ) 600–710 μm และ ฉ) 700–1000 μm



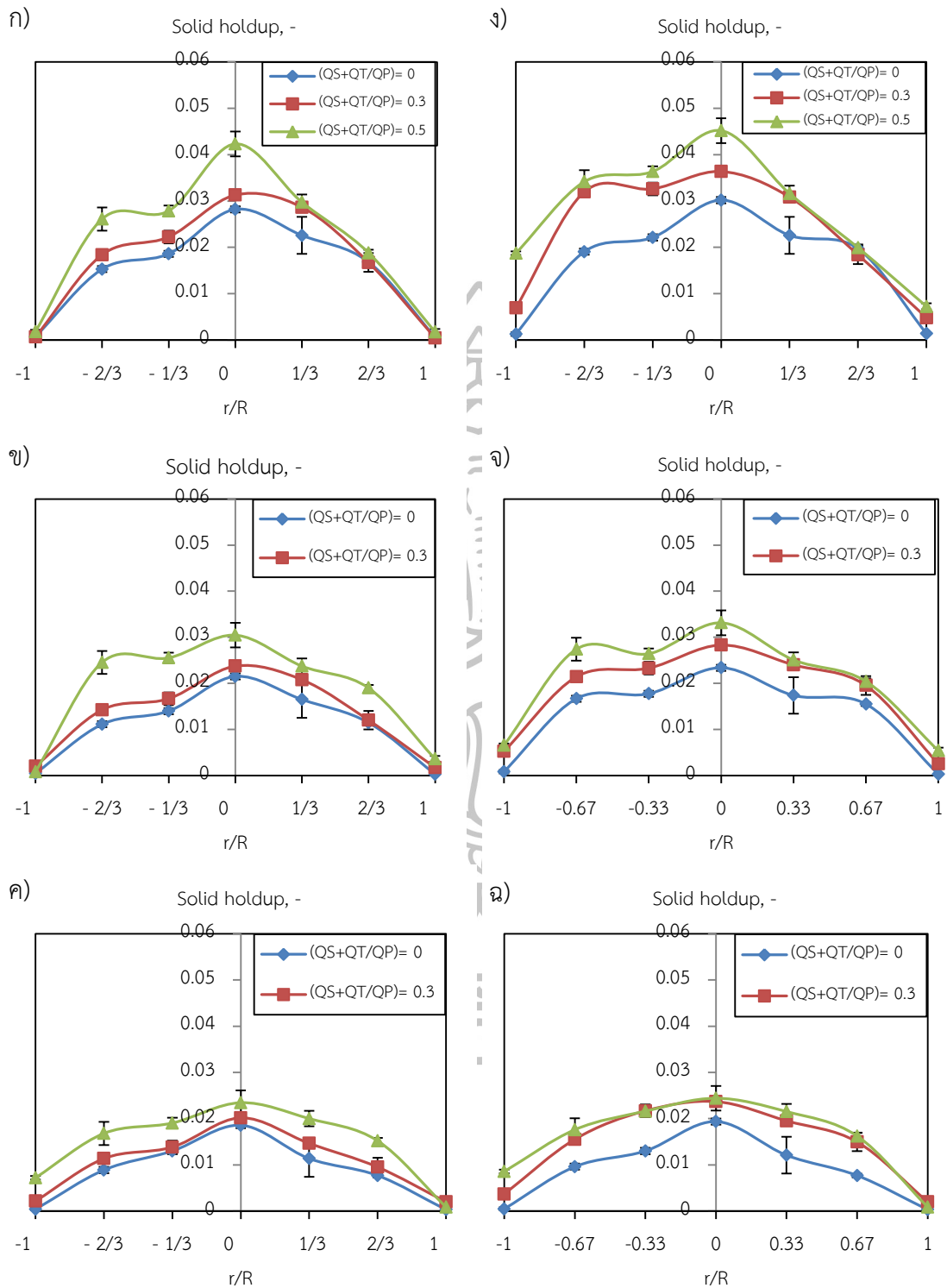
รูปที่ 4.5 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 600–710 μm ที่ $(Q_S+Q_T)/Q_P = 0$ สำหรับ $S_w=2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w=2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm

4.2.2 ผลของอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาค

อากาศปฐมภูมิเป็นส่วนสำคัญที่สุดของกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชัน เนื่องจากอากาศปฐมภูมินั้นเป็นตัวกลางอย่างเดี่ยวที่ส่งผลให้อนุภาคเบดมีพฤติกรรมเหมือนของไหลได้ ในหัวข้อนี้จึงได้อธิบายผลของอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาคเบดภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนไซโคลนแปด ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงผลของอากาศปฐมภูมิต่อค่าการยกตัวของอนุภาคเบดในแนวรัศมีของหัวกระจายอากาศที่มี $S_w = 2.76$ และ 2.98 สำหรับขนาดอนุภาคเบด $d_p = 300-500$ $600-710$ และ $710-1000$ μm และ $(Q_s+Q_T)/Q_p$ ต่างๆ ที่ตำแหน่งความสูงในเตา $Z = 40$ 50 และ 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศ จากผลการทดลอง พบว่า รูปแบบค่าการยกตัวของอนุภาคค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศปฐมภูมิ ซึ่งเป็นตามงานวิจัยที่ได้ศึกษา [4,17,38] โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่กึ่งกลางเตา โดยสภาวะการทดลองที่ $1.5U_{mf}-2U_{mf}$ ค่าการยกตัวจะมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางเตา เนื่องด้วยอิทธิพลจากอากาศปฐมภูมิส่วนใหญ่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอนุภาค ณ บริเวณกึ่งกลางเตา ทั้งนี้ จะเห็นผลของอากาศปฐมภูมิได้อย่างชัดเจน เมื่อสภาวะความเร็วของอากาศปฐมภูมิที่ $2.5U_{mf}$ ค่าการยกตัวของอนุภาคที่ $r/R = 0$ และ $\pm 1/3$ จะให้ค่าการยกตัวที่เท่ากันอย่างมีนัยสำคัญของทั้ง 2 หัวกระจายอากาศ ซึ่งสิ่งนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความเร็วปฐมภูมิเป็นปัจจัยเพิ่มรูปแบบการกระจายตัวของอนุภาคเบดให้มากขึ้น อันเป็นผลจากรูปแบบการไหลของอากาศที่เกิดจากหัวกระจายอากาศแบบใบพัดได้สร้างรูปแบบการเคลื่อนที่แบบหมุนวนในการยกตัวของอนุภาคเพื่อที่จะยกตัวอนุภาคขึ้นอย่างไรก็ตามเราจะพบว่า หัวกระจายที่ $S_w = 2.98$ ให้ลักษณะของกราฟที่โค้งมนมากกว่า $S_w = 2.76$ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนถึงการกระจายตัวของอนุภาคเบด เมื่อเปรียบเทียบที่ตำแหน่งความสูงในการวัดที่จุดเดียวกัน

4.2.3 ผลอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาค

ในกระบวนการเผาไหม้ฟลูอิดไดซ์เบดนั้น อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเผาไหม้เพื่อนำความร้อนมาใช้ในงานวิจัยนี้ทราบดีอย่างยิ่งเกี่ยวกับเหตุผลดังกล่าว [6-7, 27] จึงได้ศึกษาผลอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงค่าการยกตัวของอนุภาคตามแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันสำหรับขนาดอนุภาคเบด $710-1000$ μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ และ 2.98 ณ ระดับความสูงในการวัด 40 cm 50 cm และ 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศ จากผลการทดลองจะพบว่า ที่ตำแหน่งความสูงในการวัดเดียวกัน หากมีการใส่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ ค่าการยกตัวของอนุภาคเบดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบกับการไม่ใส่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ ซึ่งมีแนวโน้มเดียวตามงานวิจัยที่ได้ดำเนินการศึกษา [4,8] เนื่องจากการใส่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิใส่เข้าไปในเตาจะส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการไหลและรูปแบบการไหลแบบหมุนวน

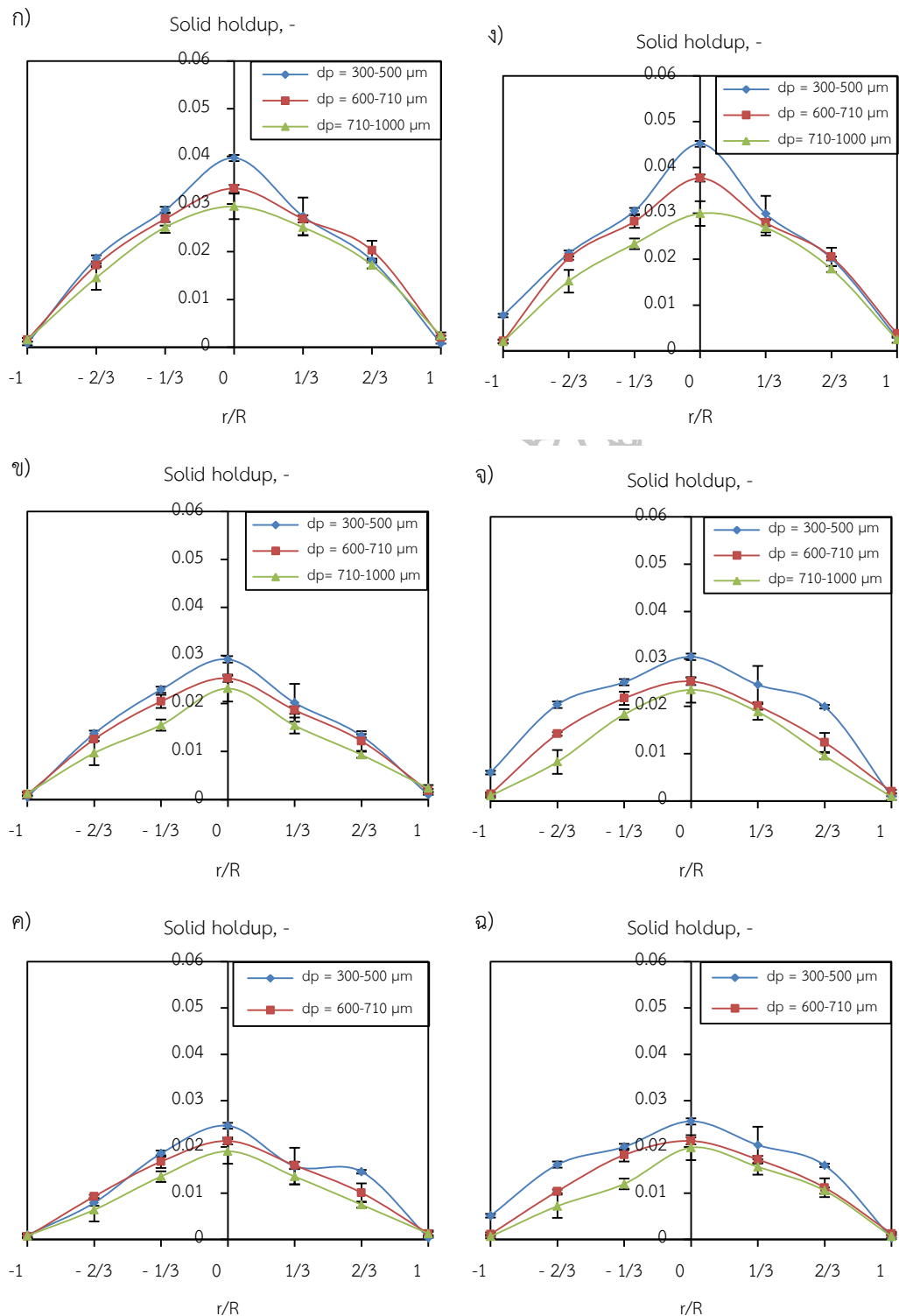


รูปที่ 4.6 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเขต 300–500 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm

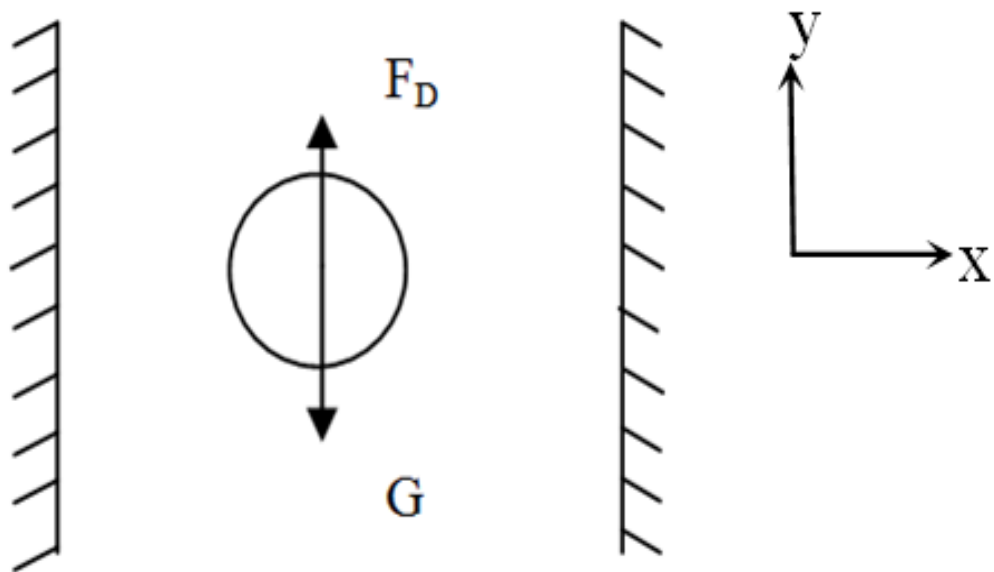
ซึ่งส่งผลให้ความเร็วในการผสมตัวของอากาศกับเบดเพิ่มมากขึ้นและยังเป็นการเพิ่มเวลาในการลอยตัวของอนุภาคให้มากขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้หากทำการศึกษาต่อไป ในรูปที่ 4.6 ณ สภาวะ $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.5$ ให้ค่าการยกตัวของอนุภาคที่มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$ อีกทั้งจะเห็นพฤติกรรมเพิ่มเติมคือ เมื่อเพิ่มอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ จะส่งผลให้ค่าการยกตัวของอนุภาคที่ตำแหน่ง $r/R = 0 \pm 1/3$ และ $\pm 2/3$ เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอากาศปฐมภูมิเพียงอย่างเดียว จะพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าการยกตัวของอนุภาคที่ตำแหน่ง $r/R = 0$ และ $\pm 2/3$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอากาศส่งผลให้อนุภาคเบดกระจายตัวได้ดีขึ้น ทั้งนี้จะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าตั้งแต่ $2U_{mf}$ ขึ้นไป จากผลการทดลองจึงทำให้ทราบว่า อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิไม่ได้ส่งผลให้ค่าการยกตัวของอนุภาคเพียงอย่างเดียวแต่ยังเพิ่มการเคลื่อนที่แบบหมุนวนภายในเตามากยิ่งขึ้น [4,8] ทั้งนี้หากทำการเปรียบเทียบการยกตัวของอนุภาคของทั้ง หัวกระจาย 2 อากาศจะเห็นถึงพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ที่เหมือนกันที่ทุกสภาวะการทดลอง

4.2.4 ผลของขนาดอนุภาคเบดที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาค

จากการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนเป็นที่ทราบดีว่าอนุภาคเบดที่มีลักษณะเล็กจะส่งผลให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ [26] ทั้งนี้ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของขนาดอนุภาคเบดที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาคภายในเตาไซโคลนแฝด ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคเบดแตกต่างกันที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ ณ อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$ สำหรับ $S_w = 2.76$ และ 2.98 ณ ระดับความสูงในการวัด 40 50 และ 60 cmเหนือหัวกระจายอากาศ ซึ่งจากการทดลองในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุเบดเป็นทรายซิลิกาที่มีอนุภาคเบดขนาด 300–500 600–710 และ 710–1000 μm ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบพบว่า การยกตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเบดถูกกลดลงเนื่องด้วยผลมาจากขนาดอนุภาคเบดที่เล็กลงจะใช้แรงในการยกตัวที่น้อยลง เนื่องจากน้ำหนักที่เบา ส่งผลให้แรงที่เกิดจากความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นที่สภาวะความเร็วอากาศปฐมภูมิเท่ากัน อนุภาคขนาดเล็กจึงให้ปริมาณการยกตัวของอนุภาคมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ [28] ดังแสดงการจำลองการยกตัวของอนุภาคเบดในรูปที่ 4.8 ทั้งนี้หากพิจารณาทั้ง 2 หัวกระจายอากาศ มีค่าการยกตัวมากที่สุด อนุภาคเบดขนาด 300–500 μm สูงสุดที่ 0.046 และ 0.042 ที่ $S_w = 2.98$ และ 2.76 ตามลำดับ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$



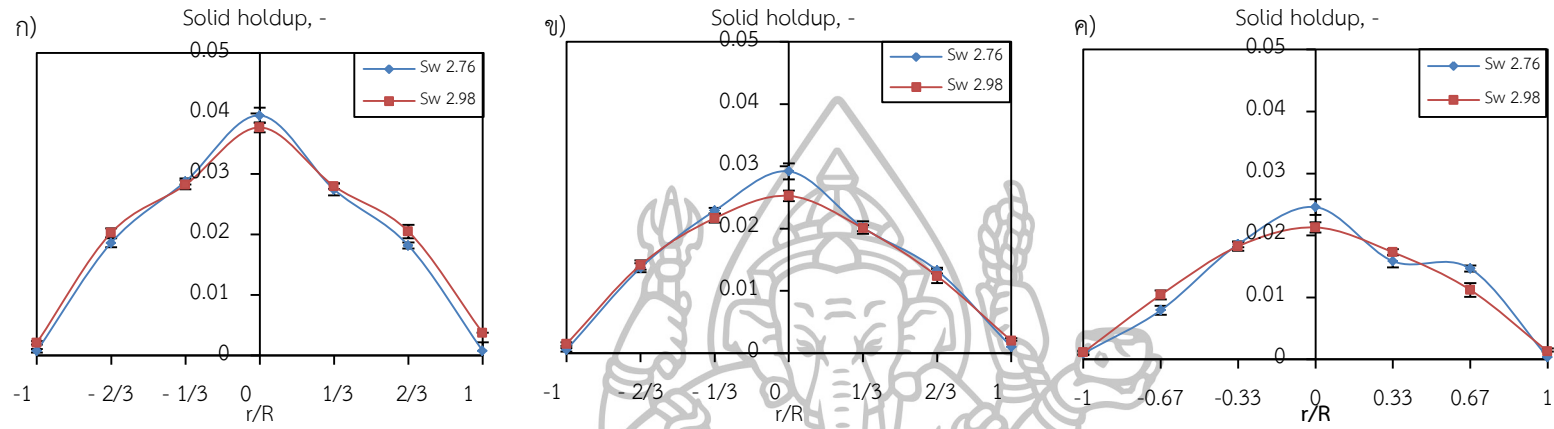
รูปที่ 4.7 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกันความเร็วอากาศ ปริมาตร $2.5U_{mf}$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 จ) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศ



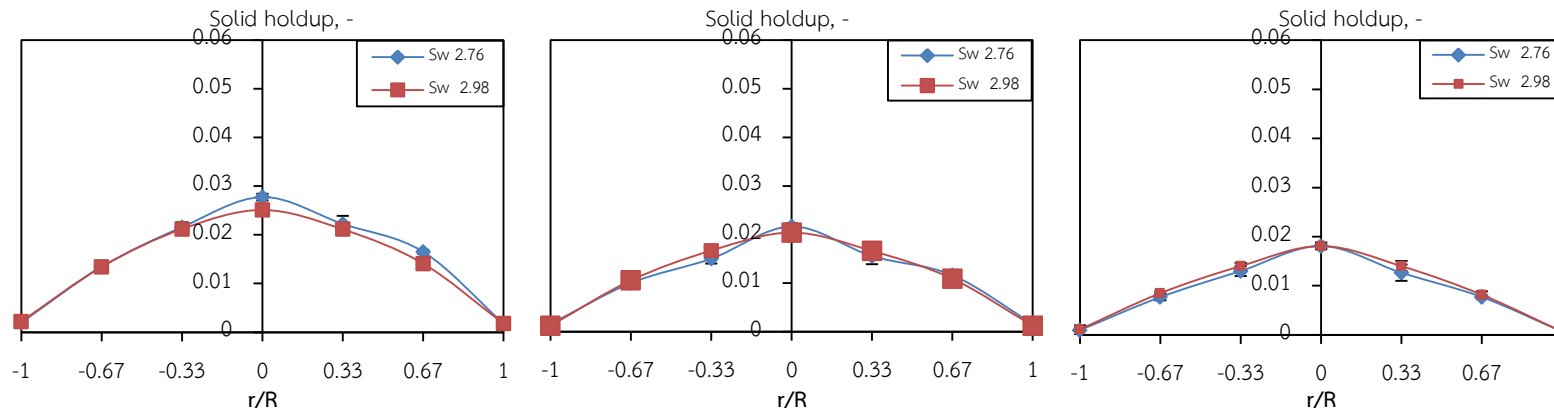
รูปที่ 4.8 การจำลองการยกตัวของอนุภาคเบต

4.2.5 ผลของ Swirl number ที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาค

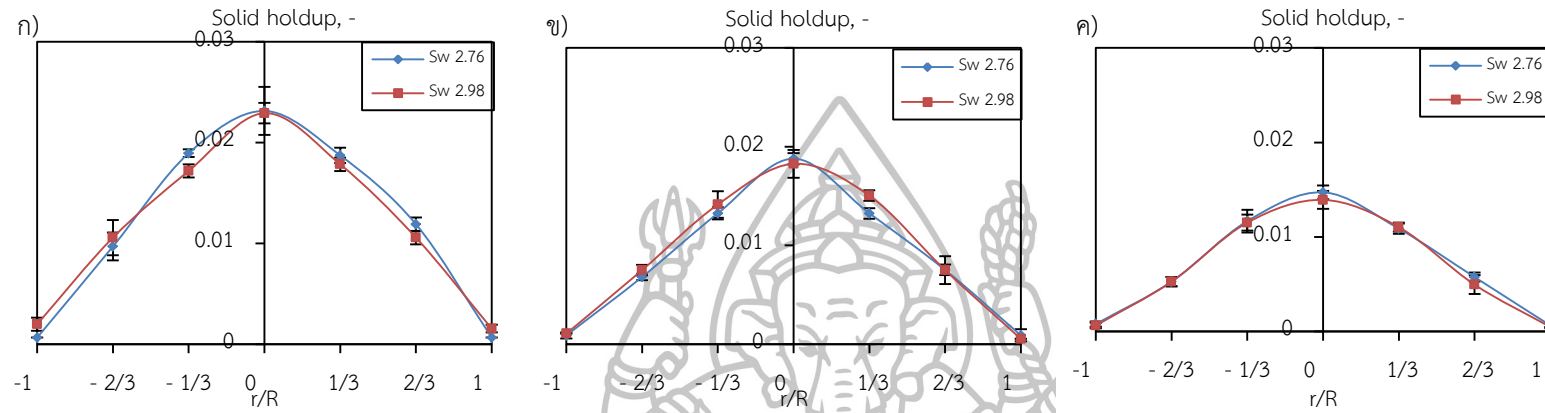
การเพิ่ม Swirl number เป็นการเปลี่ยนแปลงของอากาศให้มีการหมุนวนที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัย พบว่า ผลกระทบของ S_w ต่อการยกตัวของอนุภาคเบตนั้นยังไม่มีผู้ศึกษา ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษาผลกระทบดังกล่าว ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 – 4.11 ที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $U_{mf} - 3U_{mf}$ อัตรา $(Q_s + Q_T / Q_p) = 0$ ที่ระดับความสูงในภาวด 40, 50 และ 60 cm เนื้อหั่วกระจายอากาศโดยปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคเบต 300–500 600–710 และ 710–1000 μm สำหรับหั่วกระจายอากาศแบบ $S_w = 2.76$ และ 2.98 ซึ่งจากการทดลอง พบว่าที่ความสูง 40 cm จากหั่วกระจายอากาศจะเห็นได้อย่างชัดเจนถึงค่าการยกตัวของอนุภาคที่แตกต่างกัน เนื่องด้วยหั่วกระจายอากาศที่มี $S_w = 2.98$ จะให้ความเร็วที่เกิดจากการยกตัวในแนวแกนและแนวเส้นสัมผัสที่สูงกว่า $S_w = 2.76$ ($S_w = 2.98$ มีพื้นที่หน้าตัดทางออกของใบพัดน้อยกว่า $S_w = 2.76$) ดังแสดงในรูปที่ 4.7–4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของรูปแบบการยกตัวได้อย่างชัดเจนเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า S_w ในทางตรงกันข้ามที่ระดับความสูง 50 และ 60 cm เนื้อหั่วกระจายอากาศ ค่าการยกตัวของอนุภาคเบตมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จึงทำให้ยากต่อการอธิบายผลกระทบของ S_w ที่มีผลต่อการยกตัวของอนุภาคได้ แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถเห็นความแตกต่างเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้นนั้นจากตารางในภาคผนวก ข ซึ่งมีลักษณะปรากฏการณ์เหตุเดียวกับระดับความสูง 40 cm เนื้อหั่วกระจายอากาศ



รูปที่ 4.9 กราฟ $\epsilon-S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$



รูปที่ 4.10 กราฟ $\epsilon-S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 600-710 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$



รูปที่ 4.11 กราฟ $E - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$



4.3 อุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งใดๆภายในเตาฟลูอิดซ์เบดแบบไซโคลนแฝด

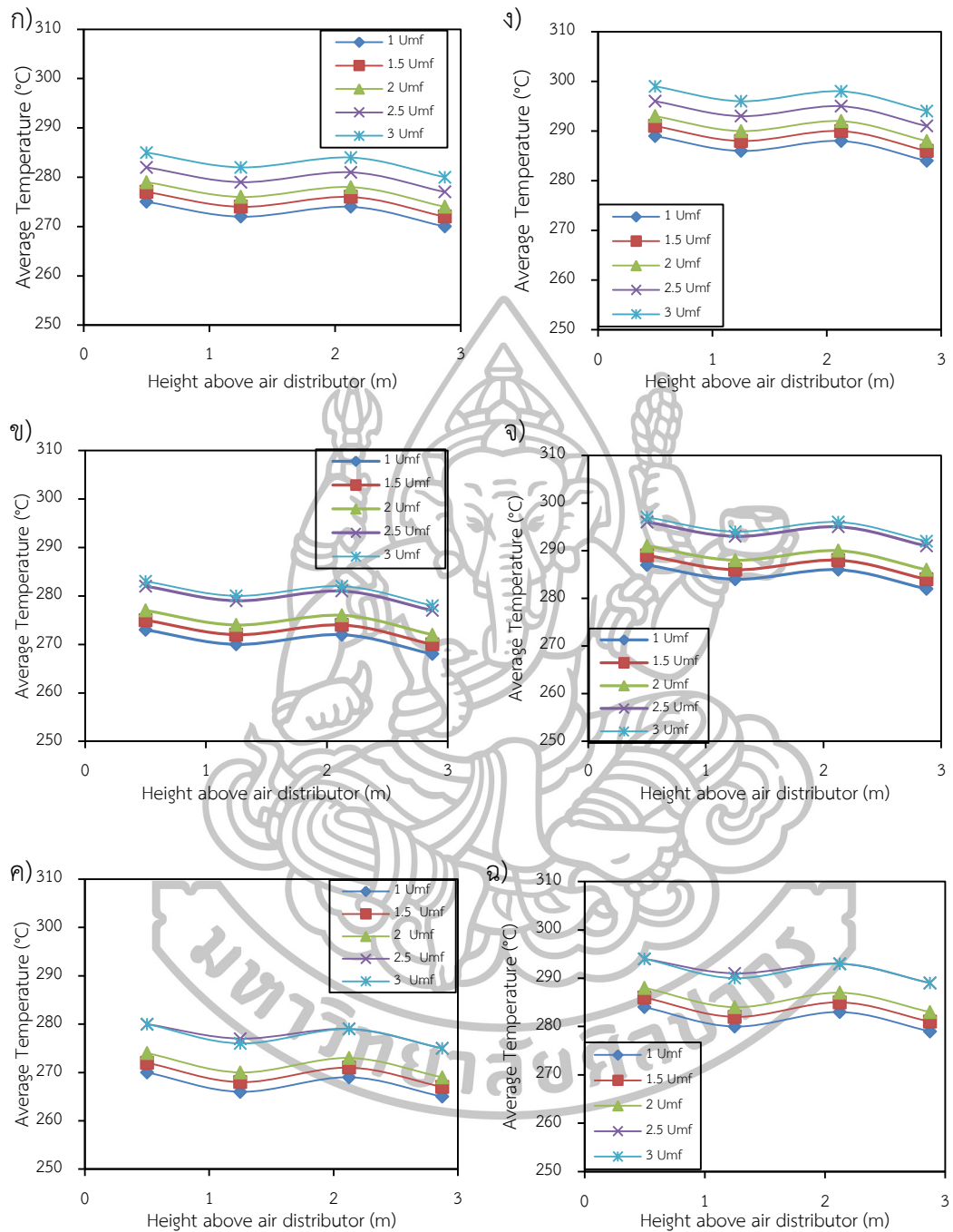
สำหรับในหัวข้อนี้ ได้จัดแสดงผลการวัดขึ้น เพื่อใช้ยืนยันและอธิบายเหตุการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาไซโคลนแฝด ในหัวข้อนี้จึงได้แสดงรูปแบบอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้ที่เกิดขึ้นภายในเตาไซโคลนแฝด ซึ่งได้จากการเก็บข้อมูลในแต่ละสภาวะของการทดลองได้ดำเนินการเก็บในอัตรา 1 Hz ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยที่แสดงในแต่ละตำแหน่งได้มาจากการทำการเฉลี่ยของข้อมูลในช่วงเวลาใน 1 นาที

4.3.1 ผลของความสูงที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในเตาไซโคลนแฝด

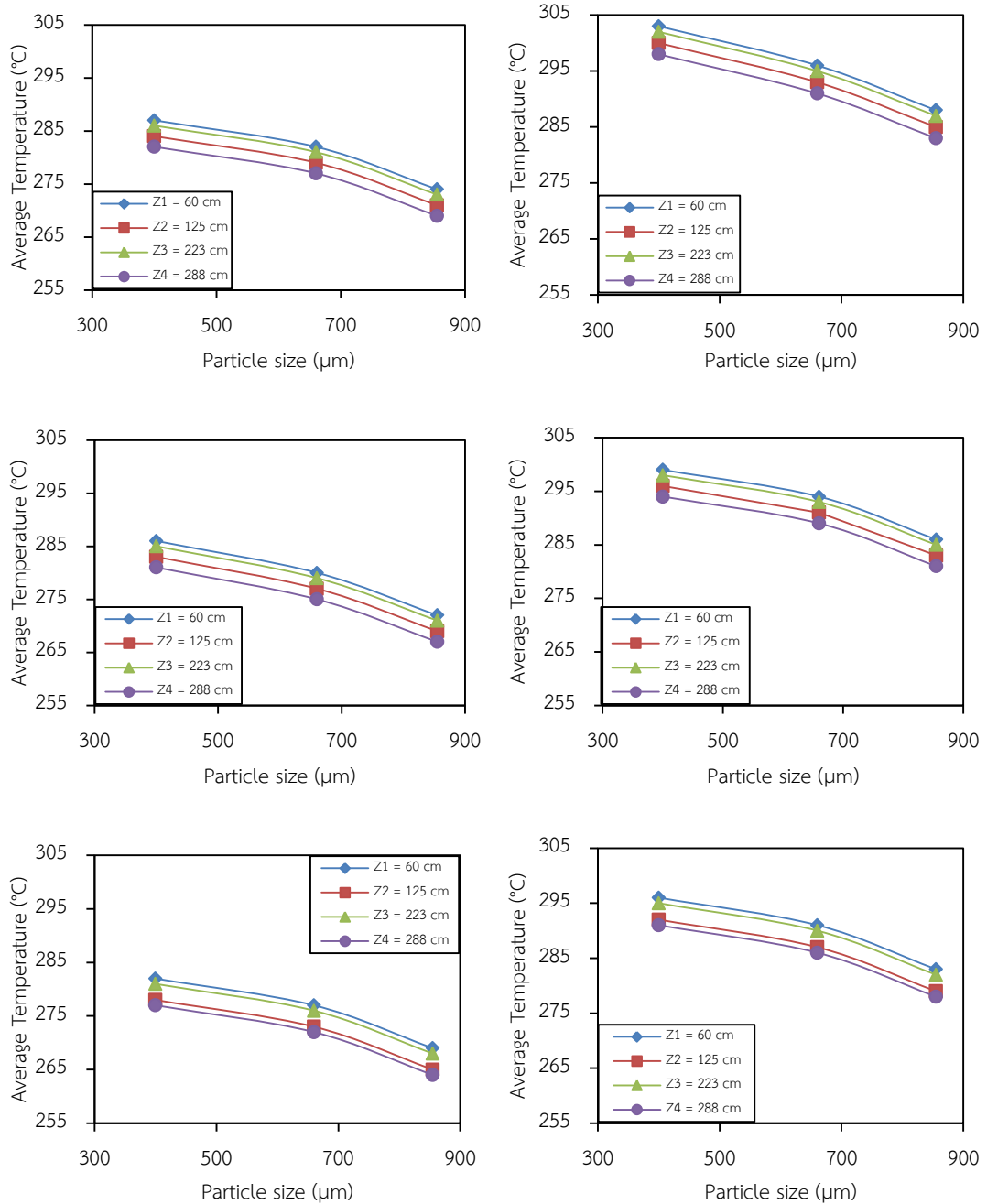
จากรูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ที่ตำแหน่งในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Z) เท่ากับ 60 125 223 และ 288 cm ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดย $S_w = 2.76$ และ 2.98 ตามลำดับ ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับอนุภาคขนาด 710–1000 μm ณ ความเร็วปฐมภูมิต่างๆ โดยอุณหภูมิของอากาศในแนวรัศมีโดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศหตุยภูมิตติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ $[(Q_s + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0.3 และ 0.5 ซึ่งหากสังเกตจากรูปที่ 4.12 กราฟมีรูปแบบที่เส้นโค้งที่มีแนวโน้มเหมือนกันที่ทุกสภาวะความเร็วในการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในเตามีรูปแบบการกระจายตัวตามความสูงที่เหมือนกัน ทั้งนี้อุณหภูมิจะมากที่สุด ณ ตำแหน่งความสูง 60 cm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับเบด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความสูงในการวัดต่อไป จะพบว่าอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงตำแหน่งความสูง 125 cm เนื่องจากขนาดของพื้นที่หน้าตัดเตาที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้อากาศมีการขยายตัว จากนั้นอุณหภูมิจะสูงขึ้นเล็กน้อยอีกครั้งเมื่อเข้าสู่เตาดำแหน่งการวัด 223 cm (ไซโคลนชั้นที่ 2) เนื่องจากท่อเชื่อมต่อมีพื้นที่หน้าตัดของเตาเล็กลง และเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นถึง 288 cm อุณหภูมิก็จะลดลงอีกครั้งเช่นกัน

4.3.2 ขนาดอนุภาคเบดที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในเตา

เมื่อสังเกตผลการทดลองจากรูปที่ 4.13 แสดงผลของขนาดอนุภาคเบดที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยภายในเตา ที่สภาวะความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $2.5U_{mf}$ โดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศหตุยภูมิตติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ $[(Q_s + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0.3 และ 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.76 และ 2.98 ซึ่งทุกสภาวะการทดลองมีอุณหภูมิของเบดอยู่ที่สภาวะ 300 °C เท่ากัน พบว่า อุณหภูมิของที่ตำแหน่งความสูงใดๆจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่ออนุภาคเบดเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองของผลการยกตัวที่มีผลต่ออนุภาคเบดภายในเตา อนุภาคเบดที่มีขนาดเล็กจะมีการกระจายตัวภายในเตาได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ จากเหตุผลดังกล่าว ส่งผลให้ความร้อนที่สะสมในอนุเบดขนาดเล็กมีปริมาณการปลดปล่อยความร้อนมีมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเบดที่มีขนาดละเอียด (เล็ก) นอกจากจะส่งผลให้มีการยกตัวของอนุภาคที่ดีแล้ว ยังส่งผลอย่างชัดเจนในการกระจายอุณหภูมิภายในเตาไซโคลนแฝดอีกด้วย ซึ่งเหตุผลดังกล่าวนี้สามารถนำไปอธิบายผลการกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่อไป



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลตำแหน่งความสูงโดยวัดจากระบบป้อนอากาศต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูงการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 710-1000 \mu m$ ของ $S_w = 2.76$ โดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ ต่อดังอากาศปฐมภูมิ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ $S_w = 2.98$ ณ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคมีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยภายในเตา สำหรับความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $2.5U_{mf}$ โดย $[(Q_s+Q_t)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 สำหรับ Swirl Number เท่ากับ 2.76 และ $[(Q_s+Q_t)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ที่ Swirl Number เท่ากับ 2.98

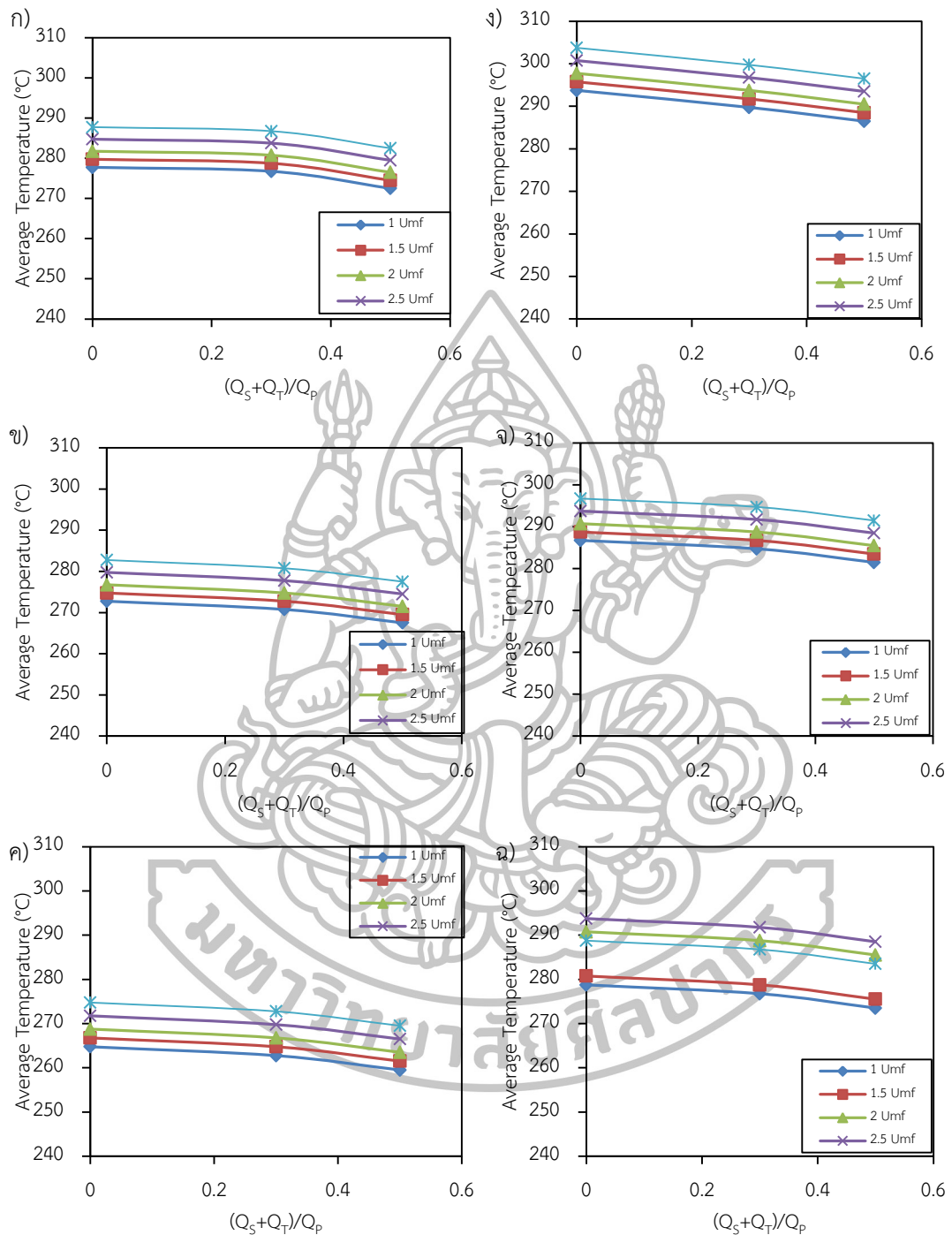
4.3.3 ผลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในเตาไซโคลนแปด

ในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดการใส่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิเป็นสิ่งที่ช่วยลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ภายในเตา นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรวมตัวหรือการลอยตัวของวัสดุเบด ซึ่งเห็นได้จากผลการทดลองในหัวข้อการยกตัวของอนุภาคภายในเตาไซโคลนแปดที่ผ่านมา ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยจึงจำเป็นต้องศึกษาเพื่อทราบผลกระทบของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ ที่มีต่ออุณหภูมิภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบไซโคลนแปด

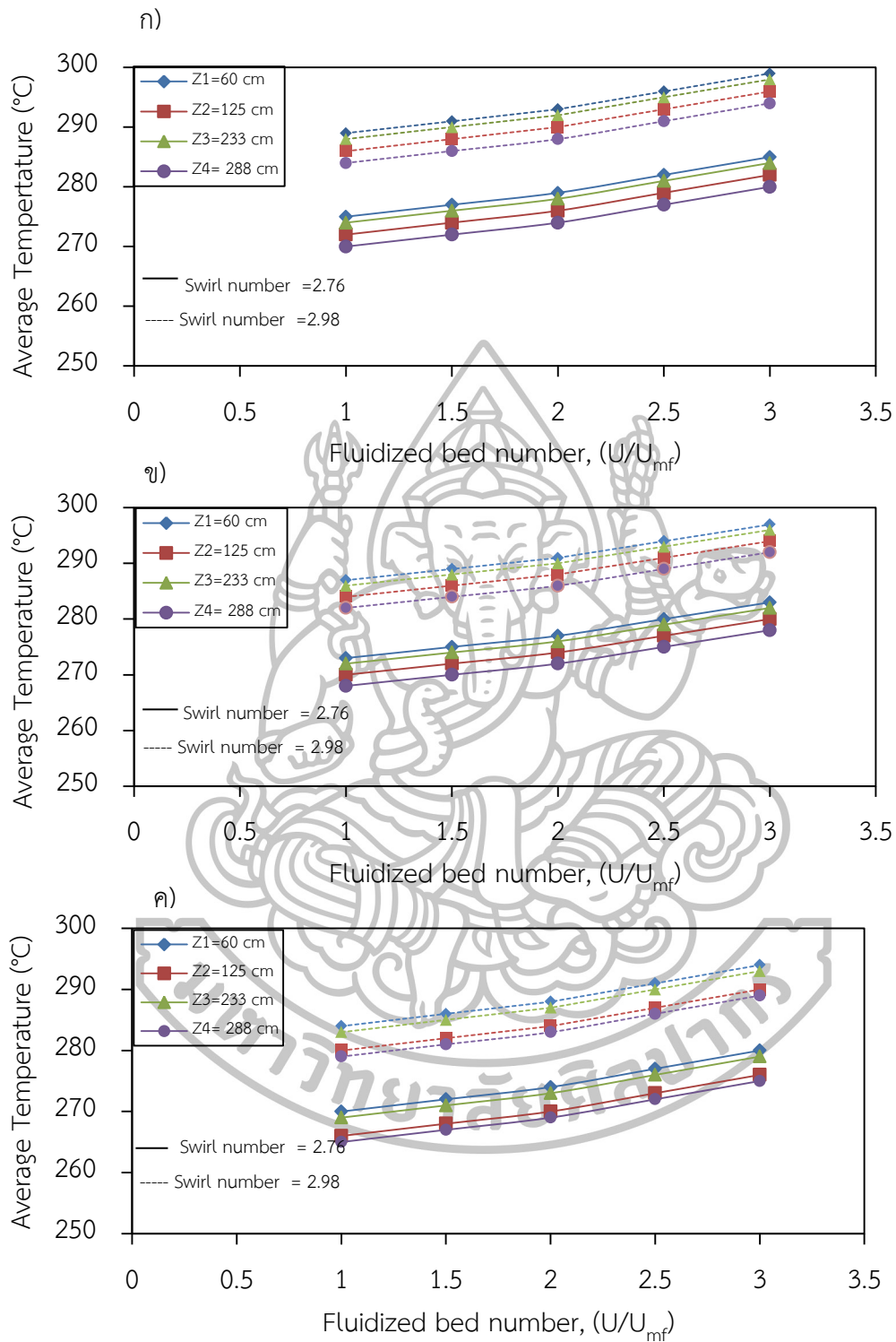
เมื่อพิจารณาผลการทดลองในกรณีที่ใส่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ (ตำแหน่งท่อทุติยภูมิและตติยภูมิ $Z_1 = 60$ cm และ $Z_3 = 223$ cm ตามลำดับ) ในรูปที่ 4.14 จะพบว่า แนวโน้มของกราฟมีลักษณะค่อยๆลดลง ตามอัตราอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นผลมาจากการใส่อากาศอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิเข้าสู่เตาไซโคลนแปดนั้น อากาศจากภายนอกที่มีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในเตา) เข้าไปผสมตัวกับอากาศภายในเตาและรวมตัวกัน จึงทำให้อุณหภูมิภายในเตาลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิถูกเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการเพิ่มอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิจะลดอุณหภูมิภายในเตาก็ตาม แต่ในการทดลองอุทกพลศาสตร์การยกตัวของอนุภาคเบด พบว่าการใส่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิเข้าไปในเตาจะเป็นการเพิ่มการผสมตัวของอากาศและอนุภาคเบดได้ดีขึ้น

4.3.4 ความเร็วอากาศปฐมภูมิที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในเตาไซโคลนแปด

ในการเกิดกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้อากาศปฐมภูมิเป็นตัวกลางสำคัญต่อกระบวนการ ทั้งนี้ นอกจากอากาศปฐมภูมิจะส่งผลให้อนุภาคเบดมีการเคลื่อนที่แล้ว อากาศปฐมภูมิยังส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยที่แต่ละความสูงของเตาอีกด้วย ดังในรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงการทดลองที่สภาวะของอนุภาคขนาด $600-710$ μm สำหรับ Swirl Number เท่ากับ 2.76 และ 2.98 โดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิตตติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ $[(Q_5+Q_7)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 ที่ซึ่งแสดงผลในรูปแบบอัตราส่วนความเร็วอากาศเทียบกับความเร็วเริ่มเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน (Fluidization number, U/U_{mf}) จากผลการทดลองอุณหภูมิของอากาศในตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาไซโคลนแปดนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอากาศปฐมภูมิมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มโอกาสในการกระจายตัวของอนุภาคภายในเตา



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งเตา ณ S_w เท่ากับ 2.76 สำหรับ U_{mf} , - $3U_{mf}$ สำหรับ d_p เท่ากับ ก) 300–500 μm ข) 600–710 μm และ ค) 710–1000 μm และ สำหรับ S_w เท่ากับ 2.98 สำหรับอนุภาคขนาด ง) 300–500 μm จ) 600–710 μm และ ฉ) 710–1000 μm



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากความเร็วอากาศปฐุมภูมิที่มีผลต่ออุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งเตา สำหรับอนุภาคขนาด 600–710 μm ของ S_w เท่ากับ 2.76 และ 2.98 โดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิต่อดัตยภูมิต่ออากาศปฐุมภูมิ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5

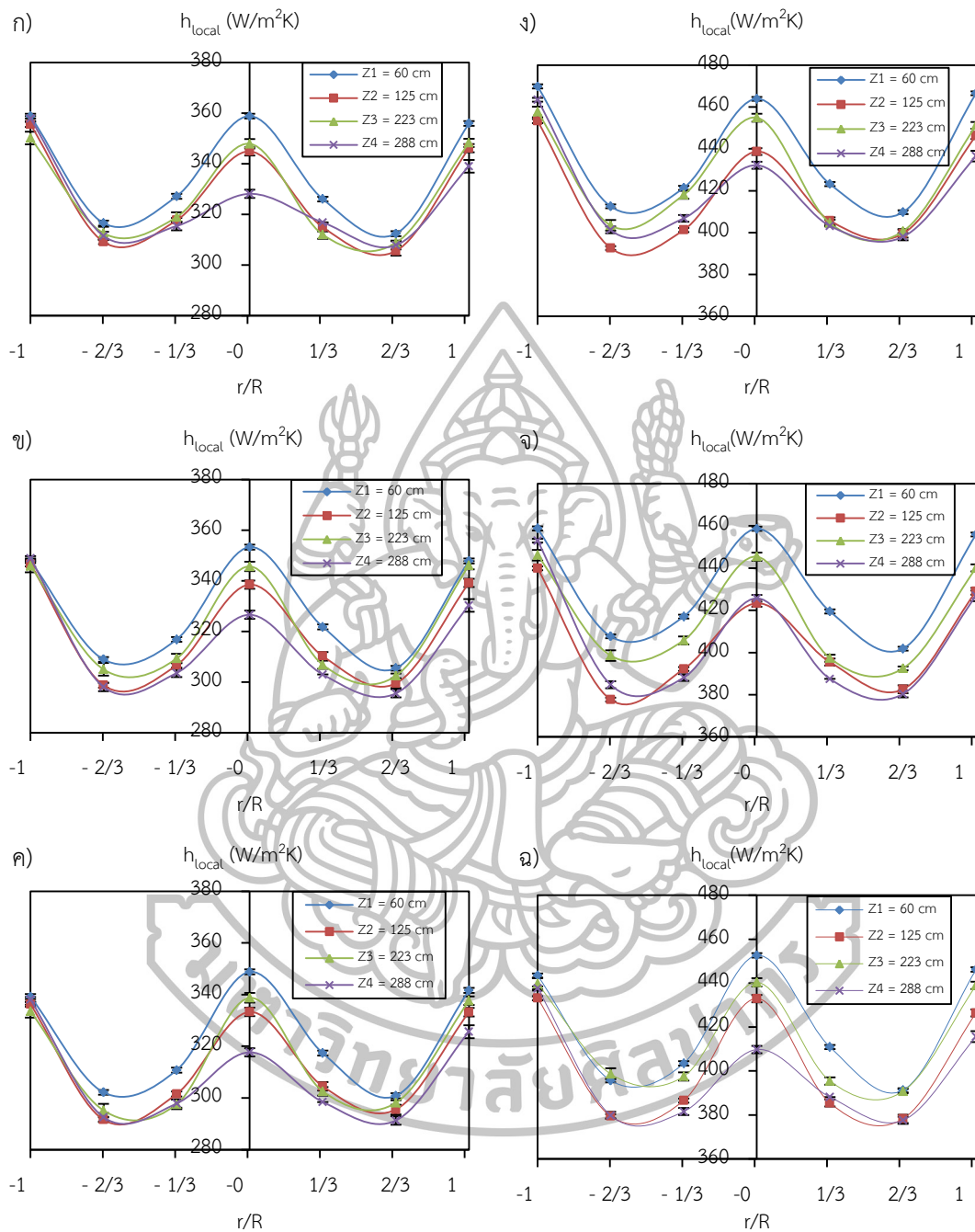
4.4 การถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแปด

จากผลการทดลอง เมื่อดำเนินการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนที่เกิดจากผนังเตาและจากอนุภาคเบตแล้ว จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสีความร้อนที่ได้นั้น มีค่ามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 2 ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมทั้งหมดของกระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวน ดังแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแผ่รังสีความร้อนนั้นไม่มีผลต่อระบบการถ่ายเทความร้อนในงานวิจัยนี้ จากการศึกษางานวิจัยที่ได้ถูกตีพิมพ์เป็นวารสาร [1-4, 6] พบว่าอุณหภูมิ 600 °C ขึ้นไป จึงจะมีผลต่อระบบการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้จากการแสดงอุณหภูมิของอากาศภายในเตาที่สภาวะต่างๆ ในหัวข้อ 4.3 พบว่า อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 263–300°C ดังนั้นในงานวิจัยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีจึงไม่ถูกนำมาพิจารณาในการทดลอง ทั้งนี้ช่วงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยที่ได้ในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 245 – 460 W/m²K เมื่อดำเนินการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเตาฟลูอิดไดซ์เบตแบบต่างๆ [18,19] ที่มีช่วงสภาวะของอุณหภูมิตเบต ตั้งแต่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจนถึง 600 °C พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง 48–240 W/m²K ซึ่งอาจเป็นผลจากรูปแบบของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันและรูปแบบของทรงเตาที่แตกต่างกัน จึงส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน

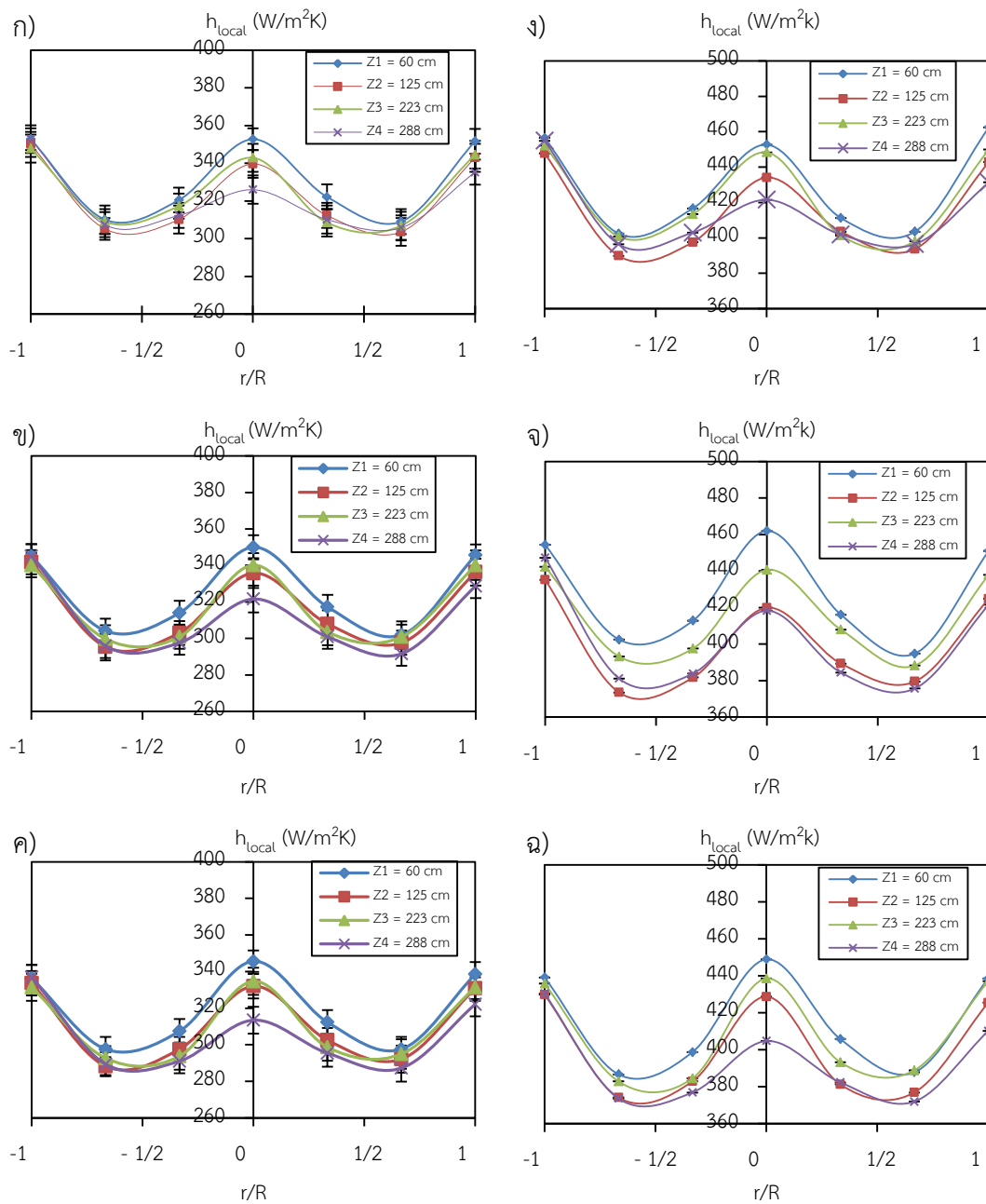
4.4.1 การกระจายตัวของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาไซโคลนแปดที่ตำแหน่งต่างๆ (Local heat transfer coefficient, h_{local})

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16–4.18 โดยเป็นการทดลองที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $U_{mf} - 3U_{mf}$ ที่ขนาดอนุภาคเบต 300–500 600–710 และ 710–1000 μm สัดส่วนการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิเท่ากับ 0 0.3 และ 0.5 ณ ตำแหน่งในแนวรัศมี (r/R) เท่ากับ $\pm 1, \pm 2/3, \pm 1/3$ และ 0 ตำแหน่งในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Z) เท่ากับ 60 125 223 และ 288 cm เหนือหัวกระจายอากาศ สำหรับหัวกระจายอากาศ $S_w = 2.76$ และ 2.98

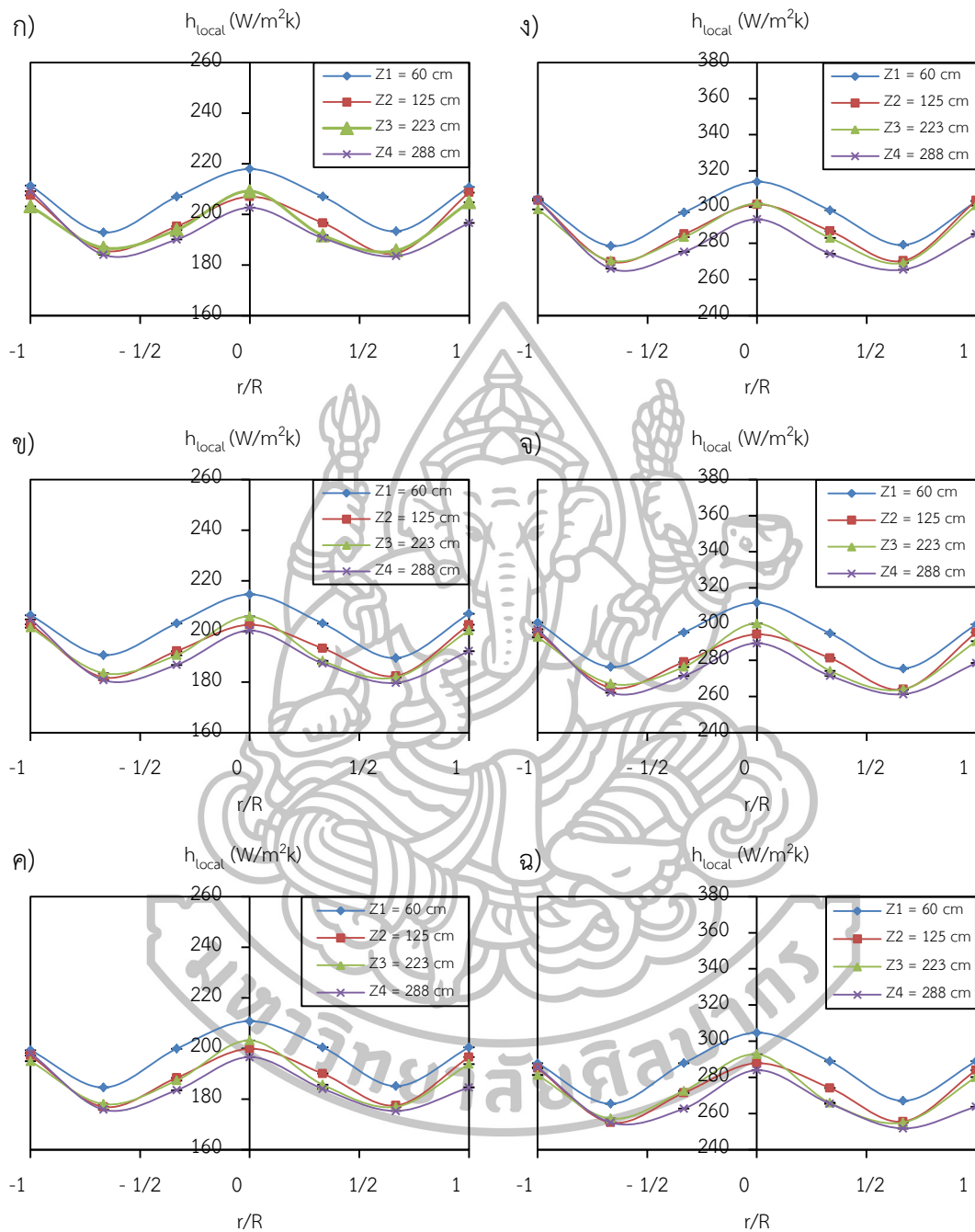
ในการพิจารณาผลการทดลองจะได้อย่างชัดเจนว่า ตำแหน่งความสูงในการวัดที่ $Z_1 = 60$ cm ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในตำแหน่งดังกล่าวมีค่าสูงสุดที่กึ่งกลางเตา ($r/R = 0$) จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงตามแนวรัศมีที่เพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอีกครั้งที่บริเวณขอบเตา ($r/R = \pm 1$) จากเหตุการณ์ดังกล่าวนี้เกิดจาก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางเตาเป็นบริเวณที่มีอนุภาคเบตเคลื่อนที่อยู่อย่างหนาแน่น (จากผลการทดลองการยกตัวของอนุภาคเบต) ดังนั้นอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคและอากาศเข้ามามีบทบาทต่อการถ่ายเทความร้อนมากขึ้นในขณะที่



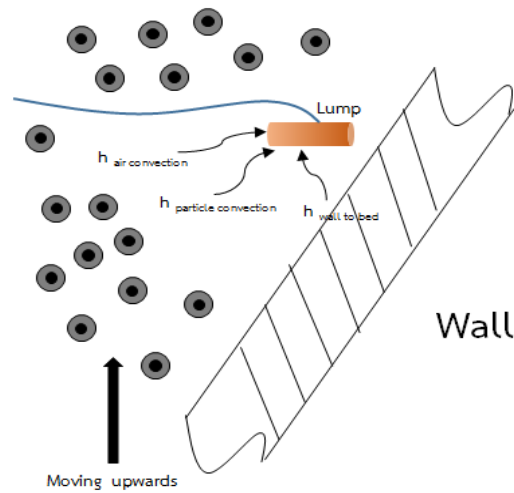
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm ที่ $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ และที่ $S_w = 2.98$ ที่ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm สำหรับ $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_t)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_t)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ



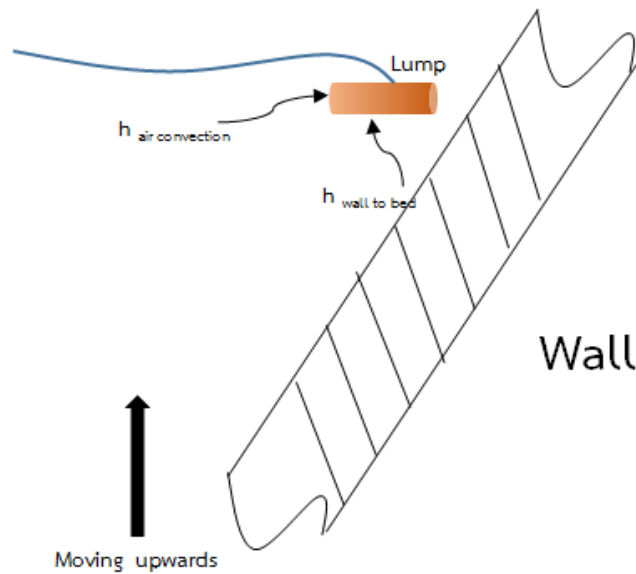
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710–1000 μm $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ และที่ $S_w = 2.98$ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ภาพแสดงจำลองลักษณะการพาความร้อนที่บริเวณขอบเตา ณ ขนาดอนุภาค 300-500 μm สภาวะ $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$ ที่ตำแหน่ง $Z = 60 \text{ cm}$

ตำแหน่ง $r/R = \pm 1/3$ และ $\pm 2/3$ ค่าสัมประสิทธิ์ลดลงอีกครั้ง เนื่องจากการยกตัวของอนุภาคที่เบาบาง ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยที่ได้ศึกษา [6,39] ทั้งนี้รูปแบบการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีก็จะมีผลแตกต่างกันไปตามสภาพเตา แต่อย่างไรก็ตามที่ $r/R = \pm 1$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะถูกกระตุ้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงอีกครั้ง ด้วยสาเหตุของการถ่ายเทความร้อนจากผนังเตาสู่วัสดุแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามา มีอิทธิพลเพิ่มเติมในระบบการถ่ายเทความร้อน (Wall to surface heat transfer) [29] ดังแสดงในรูปที่ 4.19

ทั้งนี้หากพิจารณาที่ระดับความสูง 125 cm 223 cm และ 288 cm เหนือหัวกระจายอากาศ (ตำแหน่งที่ไม่มีกรยกตัวของอนุภาคเบด) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกันทุกตำแหน่งแนวรัศมีและมีลักษณะการเกิดแนวโน้มของกราฟที่เหมือนกันหากพิจารณาต่อไป จะพบว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา ณ ความสูง $Z = 223 \text{ cm}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่า $Z = 125 \text{ cm}$ และ 288 cm ที่ทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากผลของรูปร่างเตา ณ ตำแหน่งที่วัดดังกล่าวมีท่อเชื่อมต่อไซโคลอนมีและมีพื้นที่หน้าตัดที่ขนาดลดลง ส่งผลให้ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ในช่วงความสูงดังกล่าวแม้จะไม่มีอนุภาคเบดเข้ามา มีอิทธิพลในการแลกเปลี่ยน แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผนังเตา ($r/R = \pm 1$) ก็มีการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับตำแหน่งความสูง $Z = 60 \text{ cm}$ เหนือหัวกระจายอากาศ เนื่องด้วยในช่วงความสูง 125 cm 223 cm และ 288 cm เหนือหัวกระจายอากาศ มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังเตาเข้ามา มีอิทธิพลเช่นกันดังแสดงแบบจำลองในรูปที่ 4.20

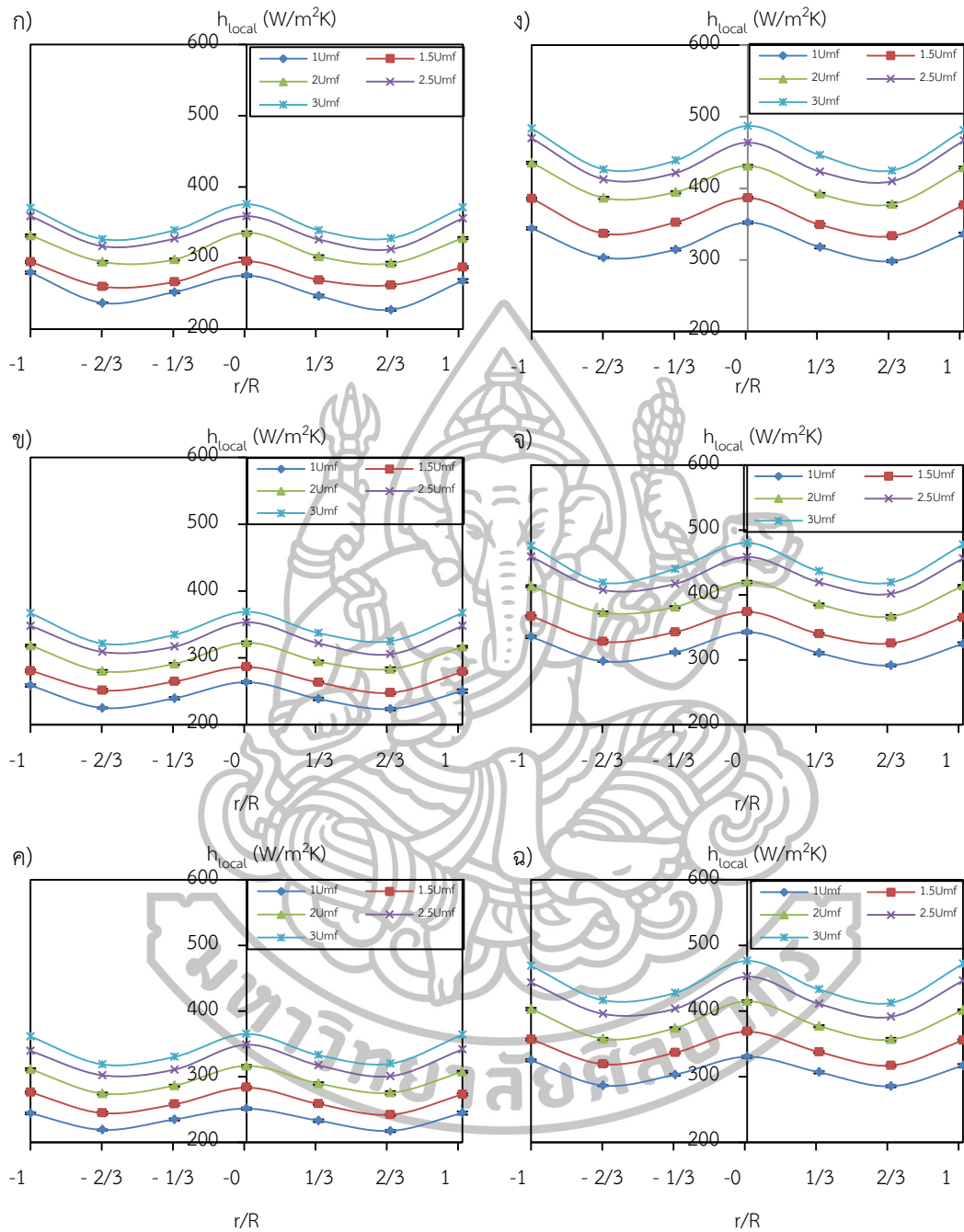


รูปที่ 4.20 ภาพแสดงการจำลองของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300-500 μm $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s + Q_r)/Q_p] = 0$ ที่ตำแหน่งความสูงที่ตำแหน่ง $Z = 125, 223$ และ 288 cm

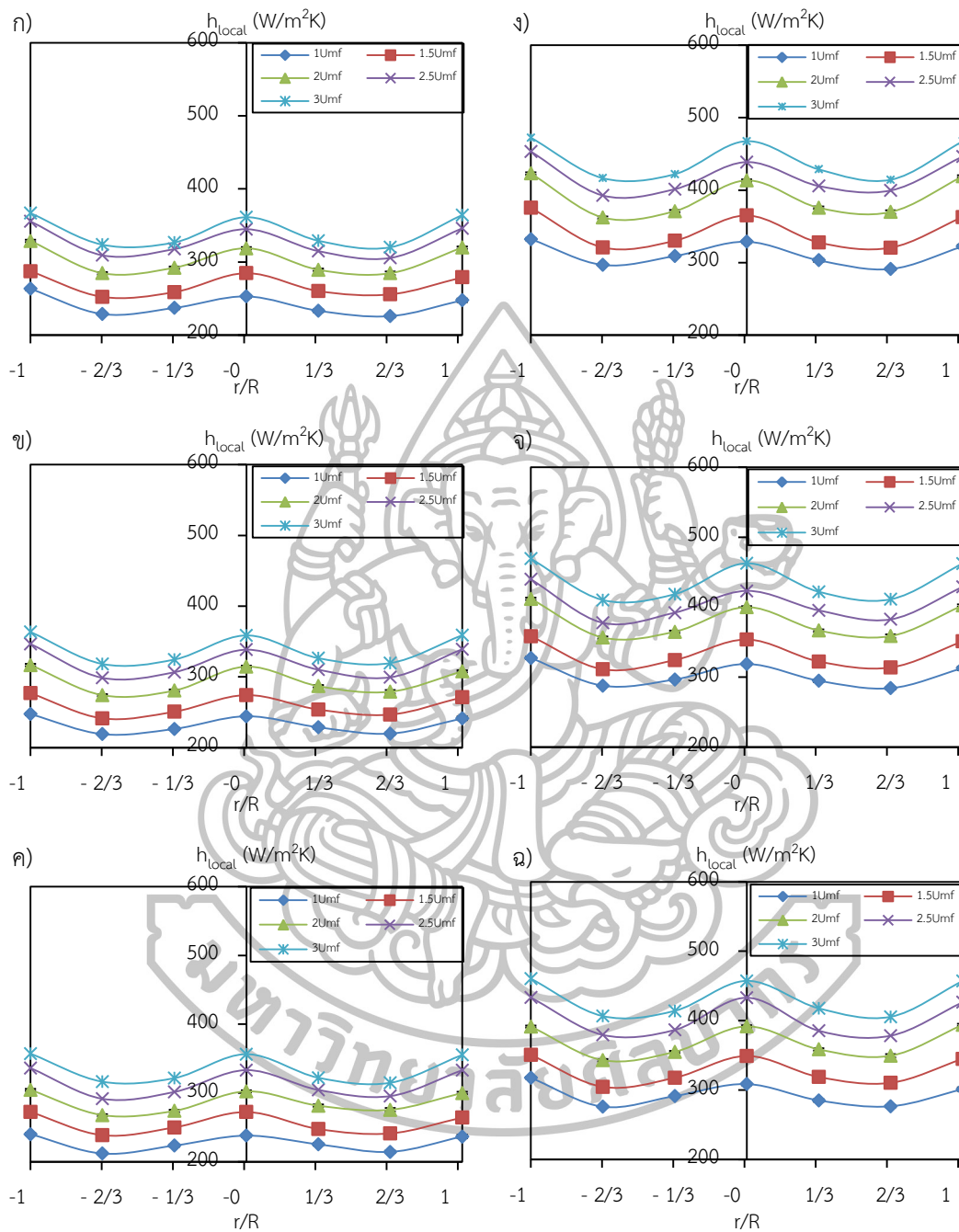
4.4.2 ผลของอากาศปฐุมภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ

จากรูปที่ 4.21–4.24 แสดงผลของความเร็วอากาศปฐุมภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระดับความสูง 60, 125, 223 และ 288 cm เหนือระบบกระจายอากาศ ตามลำดับ โดยแต่ละรูปจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สภาวะความเร็วอากาศปฐุมภูมิ $U_{mf} - 3U_{mf}$ ที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm สัดส่วนการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิต่ออากาศปฐุมภูมิเท่ากับ 0.3 และ 0.5 ณ ตำแหน่งในแนวรัศมี (r/R) เท่ากับ ± 1 , $\pm 2/3$, $\pm 1/3$ และ 0 สำหรับหัวกระจายอากาศ $S_w = 2.76$ และ 2.98

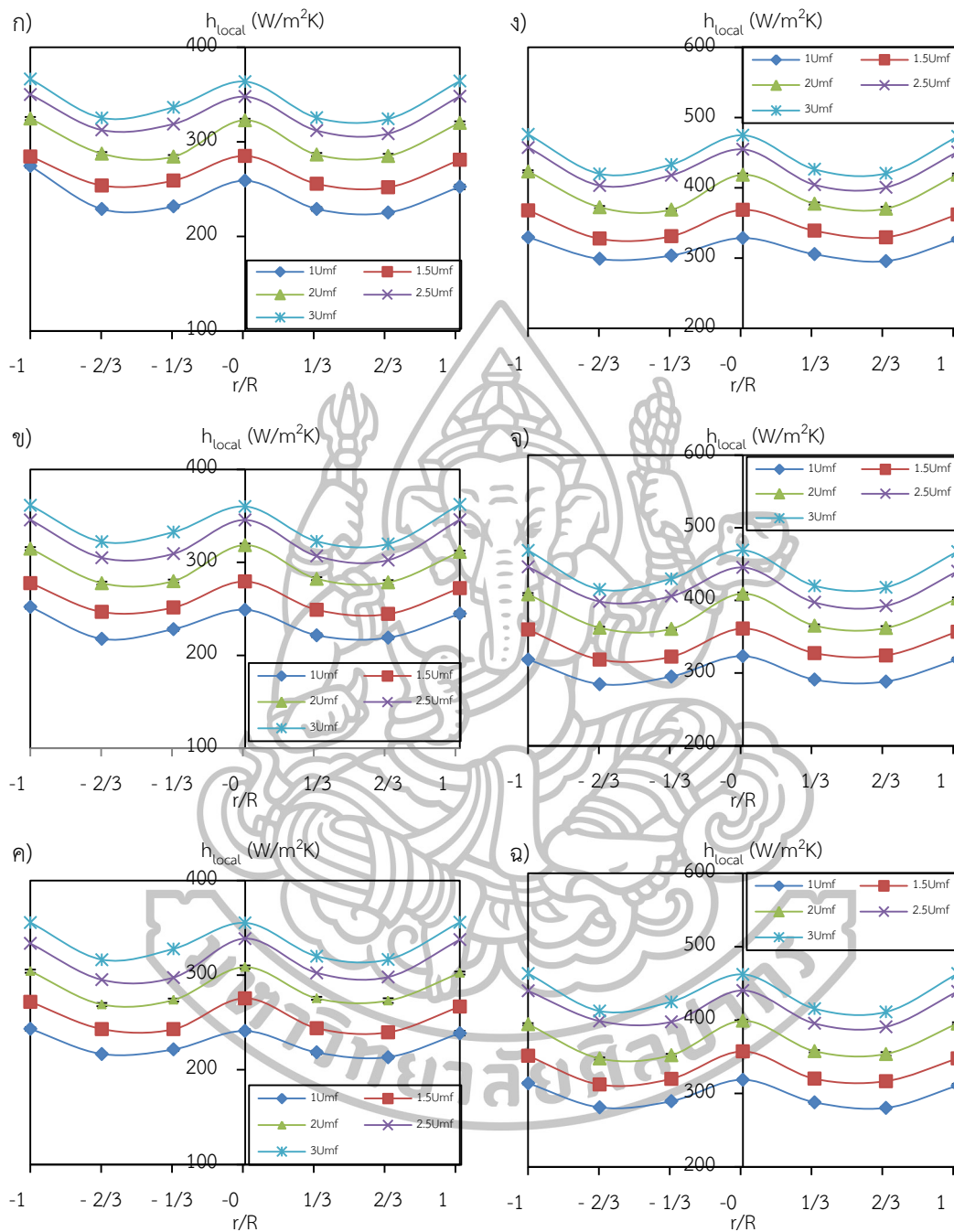
หากพิจารณาผลของอากาศปฐุมภูมิที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนพบว่า เมื่อความเร็วของอากาศถูกเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะถูกเพิ่มขึ้นที่ทุกระดับความสูงและทุกแนวรัศมีของเตาตามไปด้วย ดังในรูปที่ 4.21 ณ ตำแหน่งกึ่งกลางเตาและปราศจากอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ ขนาดอนุภาคเบด 300–500 μm ที่ระดับความสูง 60 cm เมื่ออากาศปฐุมภูมิเพิ่มจาก $2.5U_{mf}$ เป็น $3U_{mf}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่า $373 \text{ W/m}^2\text{K}$ เป็น $389 \text{ W/m}^2\text{K}$ ตามลำดับ หรือมีค่าเพิ่มขึ้นเทียบได้เป็น 4.3% จากเนื่องจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนั้น



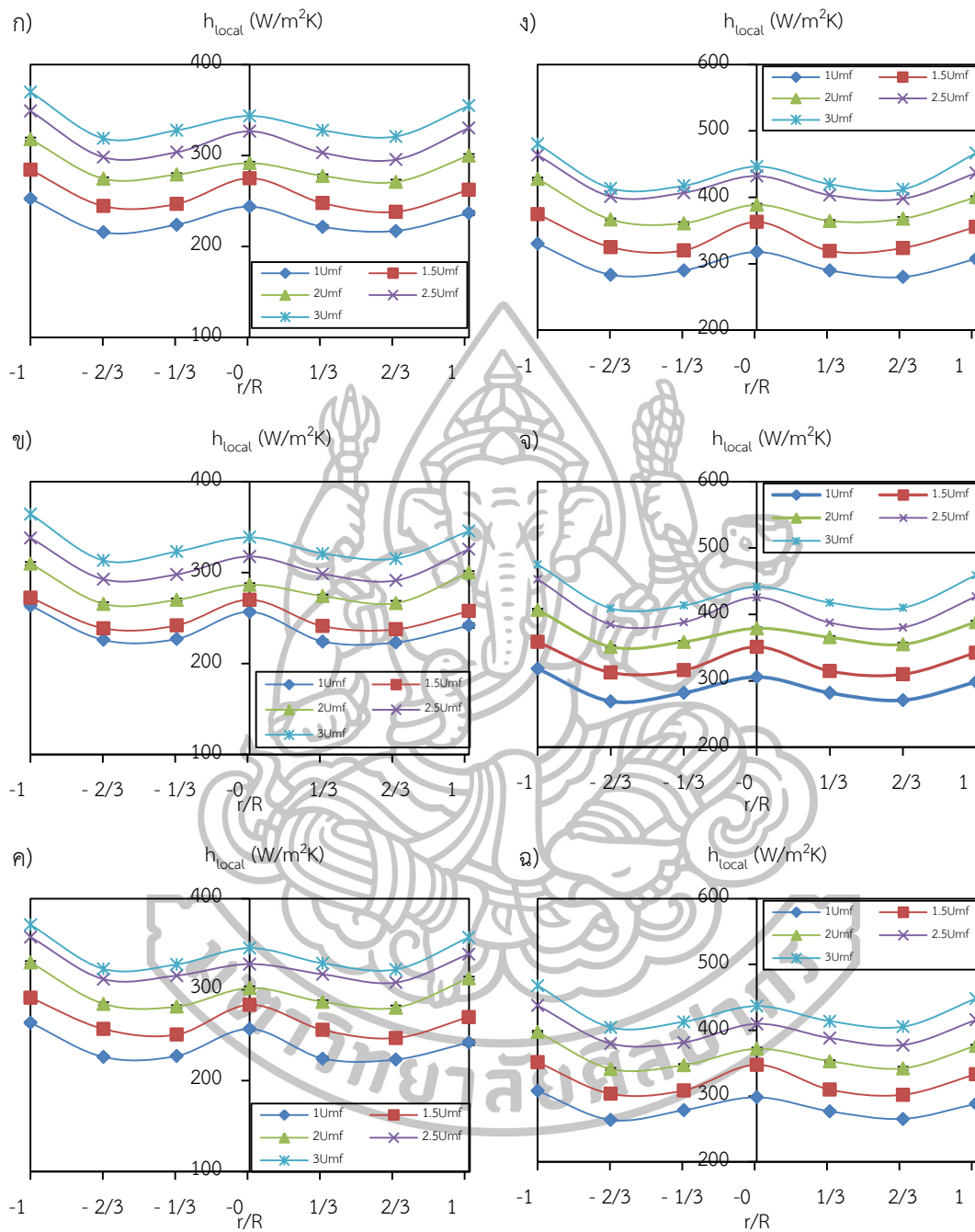
รูปที่ 4.21 แสดงผลของความเร็วกาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_5 + Q_7)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_5 + Q_7)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับที่ตำแหน่งความสูง 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศ



รูปที่ 4.22 แสดงผลของความเร็วยกอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับ ที่ตำแหน่งความสูง 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ



รูปที่ 4.23 แสดงผลของความเร็วอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับที่ตำแหน่งความสูง 223 cm เหนือหัวกระจายอากาศ



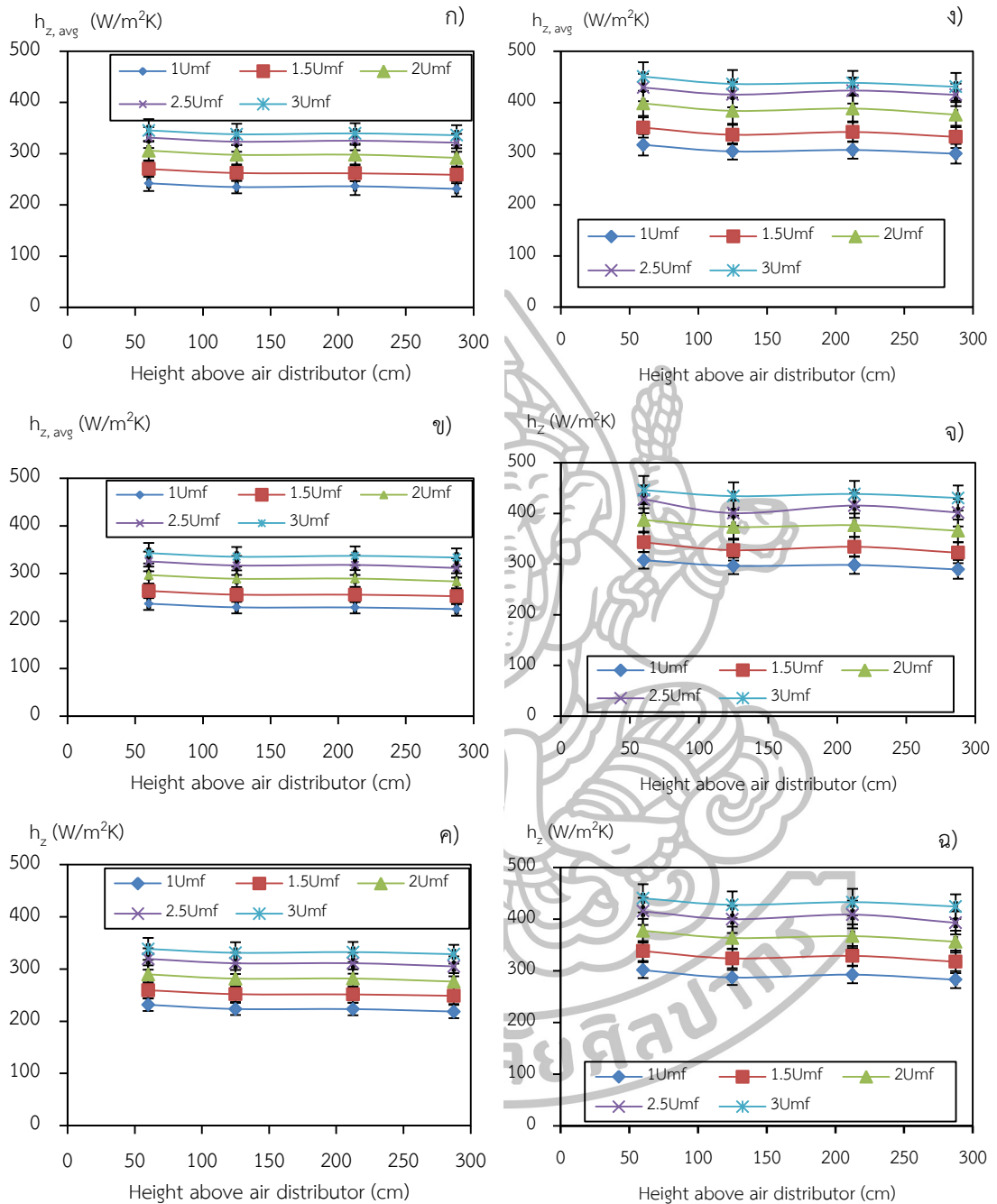
รูปที่ 4.24 แสดงผลของความเร็วมวลอากาศปฐภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ $d_p = 300\text{--}500$ μm โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 และที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับที่ $Z = 288$ cm เหนือหัวกระจายอากาศ

เกิดจากความเร็วอากาศปฐมภูมิ มีผลให้การยกตัวของอนุภาคเบดและการไหลเวียนของอากาศมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้อิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนกับอุปกรณ์การวัดมากขึ้น อีกทั้งเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่เป็นตัวกลางนำพาอนุภาคเบดอีกด้วย ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวเป็นไปในรูปแบบเดียวกันกับการทดลองที่ทำในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน [32,33]

อย่างไรก็ตามเมื่อศึกษาต่อไป จะพบว่า ที่ตำแหน่งความสูงในการวัด 60 cmเหนือหัวกระจายอากาศ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ U_{mf} แสดงในรูปที่ 4.20 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักในแนวตลอดหน้าตัดที่ตำแหน่ง $Z > 60$ cm เนื่องด้วยความเร็วอากาศ ณ สภาวะดังกล่าว ไม่สามารถส่งผลให้เบดเคลื่อนที่สัมผัสกับอุปกรณ์การวัดได้ ดังนั้นจึงมีเพียงอิทธิพลจากการถ่ายเทความร้อนจากอากาศเท่านั้นที่มีผลต่อระบบ ในทางตรงกันข้ามที่ความสูงในการวัด 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5U_{mf} - 3U_{mf}$ ค่าการถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีมีค่าแตกต่างกันตามความหนาแน่นของการยกตัวของอนุภาคเบดอันเป็นผลจากการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคเข้ามามีบทบาทต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อน (ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองอุทกพลศาสตร์การไหลที่แสดงให้เห็นว่าอนุภาคเบดเริ่มเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่ง $Z = 60$ cmเหนือหัวกระจายอากาศ เมื่อความเร็วอากาศ $1.5U_{mf}$) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ระดับ 125 223 และ 288 cm จะพบว่ารูปแบบการถ่ายเทความร้อนมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับตำแหน่ง $Z = 60$ cm ซึ่งในช่วงความสูงนี้แม้จะไม่มีกลไกของอนุภาคเข้ามามีบทบาทต่อการถ่ายเทความร้อนภายในเตาแต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากอิทธิพลของอัตราไหลของอากาศที่มากขึ้น

4.4.3. ผลกระทบเนื่องจากตำแหน่งความสูงภายในเตาที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามความสูง

รูปที่ 4.25 แสดงผลของความสูงที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในแนวรัศมี ที่ตำแหน่งความสูงการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน S_w เท่ากับ 2.76 และ 2.98 พบว่าที่ทุกๆ สภาวะการทดลองสามารถเห็นได้ถึงแนวโน้มการลดลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อความสูงถูกเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่ง 60 cm จะมีค่ามากที่สุด สาเหตุจากระดับความสูงในการวัด $Z = 60$ cm เป็นตำแหน่งใกล้กับวัสดุเบดมากที่สุด จึงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนจากอนุภาคเบดและอากาศเข้ามามีอิทธิพลต่อวัฏลัมปีในการแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าตำแหน่งอื่นๆ ในขณะที่ $Z = 125$ 223 และ 288 cm เหนือหัวกระจายอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงตามลำดับเนื่องจากไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏลัมปีกับวัสดุเบดของอนุภาคเบด (particle convection) แต่อย่างไรก็ตามบริเวณ 223 cm เหนือหัวกระจายอากาศ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วอากาศที่ไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเตลลดระหว่างไซโคลนซึ่งมีพื้นที่ขนาดเล็ก [34] เป็นเหตุที่ทำให้ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นและสามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงขึ้นกว่าเดิม



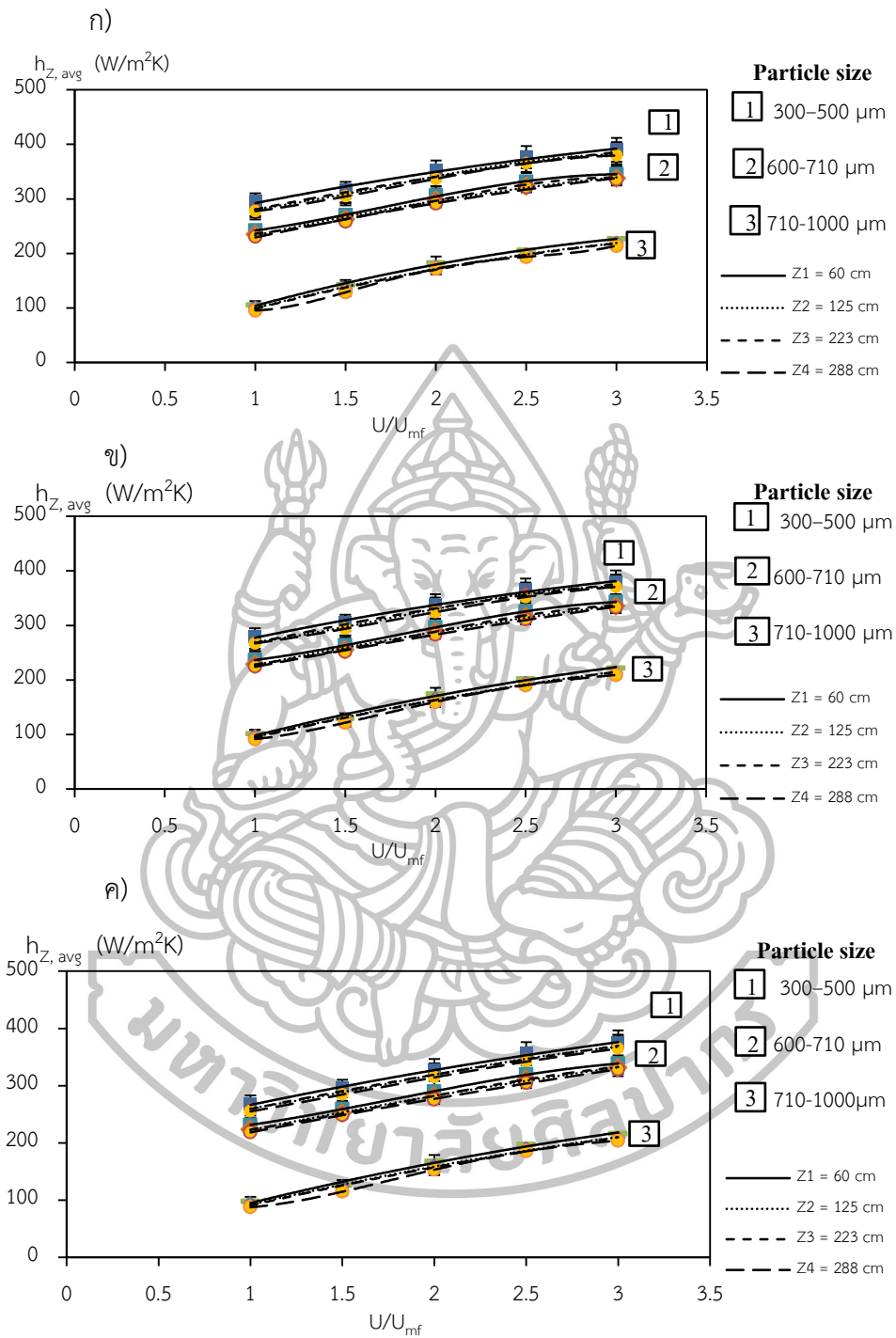
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลตำแหน่งความสูงโดยวัดจากระบบป้อนอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยขนาดอนุภาค 600–710 μm $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และค) 0.5 ที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5

4.4.5. ผลกระทบของขนาดอนุภาคเบตต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามความสูง (h_z)

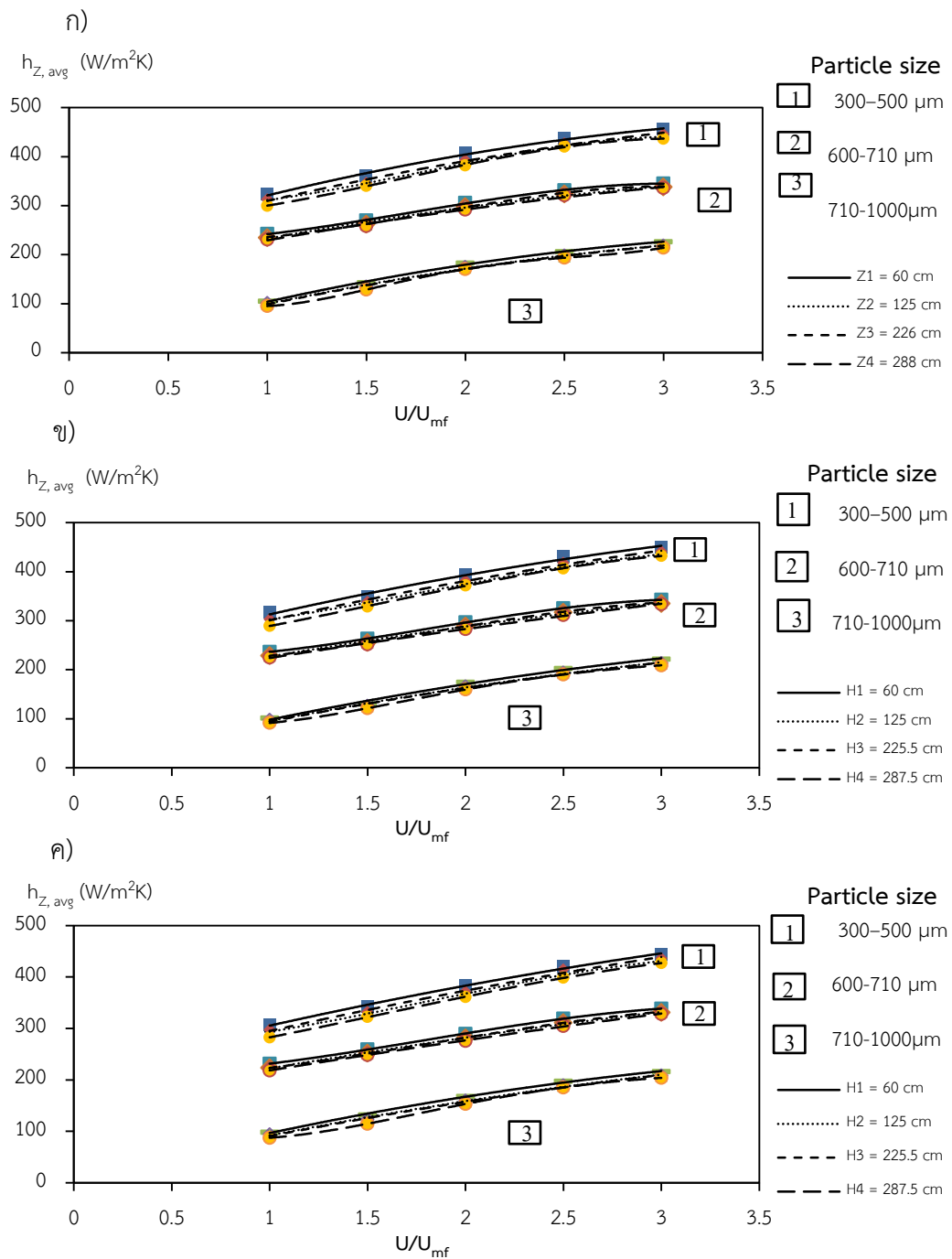
จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 ได้แสดงผลกระทบของอนุภาคเบตที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $U_{mf}-3U_{mf}$ สำหรับอนุภาคขนาด 300–500 600–710 และ 710–1000 μm สำหรับใบพัด $S_w = 2.76$ และ 2.98 โดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิต่ออากาศปฐมภูมิ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ 0 0.3 และ 0.5

ขนาดอนุภาคเบตเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง พบว่าการลดลงของอนุภาคเบตจะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ณ ทุกระดับตำแหน่งความสูงของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอย่างเห็นได้ชัด โดยที่สภาวะการทดลอง ณ ความสูง 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศ และขนาดอนุภาคเบต 300–500 μm ของทั้ง 2 กระจายอากาศ พบว่า ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาค 600–710 และ 710–1000 μm เนื่องจากอนุภาคเบตขนาดเล็กจะสามารถลอยตัวได้นานอีกทั้งมีการกระจายตัวได้ดีทั้งนี้เกิดจากความต้านทานทางความร้อนภายในอนุภาคขนาดเล็กมีน้อยกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอุปกรณ์การวัดได้ดีขึ้น [7,20] ดังแสดงการจำลองในรูปที่ 4.28 แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าการลดลงของอนุภาคจะส่งผลดีต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อนแต่การลดขนาดอนุภาคเข้าสู่ของเขตของ Geldart C ก็อาจจะส่งผลให้ระบบไม่เกิดกระบวนการฟลูอิดไลซ์เบตได้ในขณะเดียวกัน หากพิจารณาที่ 125 223 และ 288 cm เหนือหัวกระจายอากาศขนาดอนุภาคเบต 300–500 μm ของทั้ง 2 กระจายอากาศ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาค 600–710 และ 710–1000 μm ถึงแม้ว่าช่วงความสูงดังกล่าวจะไม่มีอนุภาคเบตที่ส่งต่อการถ่ายเทความร้อนก็ตาม แต่จากผลทดลองในหัวข้อ 4.3.2 จะพบได้ว่าอนุภาคที่ละเอียดจะมีการกระจายอุณหภูมิกายในเตาที่ทั่วทั้งเตามากกว่าอนุภาคหยาบ จึงเป็นเหตุผลยืนยันได้ว่าอนุภาคขนาดเล็กจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

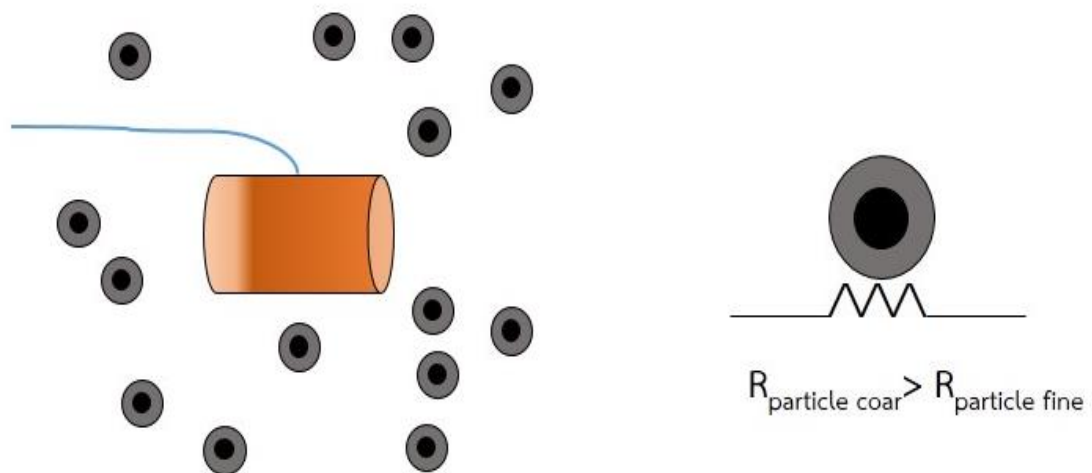
จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น อนุภาคเบตไม่ได้ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพียงบริเวณที่เกิดฟลูอิดไลซ์เบตอย่างหนาแน่นเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของระบบในเตาอีกด้วย



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลกระทบของอนุภาคเบดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับ d_p เท่ากับ 300–500 600–710, และ 710–1,000 μm สำหรับไบพัต $S_w = 2.76$ โดย $[(Q_s + Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5



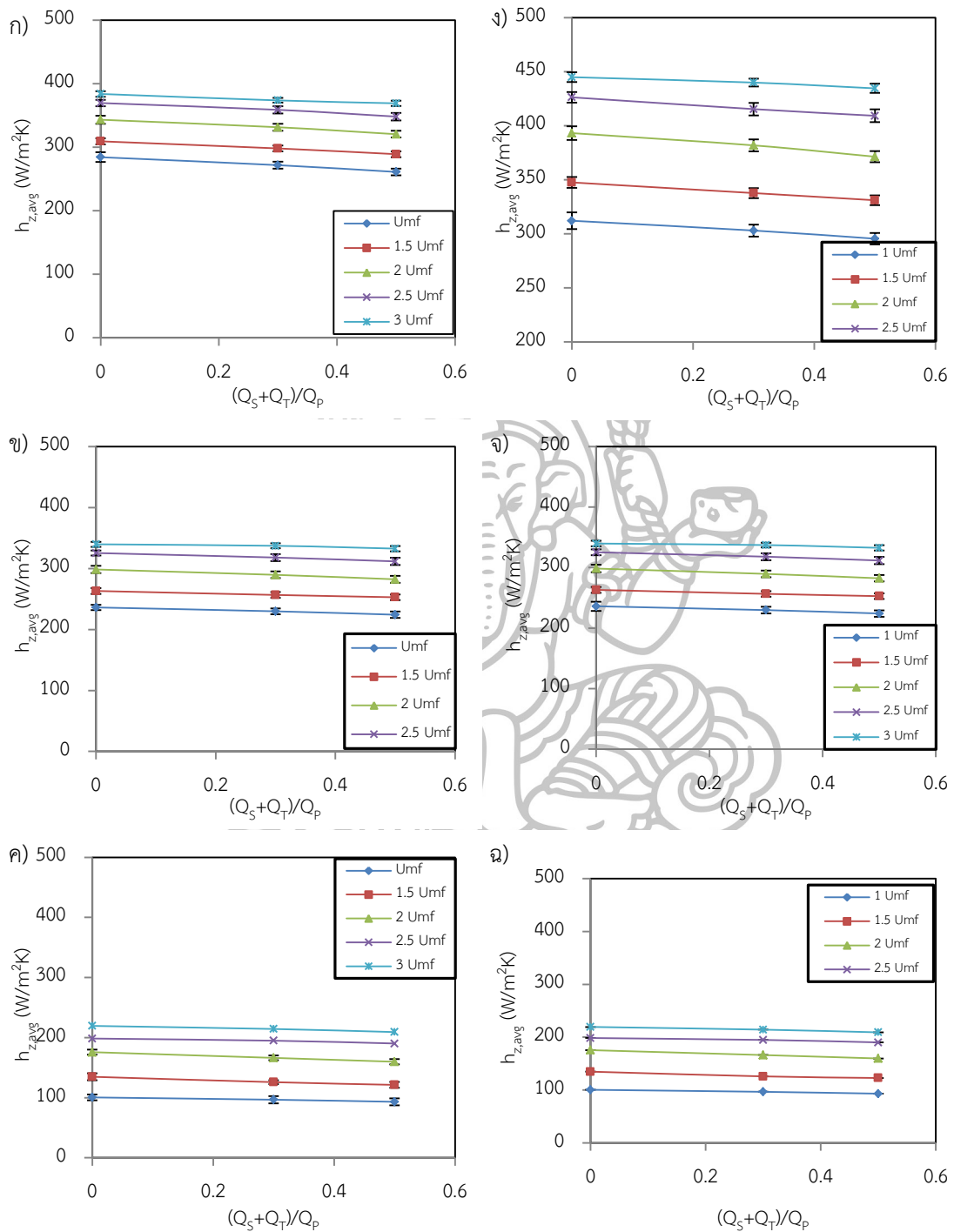
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลกระทบของอนุภาคเบดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับสำหรับ d_p เท่ากับ 300–500 600–710 และ 710–1,000 μm สำหรับใบพัด $S_w = 2.98$ โดย $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5



รูปที่ 4.28 ภาพจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนของอนุภาค

4.4.6 ผลกระทบเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยในแต่ละสภาวะการทดลอง ($h_{z,avg}$)

จากรูปที่ 4.29 เป็นกราฟแสดงผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ณ ตำแหน่งความสูง 60 125 223 และ 288 cmเหนือหัวกระจายอากาศ เมื่อความเร็วอากาศปฐมภูมิตั้งแต่ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับอนุภาคเบด 300–500 600–710 และ 710–1000 μm สำหรับหัวกระจายอากาศใบพัด Swirl number เท่ากับ 2.76 และ 2.98 จากการพิจารณาผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีแนวโน้มของผลการทดลองเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ได้ถูกตีพิมพ์ [4,25,30] ซึ่งเมื่ออัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิจะเป็นการลดอุณหภูมิอากาศภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบด (ผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 แสดงให้เห็นอุณหภูมิที่ลดลง) อีกทั้งอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิจะสร้างม่านอากาศภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดทำให้มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัสดุลัมปีกับอนุภาคเบด (particle convection) ได้น้อยลง จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง [15] แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิจะลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในเตา แต่ก็เป็นปัจจัยที่เพิ่มอุทกพลศาสตร์ในการยกตัวของอนุภาคได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตลอดทั้งความสูงเตา ที่ $S_w = 2.76$ ของ d_p เท่ากับ ก) 300–500 μm ข) 600–710 μm และ ค) 710–1000 μm และ ที่ $S_w = 2.98$ สำหรับ d_p เท่ากับ ง) 300–500 μm จ) 600–710 μm และ ฉ) 710–1000 μm

4.5 การสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนไฮโคลนแฝด

ในงานวิจัยได้ดำเนินการพิจารณาความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนไฮโคลนแฝดร่วมกับสภาวะการทดลองที่เปลี่ยนแปลง (อุณหภูมิเบตขนาดอนุภาคเบตตำแหน่งความสูงการวัดความเร็วอากาศปฐมภูมิ ทุตติภูมิ และตติภูมิ) เพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้จากการทดลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาในหัวข้อการทดลองที่ผ่านมา พบว่าค่าการแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตานั้น เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทร้อนรวมทั้งหมด ($h_t = h_{gc} + h_{pc} + h_r$) มีค่ามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 2 ณ สภาวะอุณหภูมิเบต 300 °C ด้วยเหตุนี้ตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีจึงไม่ถูกนำมาคิดในความสัมพันธ์นี้ [1-4, 6] จะมีเพียงตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคและจากอากาศ ($h_t = h_{gc} + h_{pc}$) เท่านั้น ทั้งนี้ในการสร้างความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์รวมที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์นั้น จะดำเนินการแบ่งความสัมพันธ์ 2 ช่วง คือ 1) ช่วงที่มีฟลูอิดไดซ์เบดอย่างหนาแน่น ($Z < 125$ cm) ซึ่งเป็นช่วงที่มีการถ่ายเทของอนุภาคเบตและอากาศ และ 2) ช่วงที่มีฟลูอิดไดซ์เบดแบบเบาบาง ($Z \geq 125$ cm) ซึ่งเป็นช่วงที่มีเพียงอิทธิพลจากอากาศเท่านั้น

สำหรับขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนไฮโคลนแฝดสามารถแสดงขั้นตอน รายละเอียดดังนี้

4.5.1 จัดรูปแบบตัวแปรไร้มิติโดยทฤษฎี Buckingham π

ในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบไปด้วยตัวแปรจำนวนมากที่เกี่ยวข้อง ผลการทดลองนำไปสู่การวิเคราะห์มิติของสมการการทดลอง ทฤษฎี Buckingham π [4] ถูกนำมาใช้ในการหากลุ่มไร้มิติ และความสัมพันธ์ของการทดลองถูกพัฒนาขึ้นโดยวิธี Multiple regression method ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่อไปนี้

$$F \left(h_z, g(\rho_s - \rho_g), C_{p_g}, k_g, \mu_g, d_p, Z, \left(1 - \frac{Q_s + Q_T}{Q_p} \right), \frac{U_{sf}}{U_{mf}}, \frac{U_z}{U_{mf}}, \frac{U_{sf}}{U_z}, S_w, \frac{H}{Z} \right)$$

เมื่อ

F คือ ฟังก์ชัน

C_{p_g} คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของก๊าซ, J/kgK

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค, m

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2

- h_z คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตามความสูง, W/m^2K
- H คือ ความสูงเตาทั้งหมด, m
- k_g คือ ค่าการนำความร้อนของก๊าซ,
- Q_{sf} คือ อัตราการไหลของอากาศขาเข้าหวักระจายอากาศ,
- Q_{mf} คือ อัตราการไหลของอากาศต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน,
- Q_P คือ อัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ,
- Q_S คือ อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิ,
- Q_T คือ อัตราการไหลของอากาศตติยภูมิ,
- Q_Z คือ อัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งความสูงใดๆ,
- S_w คือ Swirl Number
- U_{sf} คือ ความเร็วอากาศขาเข้าหวักระจายอากาศ, m/s
- U_{mf} คือ ความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน, m/s
- U_P คือ ความเร็วอากาศอากาศปฐมภูมิ, m/s
- U_S คือ ความเร็วอากาศทุติยภูมิ, m/s
- U_T คือ ความเร็วอากาศตติยภูมิ, m/s
- U_Z คือ ความเร็วอากาศที่ความสูงในการวัดที่ตำแหน่งใดๆ, m/s
- Z คือ ความสูงในการวัดที่ตำแหน่งใดๆ เหนือหวักระจายอากาศ, m

สามารถจัดตัวแปรไร้มิติให้อยู่ในรูปของ Nusselt Number ดังต่อไปนี้

$$Nu_z = f \left(Ar, Pr, Re, \left(1 - \frac{Q_S + Q_T}{Q_P} \right), \frac{H}{Z}, S_w \right) \quad \text{Model 1}$$

$$Nu_z = f \left(Ar, Pr, Re, \left(\frac{U_Z}{U_{mf}} \right), \frac{H}{Z}, S_w \right) \quad \text{Model 2}$$

$$Nu_z = f \left(Ar, Pr, Re, \left(\frac{U_{sf}}{U_z} \right), \frac{H}{Z}, S_w \right) \quad \text{Model 3}$$

$$Nu_z = f \left(Ar, Pr, Re, \left(1 - \frac{Q_S + Q_T}{Q_P} \right), \frac{Z}{d_p}, S_w \right) \quad \text{Model 4}$$

$$Nu_z = f \left(Ar, Pr, Re, \left(\frac{U_Z}{U_{mf}} \right), \frac{Z}{d_p}, S_w \right) \quad \text{Model 5}$$

$$Nu_z = f \left(Ar, Pr, Re, \left(\frac{U_{sf}}{U_z} \right), \frac{Z}{d_p}, S_w \right) \quad \text{Model 6}$$

ตารางที่ 4.1 แสดงสมการของช่วงความสูงไม่เกิน 125 cm

สมการ	ค่า R ²	MBD
$1.Nu_z = 0.46 \cdot (Ar)^{0.61} \cdot (Pr)^{18.11} \cdot (Re_f)^{-0.41} \left(1 - \left(\frac{Q_s + Q_r}{Q_p}\right)\right)^{0.21} \cdot \left(\frac{H}{Z}\right)^{-7.04} \cdot (S_w)^{2.49}$	0.86	19.06
$2.Nu_z = 0.26 \cdot (Ar)^{0.37} \cdot (Pr)^{-6.94} \cdot (Re_f)^{-0.19} \left(\frac{U_z}{U_{mf}}\right)^{0.39} \cdot \left(\frac{H}{Z}\right)^{-7.04} \cdot (S_w)^{4.01}$	0.87	20.49
$3.Nu_z = 0.32 \cdot (Ar)^{0.61} \cdot (Pr)^{20.03} \cdot (Re_f)^{-0.39} \left(\frac{U_{sf}}{U_{mf}}\right)^{0.38} \cdot \left(\frac{H}{Z}\right)^{-7.75} \cdot (S_w)^{1.51}$	0.86	18.93
$4.Nu_z = 0.30 \cdot (Ar)^{0.24} \cdot (Pr)^{16.84} \cdot (Re_f)^{-0.41} \left(1 - \left(\frac{Q_s + Q_r}{Q_p}\right)\right)^{0.21} \cdot \left(\frac{Z}{d_p}\right)^{-1.11} \cdot (S_w)^{2.49}$	0.86	19.06
$5.Nu_z = 0.35 \cdot (Ar)^{0.20} \cdot (Pr)^{-6.36} \cdot (Re_f)^{-0.19} \left(\frac{U_z}{U_{mf}}\right)^{0.39} \cdot \left(\frac{Z}{d_p}\right)^{0.51} \cdot (S_w)^{4.01}$	0.87	20.49
$6.Nu_z = 0.31 \cdot (Ar)^{0.19} \cdot (Pr)^{18.58} \cdot (Re_f)^{-0.39} \left(\frac{U_{sf}}{U_{mf}}\right)^{0.38} \cdot \left(\frac{Z}{d_p}\right)^{-1.27} \cdot (S_w)^{1.51}$	0.86	20.49

4.5.2 การดำเนินสร้างความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบ หมุนวนไซโคลนแฝด

จากผลการทดลองในหัวข้อทฤษฎีการไหลของในเรือการยกตัวของอนุภาคเบด ภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบด พบว่า ค่าการยกตัวของอนุภาคเบดจะมีค่าน้อยที่สุด(เข้าใกล้ศูนย์) ณ ความสูง 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ ด้วยเหตุนี้ ในงานวิจัยจึงแบ่งออกเป็นสองส่วนที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งมีความสูงตั้งแต่ผิวเบดถึงความสูง 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ และส่วนที่ไม่เกิดฟลูอิดไดซ์เบดตั้งแต่ 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศขึ้นไป

4.5.2.1 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดที่มี ตำแหน่งความสูงในการวัดไม่เกิน 125 cm

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและให้ทิศทางของความสัมพันธ์ของสมการกับการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันในรูปที่ 4.30 และรูปที่ 4.31 จึงได้แสดงกราฟแนวโน้มของตัวแปรไร้มิติที่ส่งผลต่อค่า Nusselt Number ในช่วงความสูงการวัดในการทดลองไม่เกิน 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ จากการดำเนินการ พบว่ากราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้น ได้แก่ Nu - Ar รูปที่ 4.31ก), Nu - $[1 - ((Q_s + Q_r) / Q_p)]$ รูปที่ 4.31ง), u_z / u_{mf} รูปที่ 4.30ก), u_{sf} / u_z รูปที่ 4.30ข), Nu - H/z รูปที่ 4.30ค) และ Nu - S_w รูปที่ 4.30จ) สำหรับกราฟที่มีลักษณะลดลง ได้แก่ Nu - Pr รูปที่ 4.31ข), Nu - Re_f

รูปที่ 4.31ค) และ $Nu-Z/d_p$ รูปที่ 4.31ง) จากนั้นดำเนินการพิจารณาความสัมพันธ์ที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลจริง ขอบเขตตั้งแต่ $30 \text{ cm} \leq Z \leq 125 \text{ cm}$ เหนือหัวกระจายอากาศ สามารถแสดงสมการได้ตารางที่ 4.1

โดย

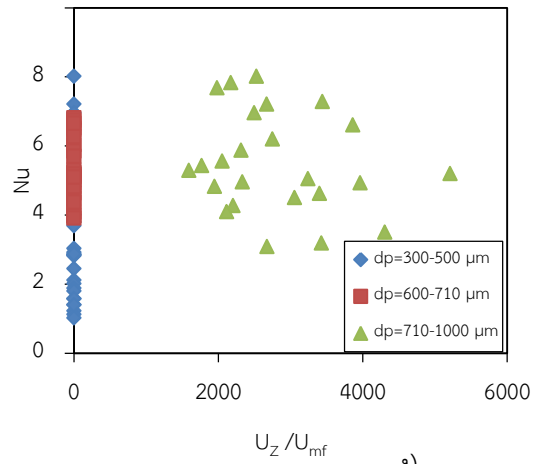
$$Re_f = \frac{\rho_g d_p U_{sf}}{\mu_g}, Ar = \frac{d_p^3 g (\rho_s - \rho_g)}{\mu_g^2}, Pr = \frac{C_{p_g} \mu_g}{k_g}$$

สำหรับตรวจสอบการกระจายตัวของค่าได้จากความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งแสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt Number เฉลี่ย (แนวนอน) ที่ได้จากการทดลองกับ Nusselt Number เฉลี่ย (แนวนอน) ที่ได้จากการทำนายจากรูปแบบความสัมพันธ์ที่ได้ทั้ง 6 รูปแบบ ในขอบเขตความสูง $30 \text{ cm} \leq Z \leq 125 \text{ cm}$, $260.14 \leq AR \leq 7001.60$, $1.66 \leq Pr \leq 1.80$ และ $921.30 \leq Re_f \leq 5644.13$ โดยมีรูปแบบสมการในความสัมพันธ์แบบตัวแปรไร้มิติ ซึ่งจากการดำเนินการด้วยวิธี Multi Regression แล้ว พบว่าค่าความถูกต้อง (R^2) ของสมการอยู่ในช่วงระหว่าง $0.8 - 0.87$ ซึ่งเห็นได้ว่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงได้ดำเนินการตรวจสอบความสัมพันธ์เทียบกับแนวโน้มจากการทดลองในรูปที่ 2.30 และ 2.31 พบว่า รูปแบบที่ 2 และ รูปแบบที่ 5 มีความสัมพันธ์ที่ตรงตามการทดลองที่สุดแต่อย่างไรก็ตามเพื่อหาสมการที่ดีที่สุด จึงได้ดำเนินการตรวจสอบความกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากสมการ (MBD) ควบคู่กับ R^2 ซึ่งจะพบว่าความค่าการกระจายตัวของสมการที่ 2 และ 5 มีค่าเท่ากัน ด้วยเหตุผลข้างต้น จึงสรุปได้ว่า สมการที่ 2 และ 5 สามารถถูกนำไปใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาไซโคลนแปดได้

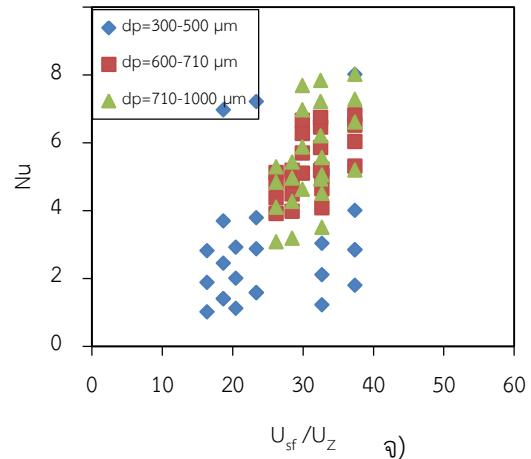
4.5.2.2 ความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดที่มีตำแหน่งความสูงในการวัดตั้งแต่ 125 cm ขึ้นไป

จากรูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34 ได้แสดงกราฟแนวโน้มของตัวแปรไร้มิติ ที่ส่งผลต่อค่า Nusselt Number จากการดำเนินการ พบว่ากราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้น ได้แก่ $Nu - (H/Z)$ รูปที่ 4.33ก), รูปที่ $Nu-Pr$ 4.34ก), $Nu-Re$ รูปที่ 4.33ข), $Nu-[1-((Q_s+Q_T)/Q_p)]$ รูปที่ 4.34ค), $Nu-U_z/U_{mf}$ รูปที่ 4.34ง), $Nu-U_{sf}/U_{mf}$ รูปที่ 4.34จ) และ $Nu-S_w$ รูปที่ 4.34ฉ) สำหรับกราฟที่มีลักษณะลดลง ได้แก่ $Nu-Z/d_p$ รูปที่ 4.33ข) และ $Nu-Pr$ รูปที่ 4.34ก)

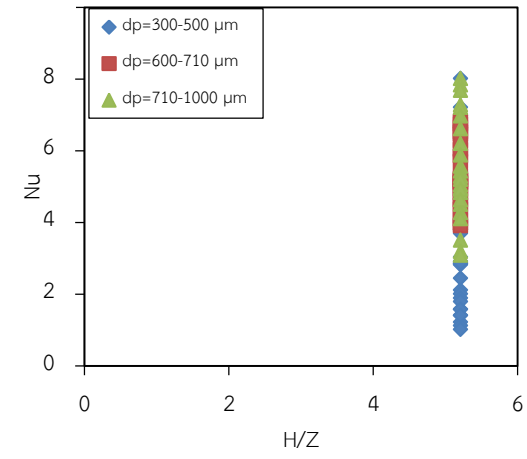
ก)



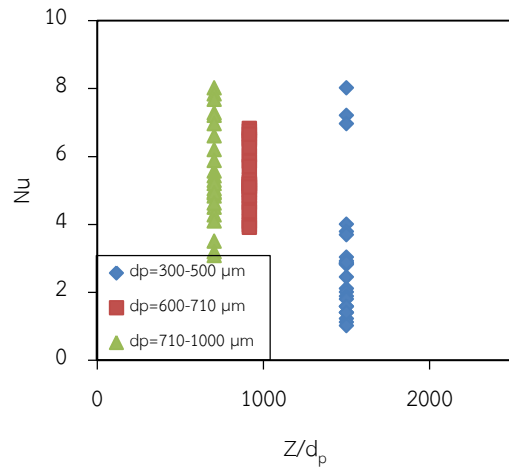
ข)



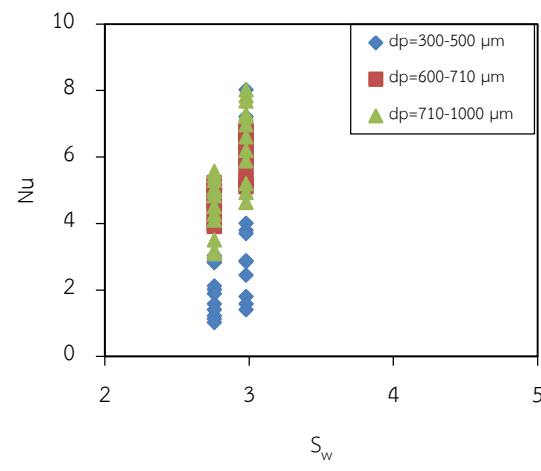
ค)



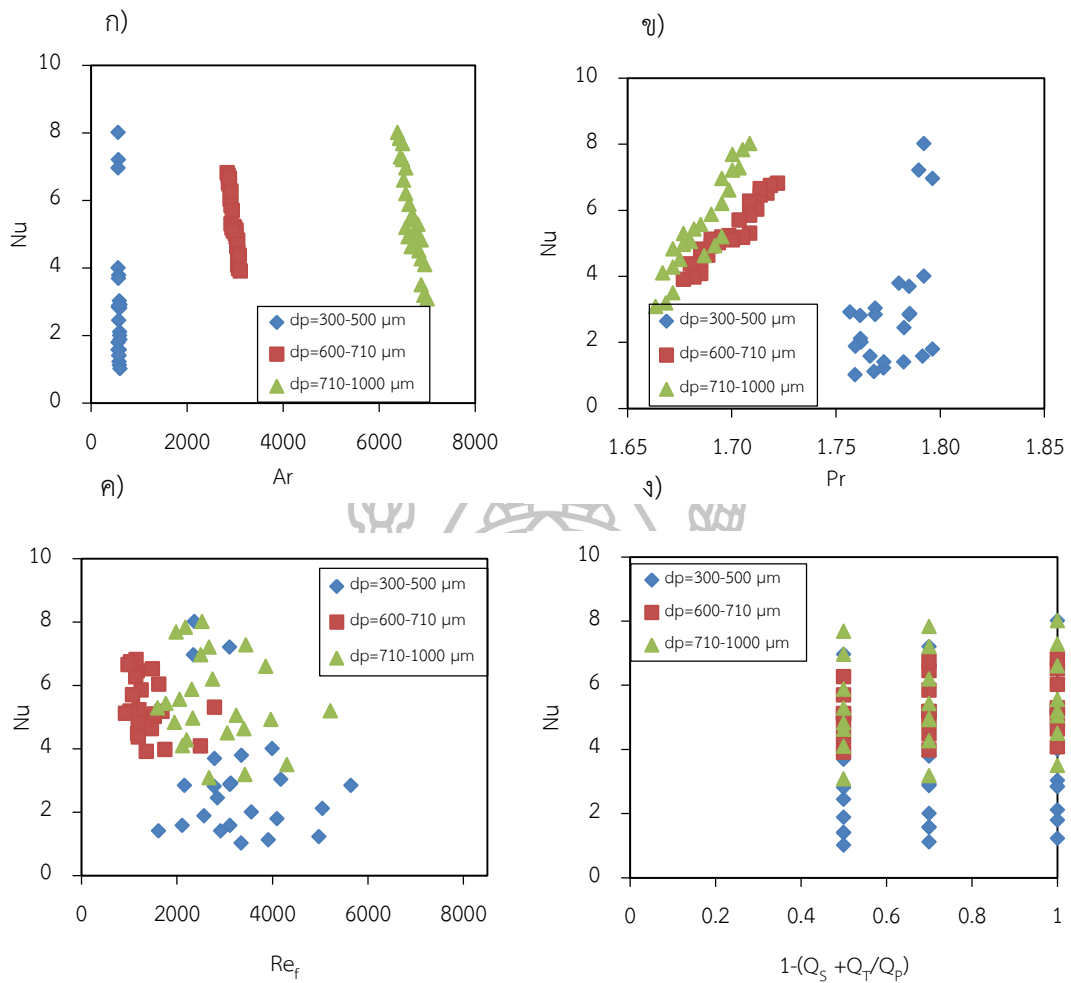
ง)



จ)



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟ $Z < 125 \text{ cm}$ เนื้อหั่วกระจายอากาศ ก) $Nu-(U_z/U_{mf})$ ข) $Nu-(U_{sf}/U_z)$ ค) $Nu-(H/Z)$ ง) $Nu-(Z/d_p)$ และ จ) $Nu-S_w$



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดลอง ในช่วงความสูงการวัดในการทดลองไม่เกิน 125 cm เทียบหัวกระจายอากาศของกราฟชนิด ก) Nu-Ar ข) Nu-Pr ค) Nu-Re และ ง) Nu- $\{1-[(Q_s+Q_r)/Q_p]\}$

สำหรับในช่วงความสูงตั้งแต่ 125 cm <math> < Z \leq 325 </math> cm เป็นส่วนที่ไม่พบการเคลื่อนตัวของอนุภาคเบด (เป็นช่วง Freeboard zone ซึ่งมีปริมาณของอนุภาคเบดอยู่อย่างเบาบาง) ด้วยเหตุนี้ในความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น จึงไม่มีตัวแปรของ Ar เนื่องจากการ Ar เป็นตัวแปรไร้มิติที่บ่งบอกคุณลักษณะของของไหลสองชนิดที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันเกิดขึ้น ดังนั้นในความสัมพันธ์การพิจารณาความสัมพันธ์ที่ได้จากการทำนายเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงสมการได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงสมการของช่วงความสูงตั้งแต่ 125 cm

สมการ	ค่า R ²	MBD
$1.Nu_z = 0.46 \cdot (\text{Pr})^{-12.53} \cdot (\text{Re})^{0.47} \left(1 - \left(\frac{Q_s + Q_T}{Q_p} \right) \right)^{1.33} \cdot \left(\frac{H}{Z} \right)^{0.26} \cdot (S_w)^{7.70}$	0.75	8.77
$2.Nu_z = 3.47 \cdot (\text{Pr})^{-6.53} \cdot (\text{Re})^{-0.19} \left(\frac{U_z}{U_{mf}} \right)^{0.46} \cdot \left(\frac{H}{Z} \right)^{0.10} \cdot (S_w)^{6.27}$	0.78	7.88
$3.Nu_z = 0.22 \cdot (\text{Pr})^{-11.13} \cdot (\text{Re})^{0.42} \left(\frac{U_{sf}}{U_{mf}} \right)^{0.22} \cdot \left(\frac{H}{Z} \right)^{0.08} \cdot (S_w)^{6.13}$	0.73	8.98
$4.Nu_z = 0.70 \cdot (\text{Pr})^{-8.42} \cdot (\text{Re})^{-0.43} \left(1 - \left(\frac{Q_s + Q_T}{Q_p} \right) \right)^{0.98} \cdot \left(\frac{Z}{d_p} \right)^{-0.21} \cdot (S_w)^{6.06}$	0.75	8.83
$5.Nu_z = 5.56 \cdot (\text{Pr})^{-3.80} \cdot (\text{Re})^{-0.19} \left(\frac{U_z}{U_{mf}} \right)^{0.46} \cdot \left(\frac{Z}{d_p} \right)^{-0.17} \cdot (S_w)^{5.80}$	0.79	7.72
$6.Nu_z = 0.31 \cdot (\text{Pr})^{-8.78} \cdot (\text{Re})^{0.41} \left(\frac{U_{sf}}{U_{mf}} \right)^{0.21} \cdot \left(\frac{Z}{d_p} \right)^{-0.147} \cdot (S_w)^{5.71}$	0.74	8.95

$$\text{Re} = \frac{\rho_g D_z u_z}{\mu_g}$$

โดย

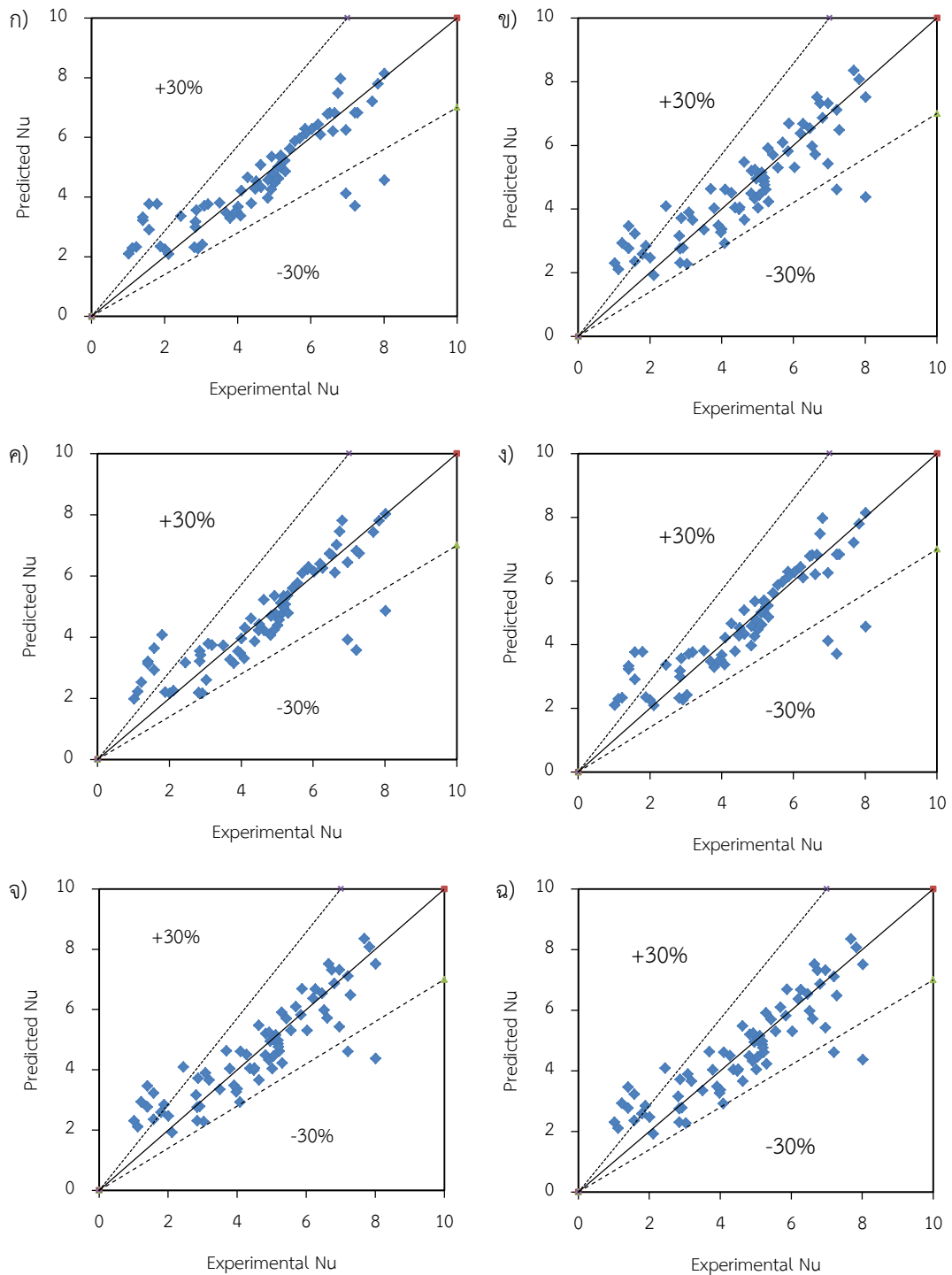
ซึ่ง

Re = Reynolds Number ของอากาศ

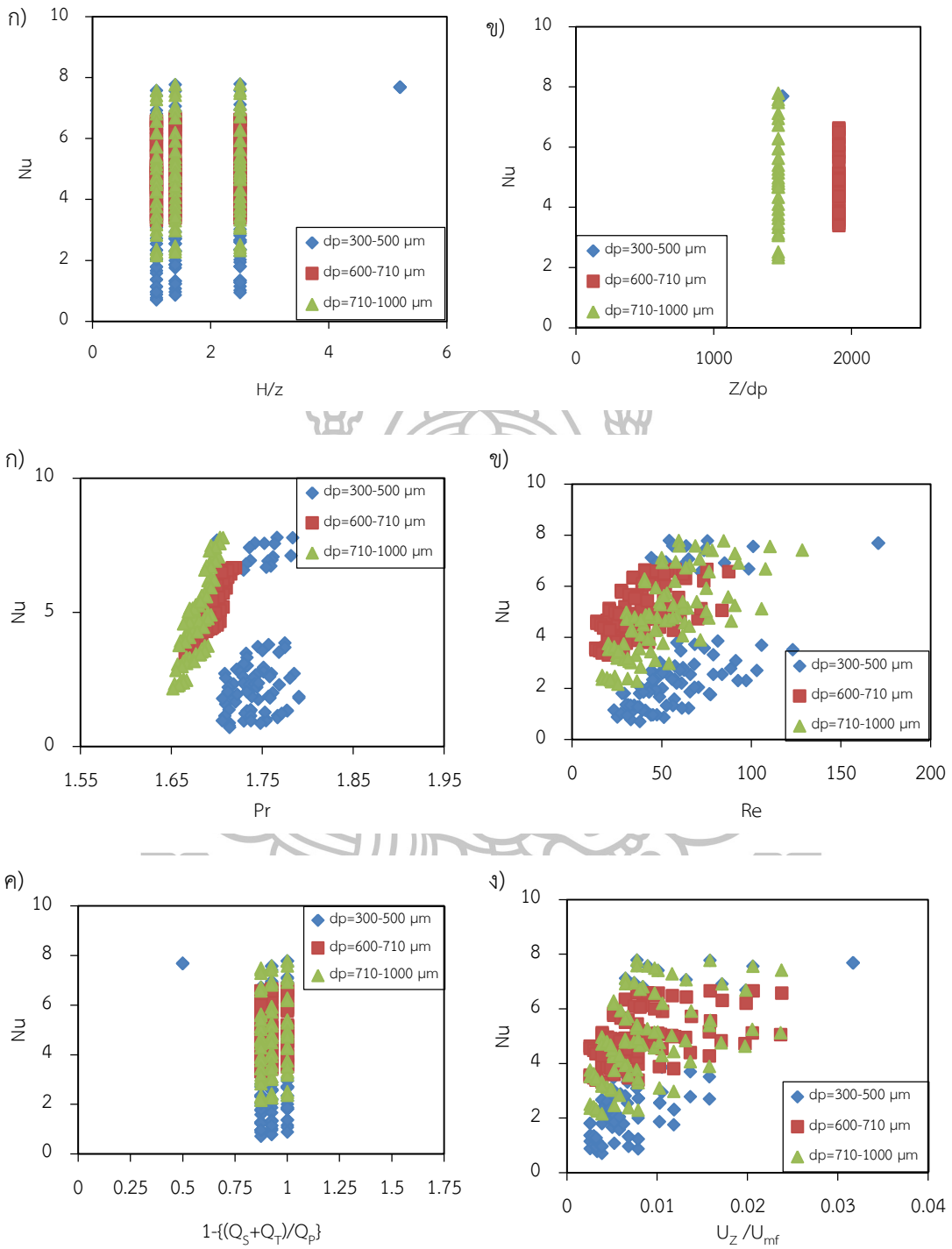
D_z = เส้นผ่านศูนย์กลางของเตา ณ ตำแหน่งใดๆ (m)

μ_g = ค่าความหนืดของแก๊สทำฟลูอิดไดซ์เซชั่น (N·s/m²)

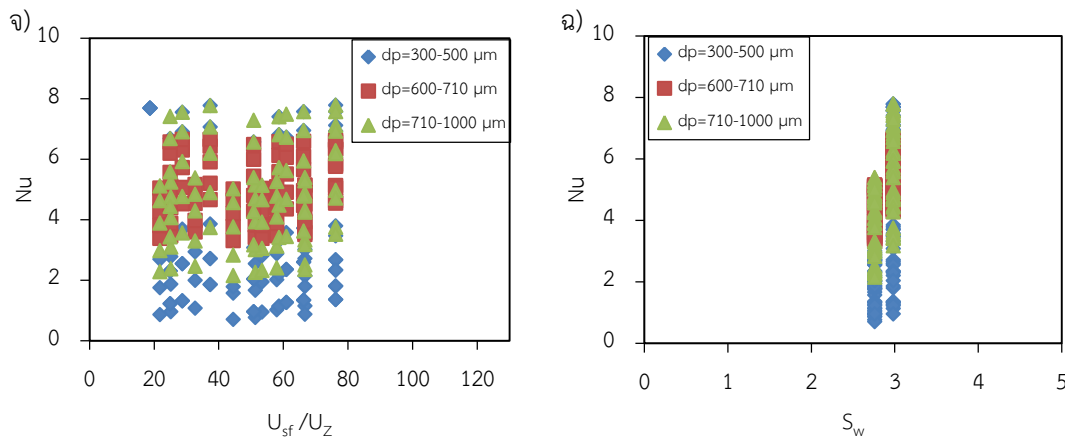
u_z = ความเร็วของอากาศ ณ ตำแหน่งใดๆ ภายในเตา (m/s)



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt Number เฉลี่ย (แนวรัศมี) ที่ได้จากการทดลอง กับ Nusselt Number เฉลี่ย (แนวรัศมี) การทำนายจากก) รูปแบบที่ 1 ข) รูปแบบที่ 2 ค) รูปแบบที่ 3 ง) รูปแบบที่ 4 จ) รูปแบบที่ 5 ฉ) รูปแบบที่ 6

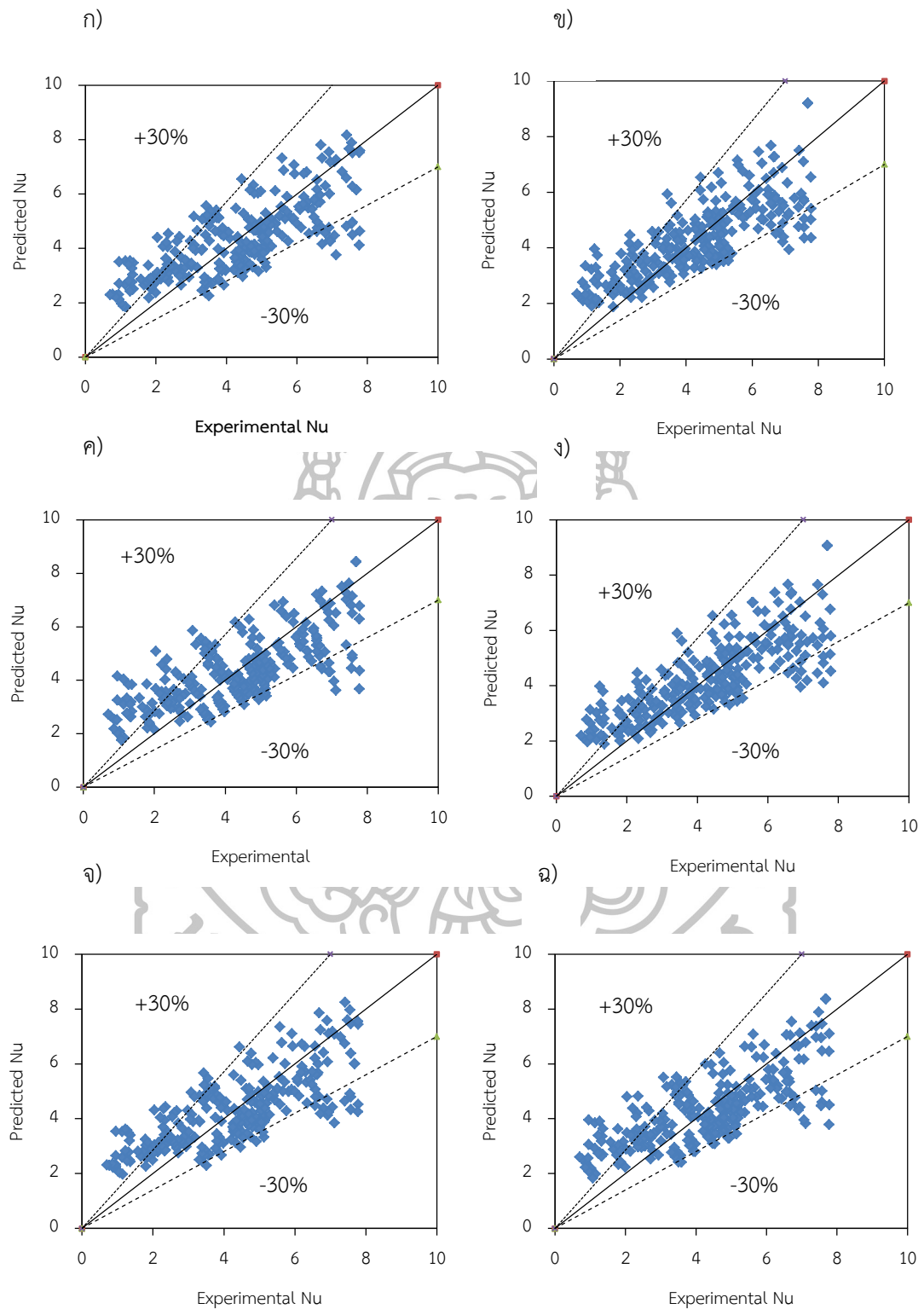


รูปที่ 4.33 แสดงกราฟแนวโน้มของ ก) $Nu-H/Z$ และ ข) $Nu-Z/d_p$ ที่มีผลต่อค่า Nusselt Number ในช่วงความสูงการวัดในการทดลองตั้งแต่ 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟแนวโน้มของ ก) $Nu-Pr$ ข) $Nu-Re$ ค) $Nu-[1-\{Q_s+Q_T\}/Q_p]$ ง) $Nu-(U_z/U_{mf})$ จ) $Nu-(U_{sf}/U_z)$ และ ฉ) $Nu-S_w$ ที่มีผลต่อค่า Nusselt Number ในช่วงความสูงการวัดในการทดลองตั้งแต่ 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ

สำหรับการตรวจสอบสมการในหัวข้อ 4.5.2.2 ใช้การตรวจสอบเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.5.2.1 โดยผลการตรวจสอบการกระจายตัวของค่าได้จากความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นกับค่าที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงได้รูปที่ 4.35 ซึ่งแสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt Number เฉลี่ย (แนวนอน) ที่ได้จากการทดลองกับ Nusselt Number เฉลี่ย (แนวนอน) ที่ได้จากการทำนายจากรูปแบบความสัมพันธ์ที่ได้ทั้ง 6 รูปแบบ ในขอบเขตความสูง $125 \text{ cm} < Z \leq 325 \text{ cm}$, $1.65 \leq Pr \leq 1.80$ และ $13.25 \leq Re \leq 170.84$ โดยมีรูปแบบสมการในความสัมพันธ์ในแบบตัวแปรไร้มิติ ซึ่งจากการดำเนินการด้วยวิธี Multi Regression แล้ว พบว่าหากพิจารณาค่าความถูกต้อง (R^2) ของสมการอยู่ในช่วงระหว่าง 0.73 - 0.79 ซึ่งเห็นได้ว่าไม่แตกต่างกันมากนักแต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามแนวโน้มของการทดลองที่ได้ในรูปที่ 4.33 - 4.34 พบว่า รูปแบบที่ 1 รูปแบบที่ 3 และรูปแบบที่ 6 เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจาก MBD ที่มีค่าน้อยที่สุด เราสามารถสรุปได้ว่าสมการที่ 1 เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt Number เฉลี่ย(แนวรัศมี)ที่ได้จากการทดลอง กับ Nusselt Number เฉลี่ย (แนวรัศมี) จากสมการทำนายจาก ก) รูปแบบที่ 1 ข) รูปแบบที่ 2 ค) รูปแบบที่ 3 ง) รูปแบบที่ 4 จ) รูปแบบที่ 5 และ ฉ) รูปแบบที่ 6

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

เพื่อให้เข้าใจง่ายต่อผู้ศึกษางานวิจัยนี้ ในหัวข้อนี้ได้แบ่งผลการสรุปออกเป็น 4 ส่วนคือ 1) พฤติกรรมและรูปแบบการเกิดตัวของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน 2) การศึกษาทางอุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝดโดยใช้หัวกระจายลมแบบใบพัด (annular spiral distributor) วัสดุเบดทรายซิลิกาที่มีขนาดแตกต่างกันอีกทั้งเมื่อเพิ่มสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศหตุยภูมิและตติยภูมิ รวมถึงตำแหน่งความสูงในการวัด และทำการทดสอบโดยมีการเปลี่ยนหัวกระจายลมที่ให้ค่า swirl number ที่แตกต่างกันเพื่อหารูปแบบการยกตัวของอนุภาคภายในเตา 3) การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนโดยศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนเกินขนาดอนุภาคเบดที่ใช้ ความสูงในการวัด และ swirl number ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและ 4) การสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนไซโคลนสองชั้นสรุปผลที่ได้จากการทดสอบดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมและรูปแบบการเกิดตัวของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวน

จากการวิเคราะห์ $\Delta P-U$ เพื่อศึกษารูปแบบการเกิดตัวของฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนของหัวกระจายของ 2 รูปแบบ โดยดำเนินการปรับเปลี่ยนสภาวะการทดลองที่แตกต่างกันสามารถสรุป ผลการทดลองดังนี้

- พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนทั้ง 2 หัวกระจายอากาศสามารถแบ่งเป็น 4 ช่วงดังนี้
 - 1) ช่วงอนุภาคเบดหยุดนิ่ง (Fixed bed regime)
 - 2) ช่วงบางส่วนของเบดเริ่มเกิดกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชัน (Partially fluidized-bed regime)
 - 3) ช่วงฟลูอิดไดซ์เซชันแบบหมุนวนบางส่วน (Fully fluidized-bed regime with partial swirl motion)
 - 4) ช่วงฟลูอิดไดซ์เบดหมุนวนแบบสมบูรณ์ (Fully swirling fluidized-bed (or swirl-fluidization) regime)

- การทดลองทางอุทกพลศาสตร์จะเห็นว่าเบตที่มีขนาด 710–1000 μm จะต้องใช้ความดันตกคร่อมมากที่สุดและจะใช้ความดันตกคร่อมลดลงมาเมื่อเบตมีขนาด 600–710 และ 300–500 μm ตามลำดับ เพื่อที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน
- หัวกระจายแบบใบพัดที่มีค่า S_w ส่งผลให้เกิดกระบวนการฟลูอิดไดซ์เซชันซ้ำขึ้น ซึ่งส่งผลเสียต่อการดำเนินการในฟลูอิดไดซ์เบต

5.1.2 อุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนวนภายในเตาไซโคลนแฝด

จากการศึกษาการเกิดอุทกพลศาสตร์การยกตัวของอนุภาคเบตสำหรับฟลูอิดไดซ์แบบหมุนวนของอากาศ - ทราญในเตาเผาแบบไซโคลนแฝดโดยใช้ทราญขนาด 300–500, 600–710 และ 710–1000 μm และทดสอบที่ความสูง 40, 50, 60 และ 125 cm หัวกระจายลมแบบใบพัด (annular spiral distributor) รวมถึงมีการใส่อากาศทุติยภูมิและตติยภูมิ เพื่อเพิ่มการเคลื่อนที่แบบหมุนวนสรุปผลการทดสอบได้ว่า

- จากการทดลอง ช่วงความสูงไม่เกิน 125 cm จากหัวกระจายอากาศ เป็นช่วงที่มีความหนาแน่นของอนุภาคเบตอย่างมาก (Dense phase zone) ในทางตรงกันข้าม ช่วงความสูงตั้งแต่ 125 cm จากหัวกระจายอากาศ อนุภาคเบตมีปริมาณที่เบาบางมาก จนถึงได้ว่าไม่มีอนุภาคเบตอยู่ (Free board zone)
- การยกตัวของอนุภาคจะลดลงเมื่อเบตมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเพราะอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากในขณะที่ใช้ความเร็วอากาศเท่ากันในการทดลองจึงทำให้อนุภาคเบตที่มีขนาดเล็กสามารถลอยตัวได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่
- ที่ตำแหน่งความสูงที่ 40 cm เหนือหัวกระจายอากาศจะมีค่าการยกตัวของอนุภาคสูงที่สุด และ ที่บริเวณจุดกึ่งกลางเตาในแนวรัศมีจะมีค่าการยกตัวของอนุภาคสูงที่สุด
- ค่าการยกตัวของอนุภาคมีค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อการเพิ่มความเร็วอากาศปฐมภูมิอย่างสม่ำเสมอ
- เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอากาศทุติยภูมิและอากาศตติยภูมิ ค่าการยกตัวของอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลอยตัวที่ดีของอนุภาคเมื่อถูกกระตุ้นด้วยการใส่อากาศทุติยภูมิและอากาศตติยภูมิ

5.1.3 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในเตาไซโคลนแฝด

ในการทดลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาไซโคลนแฝด ภายใต้สภาวะอุณหภูมิเบต 300 °C พร้อมเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิรวมถึงปรับเปลี่ยนหัวกระจายอากาศและความเร็วอากาศปฐมภูมิถูกจ่ายเข้าทางด้านล่างเตาผ่านหัวกระจายลมแบบ annular spiral

distributor โดยมีตำแหน่งการวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 60, 125, 213 และ 288 cm
เหนือหัวกระจายอากาศ สรุปผลการทดสอบรายละเอียดดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีจะมีการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่บริเวณกึ่งกลางเตา จากนั้นจะลดลงตามรัศมีที่เพิ่มขึ้นและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นอีกครั้งที่บริเวณขอบเตาฟลูอิดไดซ์เบด
- ความเร็วในการทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน(อากาศปฐมภูมิ) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนภายในเตาที่มากขึ้นตามไปด้วย
- ตำแหน่งความสูงตั้งแต่ 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศจะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่ในรูปแบบการนำความร้อนจากอนุภาคและการพาความร้อนจากอากาศ ในขณะที่เมื่ออากาศไหลขึ้นสู่บริเวณ Freeboard Zone(ตำแหน่งความสูงมากกว่า 125 cm เหนือหัวกระจายอากาศ) การถ่ายเทความร้อนจะอยู่ในรูปแบบการพาความร้อนจากอากาศเพียงอย่างเดียวเท่านั้น
- อนุภาคขนาดเล็กให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าขนาดใหญ่
- อัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ
- ตำแหน่งใกล้กับผนังเตาจะมีอิทธิพลการถ่ายเทความร้อนจากผนังเตาเข้ามา มีบทบาทด้วย

5.1.4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติเพื่อใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนวนไซโคลนแฝด

การศึกษาตัวแปรไร้มิติกับ Nusselt Number เฉลี่ยพบว่า จากการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Nusselt Number เฉลี่ยกับตัวแปรต่างๆในสมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พบว่า ได้ความสัมพันธ์ที่มีทิศทางเดียวกันกับสมการที่ได้ตั้งนั้นจากวิธีการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (multiple regression method) จะได้สมการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) เท่ากับ 0.89 และ 0.81 ที่บริเวณเขตหนาแน่นและบริเวณที่ไม่เป็นอนุภาคเบด ตามลำดับ

- บริเวณอนุภาคเบดหนาแน่นตั้งแต่ $40 \text{ cm} \leq Z \leq 125 \text{ cm}$ (dense phase)

$$Nu_z = 0.26(Ar)^{0.37} (Pr)^{-6.94} (Re_f)^{-0.19} \left(\frac{u_z}{u_{mf}} \right)^{0.39} \left(\frac{H}{z} \right)^{-2.88} (S)^{4.01} \quad (R^2=0.87)$$

MBD=20.49

$$Nu_z = 0.35(Ar)^{0.20} (Pr)^{-6.36} (Re_f)^{-0.19} \left(\frac{u_z}{u_{mf}} \right)^{0.39} \left(\frac{z}{d_p} \right)^{0.51} (S)^{4.01} \quad (R^2=0.87)$$

เงื่อนไข $260.14 \leq Ar \leq 7001.60$, $1.66 \leq Pr \leq 1.80$ และ $921.30 \leq Re_f \leq 5644.13$

- บริเวณที่ไม่มีอนุภาคเบตตั้งแต่ $125 \text{ cm} < Z \leq 312.5 \text{ cm}$ (Freeboard zone)

$$Nu_z = 0.46(Pr)^{-12.53} (Re)^{0.47} \left(1 - \frac{Q_{SA/TA}}{Q_{PA}} \right)^{1.33} \left(\frac{H}{z} \right)^{0.26} (S)^{7.70} \quad (R^2 = 0.75)$$

MBD=8.77

เงื่อนไข $1.65 \leq Pr \leq 1.80$ และ $13.25 \leq Re \leq 170.84$

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้และช่วยเพิ่มความแม่นยำของการทดลองให้สูงขึ้นจึงควรทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ซ้ำการทดลอง

5.2.2 ต้องคำนึงถึงความดันตกคร่อมที่จะเกิดขึ้นในระบบการทดลอง เนื่องด้วยความดันตกคร่อมเป็นสิ่งที่ส่งผลต่อความสามารถของพัดลมได้

5.2.3 ผู้ทำการทดลองเพิ่มเติมควรทำการพัฒนาอุปกรณ์ในการวัดค่าความร้อน และค่าการยกตัวของอนุภาคให้ดียิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] Abdelmotalib M.H., Yousef M.A.M, Hassan A.A. and Youn S.B., “Heat transfer process in gas–solid fluidized beds combustors: A review”, **Heat and mass transfer** 89, (2015) : 567–575
- [2] Geldart D, Abrahamsen A.R., “Homogeneous fluidization of fine powders using various gases and pressures”, **Powder Technology** 19, 1 (1973): 133–136
- [3] Kaewklum R., Kuprianov V.I. and Douglas P.L., “Hydrodynamics of air–sand flow in a conical swirling fluidized bed: A comparative study between tangential and axial air entries”, **Energy Conversion and Management** 50, 12 (2009) : 2999–3006,
- [4] Koksai M., Golriz M.R. and Hamdullahpur F., “Effect of staged air on heat transfer in circulating fluidized beds”, **Applied Thermal Engineering** 28, 2 (2008) : 1008–1014
- [5] Basu, P., Cen, K.F., Jestin, L., (2000), Boilers and Burners. Springer, New York.
- [6] Sundaresan R. and Kolar A.K., “Axial heat transfer correlation in circulating fluidized beds riser”, **Applied Thermal Engineering** 50 (2013) : 985–996
- [7] Chao J., Lu J., Yang H., Zhang M. and Liu Q., “Experimental study on the heat transfer coefficient between a freely moving spear and a fluidized bed of small particle”, **Heat and Mass Transfer** 80, (2015) : 115–125
- [8] Chen J., Lu X., Liu H. and Liu J., “The effect of solid concentration on the secondary air–jetting penetration in a bubbling fluidized bed”, **Powder Technology** 185, 2 (2008): 164 – 169
- [9] Flamant M., Fatah N., and Y. Flitris, “Wall–to–Bed Heat Transfer in Gas–Solid Fluidized Beds: Prediction of Heat Transfer Regimes”, **Powder Tech** 69, 3 (1992) : 223
- [10] Xavier A. M and Davidson J. E, **Heat Transfer in Fluidized Beds: Convective Heat Transfer in Fluidized Beds, in Fluidization**, Davidson, (Clift, and Harrison eds., London: Academic Press,1985)
- [11] Baskakov A.P., Vitt O.K., Kirakosyan V.A., Maskaev V.K., and Filippovsky N.E., “Investigation of Heat Transfer Coefficient Pulsations and of the Mechanism of Heat

Transfer From a Surface Immersed Into a Fluidized Bed”, Int. Symposium Fluidization Appl., Cepadues–Editions,Toulouse, France, 1974.

[12] Denloye A. O. O. and Botterill J.M.S, “Bed to Surface Heat Transfer in a Fluidized Bed of Large Particles”, **Powder Technology** 19, 2 (1978) : 197–203

[13] Baskakov A.E, **Heat Transfer in Fluidized Beds: Radiative Heat Transfer in Fluidized Beds in Fluidization**, Davidson, (Clift, and Harrison eds., Academic Press, London, 1985)

[14] Kim S.W, Ahn J.Y, Kim S.D, and Lee D.H, “Heat transfer and bubble characteristics in a fluidized bed with immersed horizontal tube bundle”, **Heat and Mass Transfer** 46, (2003) : 399–409

[15] Lu P., Ma C., Pan W.P. and Cao Y., “Heat transfer characteristics in a horizontal swirling fluidized bed”. **Experimental Thermal and Fluid Science** 35, 2–4 (2011): 1127–1134

[16] Kunii D. and Levenspiel O., **Fluidization Engineering 2d ed.**, Butterworth–(Heinemann, Boston,1991)

[17] Molerus O., Burschka A., and Dietez S., “Particle Migration at Solid Surfaces and Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds–I. Particle Migration Measurement Systems”, **Chemical Engineering Science** 50, 5 (1995) : 871–877

[18] Molerus O, Burschka A, and Dietez S, "Particle Migration at Solid Surfaces and Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds–II. Prediction of Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds”, **Chemical Engineering** 50, 5 (1995): 879–885.

[19] Pidwerbecki D. and Welty J.R., “Heat Transfer to Horizontal Tube in Splash Zone of a Bubling Fluidized Bed,an Experimental Study of Particle Size Effect”. **Experimental Thermal and Fluid Science** 10, 3 (1995) : 307–317

[20] Yang J, Wang L, Tong L, Wu P and Ni X, “Effects of solid particle properties on hat transfer between high–temperature gas fluidized bed and immersed surface”. **Applied Thermal Engineering** 24, 14–15 (2004) : 2145–2156

[21] Pidwerbecki D. and Welty J.R., “Splash–Zone Heat Transfer in bubbling Fluidized Beds: An Experimental Study of Temperature Effects”. [Experimental Thermal and Fluid Science](#) 9, 3 (1994) : 356–365

- [22] Masoumifard N, Hamdi A.A, Mostoufi N and Sotudeh-Gharebagh R, "Investigation of heat transfer between a horizontal tube and gas-solid fluidized bed". **Heat and Fluid flow** 29, 5 (2008) : 1504–1511
- [23] Hamada M.A., Mahmoud A.M. Y., Ali A. H., SuK B. Y., IK-Tae I. "Heat transfer process in gas-solid fluidized bed combustors: a review." **International Journal of Heat and Mass Transfer** 89, (2015) : 567–575
- [24] Barrientos M.A.I, Sonbrino C., Almendros-Ibanez J.A. "Experimental heat transfer coefficients between a surface and fixed and fluidized beds with PCM", **Applied Thermal Engineering** 78, (2015), 373–379.
- [25] Jerry S, Mohammad G.R. and John G.R., "Further study on the influence of particle coating on fluidized bed heat transfer". **Heat and mass transfer** 49, 21–22 (2006) : 3800–3806
- [26] Kamble L.V., Pangavhane D.R. and Singh T.P., "Experimental investigation of horizontal tube immersed in gas-solid fluidized bed of large particle using artificial neural network", **Heat and mass transfer** 70, (2014) : 719–724
- [27] Abdelmotalib H.M., Youssef M.A.M, Hassan A.A. and Youn S.B., "Heat transfer process in gas-solid fluidized bed combustor: A review", **Heat and mass Transfer** 89, (2015) : 567–575
- [28] Sirisomboon K. and Kumman N., "Experimental investigation of solid holdup in a twin-cyclone combustor", (The 7th international conference on science, Technology and innovation for sustainable well-being (STISWB VII) NakhonPathom, (July 2015))
- [29] Zhao T., Liu K., Murata H., Harumi K. and Takei M., "Investigation of bed-to-wall heat transfer characteristics in a rolling circulating fluidized bed", **Powder Technology** 269, (2015) : 46–54
- [30] Lu P., Ma C., Pan W.P. and Cao Y., "Heat transfer characteristics in a horizontal swirling fluidized bed". **Experimental Thermal and Fluid Science** 35, 2–4 (2011): 1127–1134
- [31] Molerus O., Burschka A., and Dietez S., "Particle Migration at Solid Surfaces and Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds-II. Prediction of Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds", **Chemical Engineering Science** 50, 5 (1995) : 879–885.

- [32] Jerry S., Mohammad G.R. and John G.R., “Further study on the influence of particle coating on fluidized bed heat transfer”. **Heat and mass transfer** 49, 21–22 (2006) : 3800–3806
- [33] Kim S.W., Ahn J.Y., Kim S.D., and Lee D.H., “Heat transfer and bubble characteristics in a fluidized bed with immersed horizontal tube bundle”, **Heat and Mass Transfer** 46, 3 (2003): 399–409
- [34] Sirisomboon K., Kumman N. and Wasananon S.H., “Hydrodynamic behavior in twin-cyclonoc combustor using computational fluid dynamics”, (International conference on alternative energy in developing countries and emerging economies (AEDCEE) Bangkok, (May 2013))
- [35] Chao J., Lu J., Yang H., Zhang M. and Liu Q., “Experimental study on the heat transfer coefficient between a freely moving sphere and a fluidized bed of small particle”, **Heat and mass Transfer** 80, (2015): 115–125
- [36] Geldart D, Abrahamsen A.R., “Homogeneous fluidization of fine powders using various gases and pressures”, **Powder Technology** 19, 1 (1973) : 133–136
- [37] Liu M., Wang T., Yu W. and Wang J., “Hydrodynamics of a slurry air lift reactor at high solid concentrations”, **Chemical Engineer Science** 62, 24 (2007) : 7098–7106
- [38] Pisters K. and Prakash A., “Investigation of axial and radial variations of heat transfer coefficient in bubbling fluidized bed with fast response probe”, **Powder Technology** 207, 1 – 3 (2011) : 224 – 231





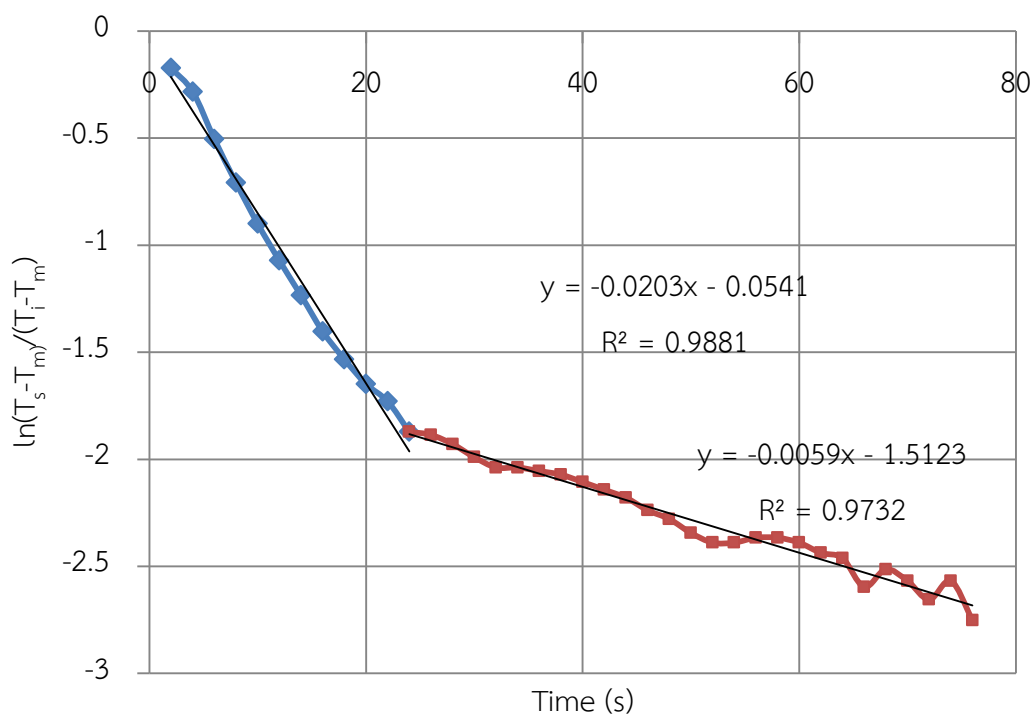
ก.1 การเปรียบเทียบอุปกรณ์ลัมปี

ตาราง ก.1 อุณหภูมิของวัตถุลัมป์และอุณหภูมิของน้ำก่อนและหลังที่ผ่านวัตถุลัมป์ตลอดการทดลอง

Time (s)	T_s (°C)	T_m (°C)	$T_s - T_m$ (°C)	$T_i - T_m$ (°C)	$\ln(T_s - T_m) / (T_i - T_m)$	dt (s)
0	30	75.2	-44.78	-44.78	0	0
2	37.4	75.7	-37.38	-44.78	-0.181	2
4	41.5	76.3	-33.28	-44.78	-0.297	2
6	48.5	76.4	-26.28	-44.78	-0.533	2
8	53.7	76.8	-21.08	-44.78	-0.753	2
10	57.7	75.7	-17.08	-44.78	-0.964	2
12	60.7	76.4	-14.08	-44.78	-1.157	2
14	63.1	76.7	-11.68	-44.78	-1.344	2
16	65.2	76.4	-9.58	-44.78	-1.542	2
18	66.6	75.7	-8.18	-44.78	-1.7	2
20	67.7	76.6	-7.08	-44.78	-1.844	2
22	68.4	76.8	-6.38	-44.78	-1.949	2
24	69.5	76.9	-5.28	-44.78	-2.138	2
26	69.6	77	-5.18	-44.78	-2.157	2
28	69.9	77.1	-4.88	-44.78	-2.217	2
30	70.3	76.9	-4.48	-44.78	-2.302	2
32	70.6	76.4	-4.18	-44.78	-2.371	2
34	70.6	76.5	-4.18	-44.78	-2.371	2
36	70.7	76.8	-4.08	-44.78	-2.396	2
38	70.8	76.3	-3.98	-44.78	-2.42	2
40	71	76.8	-3.78	-44.78	-2.472	2
42	71.2	77.1	-3.58	-44.78	-2.526	2
44	71.4	77.3	-3.38	-44.78	-2.584	2
46	71.7	77	-3.08	-44.78	-2.677	2
48	71.9	76.8	-2.88	-44.78	-2.744	2

ตาราง ก.1 อุณหภูมิของวัตถุลึ้มป์และอุณหภูมิของน้ำก่อนและหลังที่ผ่านวัตถุลึ้มป์ตลอดการทดลอง (ต่อ)

Time (s)	T_s (°C)	T_m (°C)	$T_s - T_m$ (°C)	$T_i - T_m$ (°C)	$\ln(T_s - T_m)/(T_i - T_m)$	dt (s)
50	72.2	76.8	-2.58	-44.78	-2.854	2
52	72.4	77.8	-2.38	-44.78	-2.935	2
54	72.4	77.4	-2.38	-44.78	-2.935	2
56	72.3	77	-2.48	-44.78	-2.894	2
58	72.3	77	-2.48	-44.78	-2.894	2
60	72.4	77.1	-2.38	-44.78	-2.935	2
62	72.6	76.6	-2.18	-44.78	-3.022	2
64	72.7	76.6	-2.08	-44.78	-3.069	2
66	73.2	77.1	-1.58	-44.78	-3.344	2
68	72.9	77.1	-1.88	-44.78	-3.17	2
70	73.1	77	-1.68	-44.78	-3.283	2
72	73.4	76.4	-1.38	-44.78	-3.48	2
74	73.1	76.5	-1.68	-44.78	-3.283	2
76	73.7	76.6	-1.08	-44.78	-3.725	2

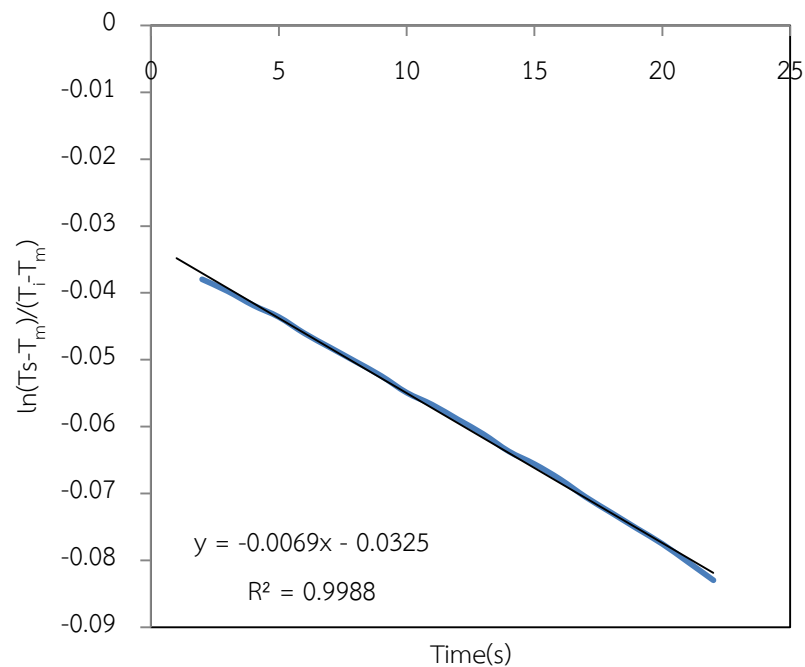


รูปที่ ก.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(T_s - T_m)/(T_i - T_m)$ กับเวลา(วินาที)

จากรูปที่ ก.1 จะเห็นว่า เส้นแนวโน้มที่เกิดขึ้นพบว่ามีความชัน ซึ่งเส้นแนวโน้มที่มีค่าความชันเท่ากับ 0.0059 เป็นเส้นแนวโน้มที่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงเข้าใกล้สภาวะคงที่ จึงทำการพิจารณาเพียงเส้นแนวโน้มที่มีค่าความชันเท่ากับ 0.0203 และจึงทำการทดลองเพียง 20 วินาที

ก.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

กำหนด ที่ทรายขนาด $710-1,000 \mu\text{m}$, $U/U_{mf} = 1$, $[(Q_s+Q_r)/Q_p] = 0$ ตำแหน่งวัตถุลัมป์ในแนวรัศมีที่ -1 (จุดที่ 1) และชุดการทดลองที่ 1 โดยบันทึกอุณหภูมิของวัตถุลัมป์และอุณหภูมิของอากาศก่อนและหลังที่ผ่านวัตถุลัมป์ ตลอดเวลาที่อุณหภูมิเริ่มต้น 300°C เป็นเวลา 20 วินาที และคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยที่ผ่านวัตถุลัมป์ นำอุณหภูมิลัมป์ด้วยอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยที่ผ่านวัตถุลัมป์ และนำไปคำนวณหาค่า $\ln(T_s-T_m)/(T_i-T_m)$ ดังแสดงในตารางที่ ก.2 และนำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(T_s-T_m)/(T_i-T_m)$ กับ t และคำนวณหาค่าความชันตามรูปที่ ก.2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0069



รูปที่ ก.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(T_s-T_m)/(T_i-T_m)$ กับเวลา (วินาที)

ตารางที่ ก.2 อุณหภูมิของวัตถุสัมพัทธ์กับอากาศก่อนและหลังที่ผ่านวัตถุสัมปต์ลดการทดลอง

ซ้ำที่ 1 ที่ทรายขนาด 710-1,000 μm $U_{mf} = 1, [(Q_s + Q_r)/Q_p] = 0$ ตำแหน่งวัตถุสัมปต์จุดที่ 1

Time (s)	T_s (°C)	T_m (°C)	$T_s - T_m$ (°C)	$T_i - T_m$ (°C)	$\ln(T_s - T_m)/(T_i - T_m)$	dt (s)
0	34.6	338.3	-303.7	-311.3	-0.024716705	0
1	38.3	338.2	-299.9	-311.2	-0.036986707	1
2	41.1	337.9	-296.8	-310.9	-0.046412806	1
3	47.4	337.7	-290.3	-310.7	-0.067912945	1
4	52.3	337.5	-285.2	-310.5	-0.084993213	1
5	58.8	337.4	-278.6	-310.4	-0.108084727	1
6	61.4	337.2	-275.8	-310.2	-0.117541285	1
7	66.2	337	-270.8	-310	-0.135191756	1
8	67.9	336.8	-268.9	-309.8	-0.141587365	1
9	73.4	336.5	-263.1	-309.5	-0.162423904	1
10	79.4	336.4	-257	-309.4	-0.185558853	1
11	83.3	336.2	-252.9	-309.2	-0.200994163	1
12	88.1	335.9	-247.8	-308.9	-0.220395631	1
13	92.4	335.5	-243.1	-308.5	-0.238248962	1
14	95.5	335.3	-239.8	-308.3	-0.251268092	1
15	102.3	335.1	-232.8	-308.1	-0.28024469	1
16	112.4	334.8	-222.4	-307.8	-0.324972659	1
17	118.4	334.7	-216.3	-307.7	-0.352458949	1
18	124.8	334.5	-209.7	-307.5	-0.382797149	1
19	132.3	334.4	-202.1	-307.4	-0.419387207	1
20	136.5	334.1	-197.6	-307.1	-0.440928642	1

ตารางที่ ก.3 คุณลักษณะทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุลัมป์

คุณลักษณะ	ขนาดวัสดุลัมป์
เส้นผ่านศูนย์กลาง(mm)	9.525
ความยาว(mm)	25.4
พื้นที่ผิวรวม(m ²)	9.0257×10 ⁻⁴
ปริมาตร (m ³)	7.24×10 ⁻⁶
ความหนาแน่น(kg/m ³)	8933
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ(J/kg.K)	385
ค่าการนำความร้อน (W/m.K)	401

จากสมการ

$$h = \text{slope} \left(\frac{\rho V C_p}{A} \right)$$

(ก.1)

คุณลักษณะทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุลัมป์จากตารางที่ ก.3 พบว่า

$$\rho = 8933 \text{ kg/m}^3, V = 7.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3, A_s = 9.0257 \times 10^{-4} \text{ m}^2, C_{p, \text{lump}} = 385 \text{ J/kgK}$$

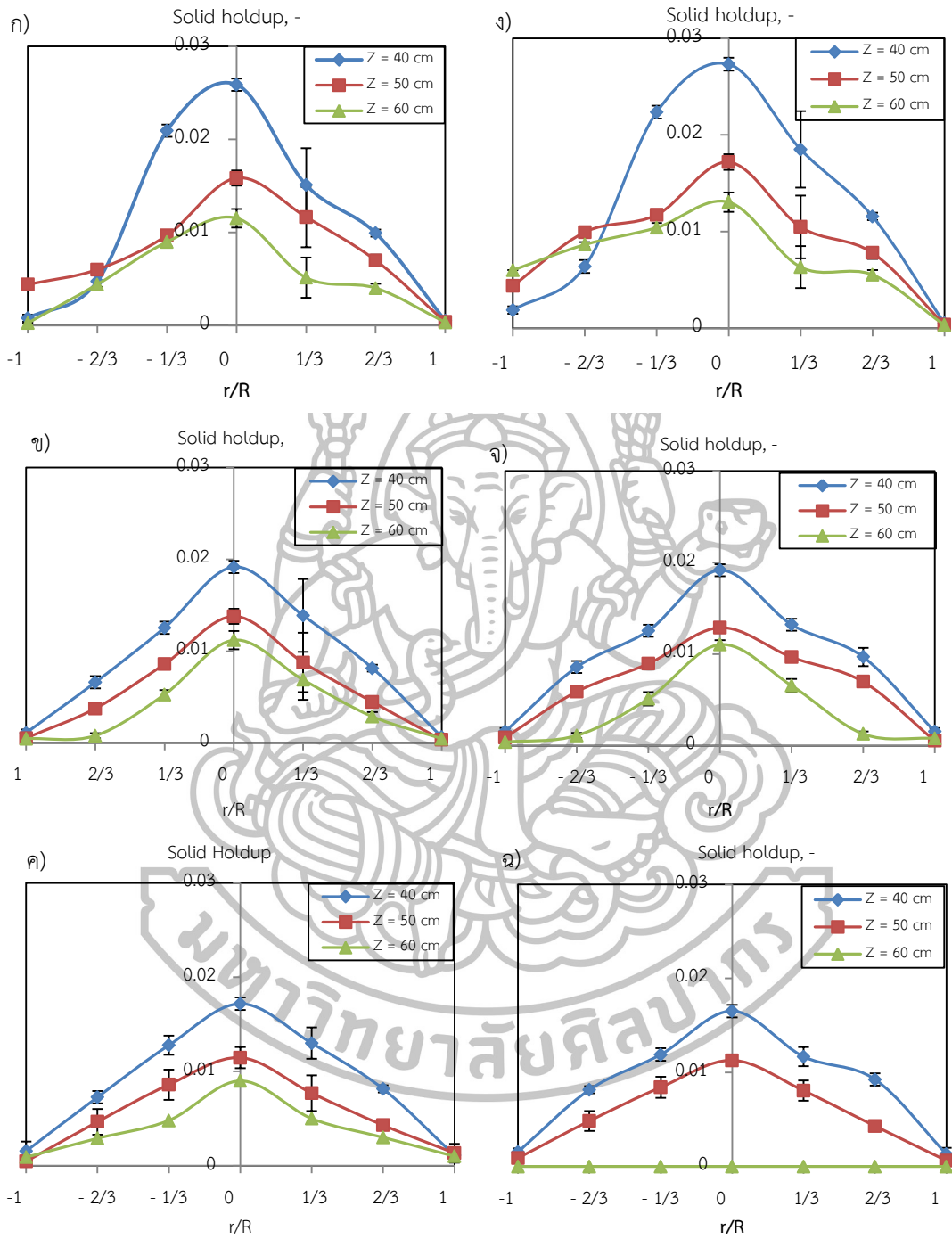
$$h = 0.0069 \times \left(\frac{\left(8933 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times \left(7.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \right) \times \left(385 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)}{9.0257 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right)$$

$$h = 190.36 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

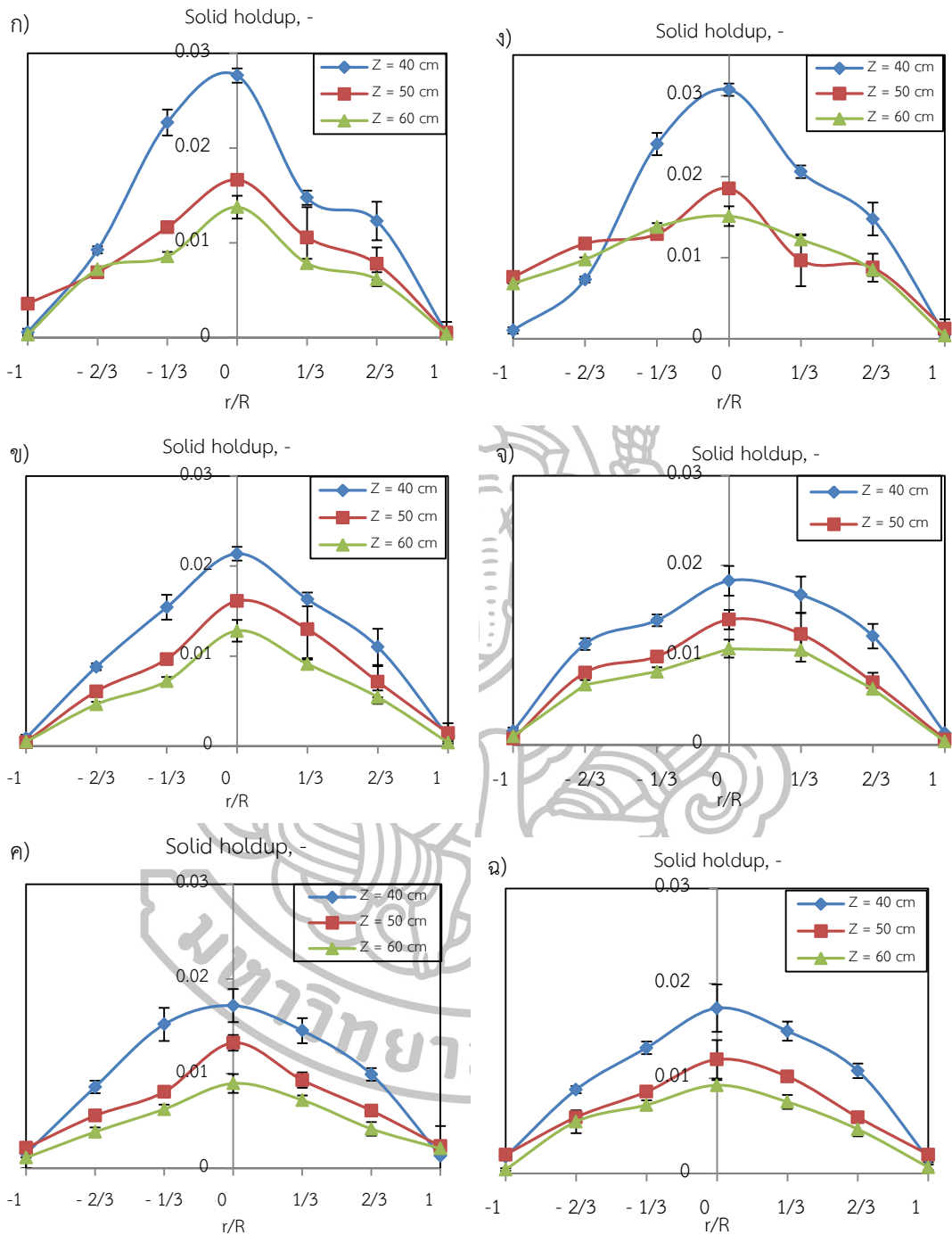
ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 190.36 W/m²K



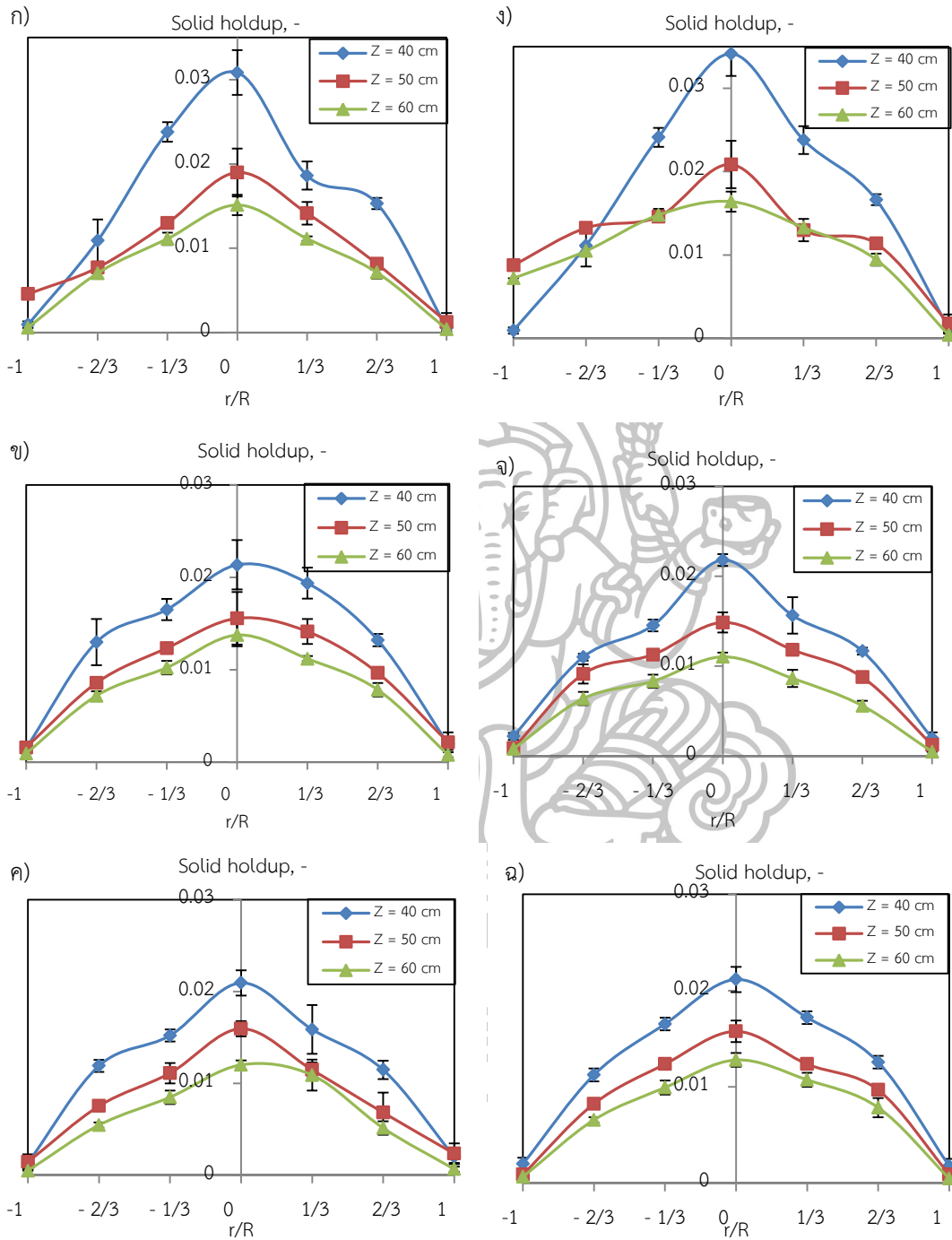
ภาคผนวก ข
การยกตัวของอนุภาคเบตภายในเตาไซโคลนแปด



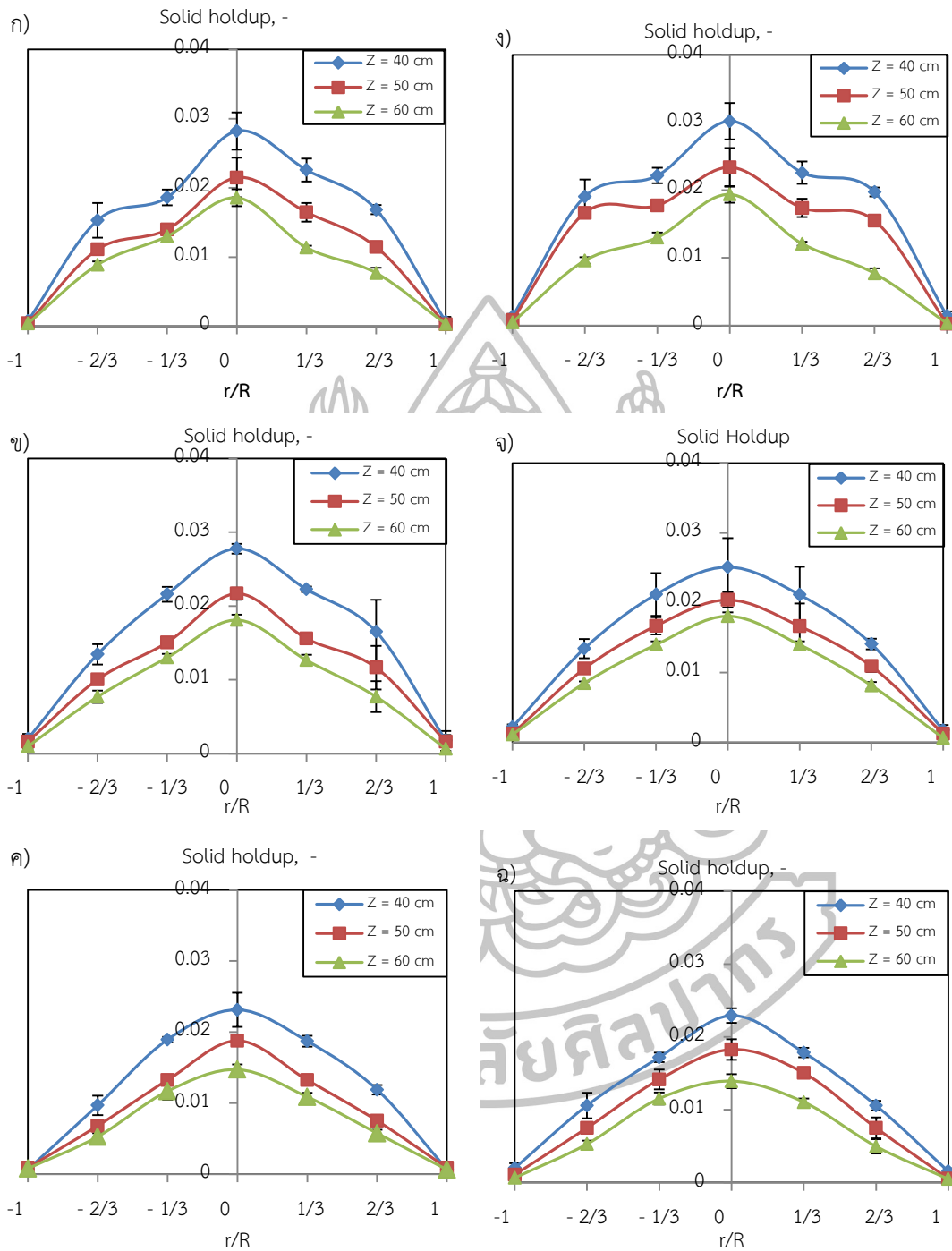
รูปที่ ข.1 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $1.5U_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_p = 0$ สำหรับ $S_w =$ 2.76 ขนาดอนุภาคเบต ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm ค) 700-1000 μm และที่ $S_w =$ 2.98 ขนาดอนุภาคเบต ง) 300-500 μm จ) 600-710 μm และ ฉ) 700-1000 μm



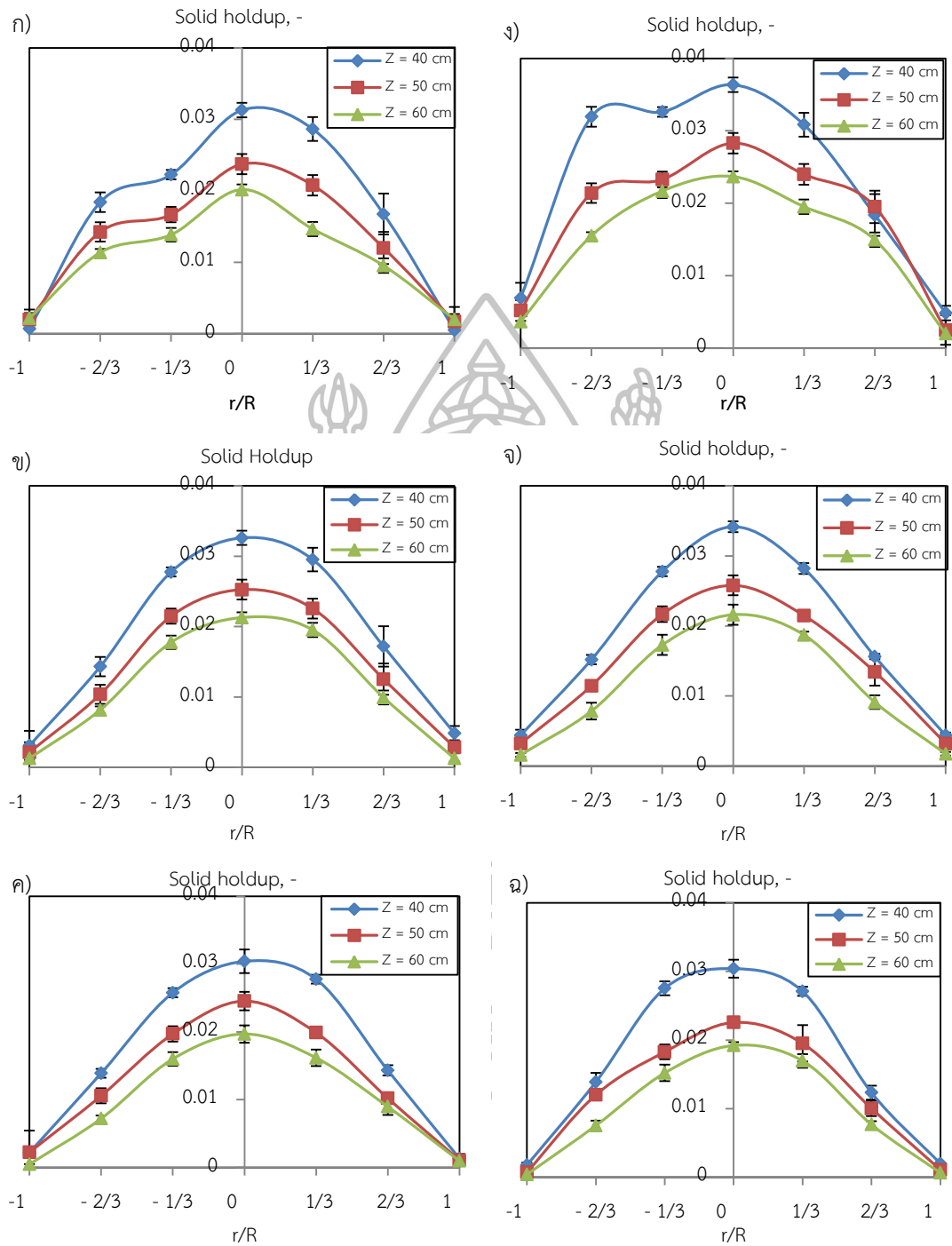
รูปที่ ข.2 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $1.5u_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_F = 0.3$ สำหรับ $S_w=2.76$ ขนาดอนุภาคเบ็ดเบ็ด ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm และ ค) 700-1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบ็ด ง) 300-500 μm , จ) 600-710 μm และ ฉ) 700-1000 μm



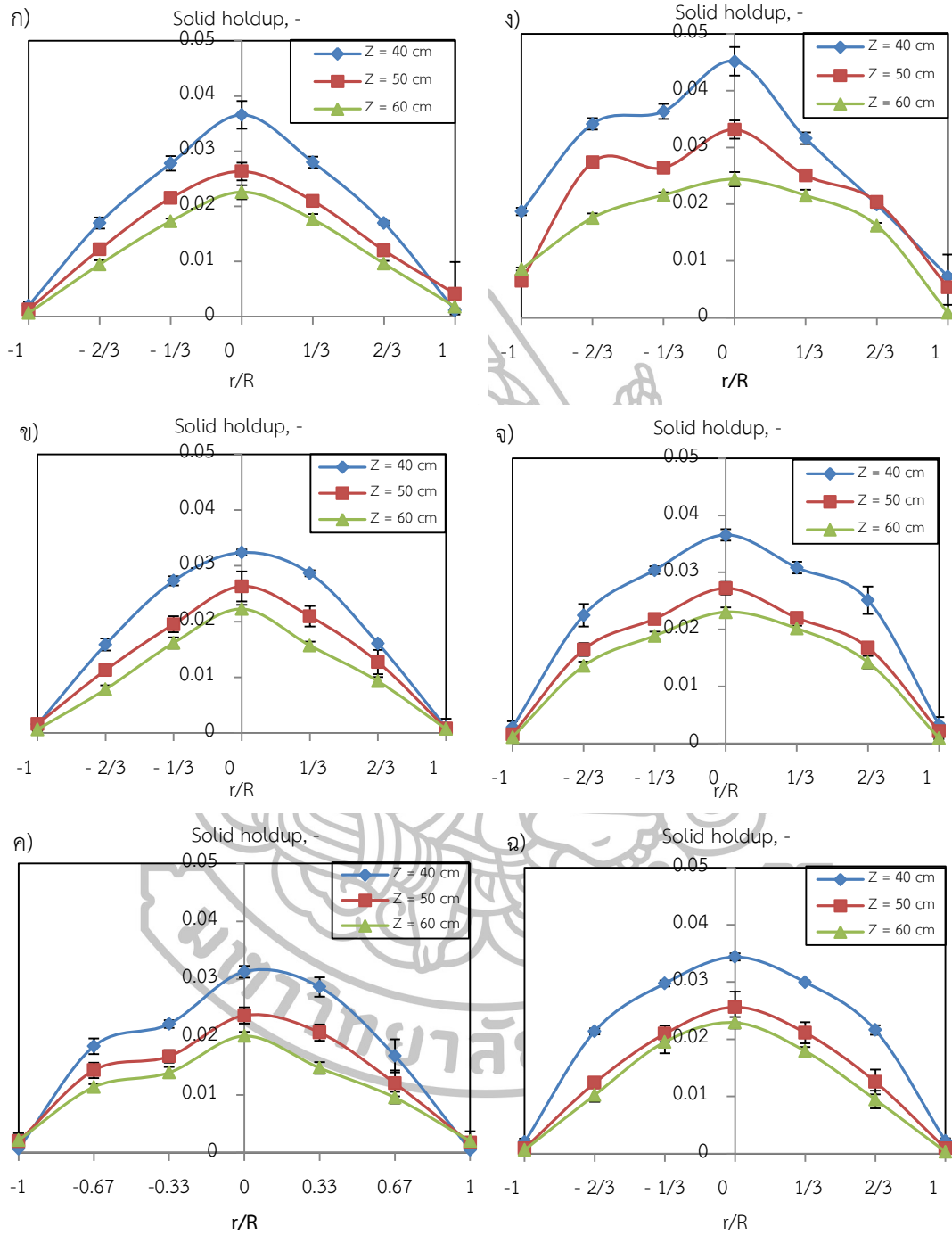
รูปที่ 3.3 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สถานะความเร็วปฏุมภูมิ $1.5U_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_p = 0.5$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm ค) 700-1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300-500 μm , จ) 600-710 μm และ ฉ) 700 -1000 μm



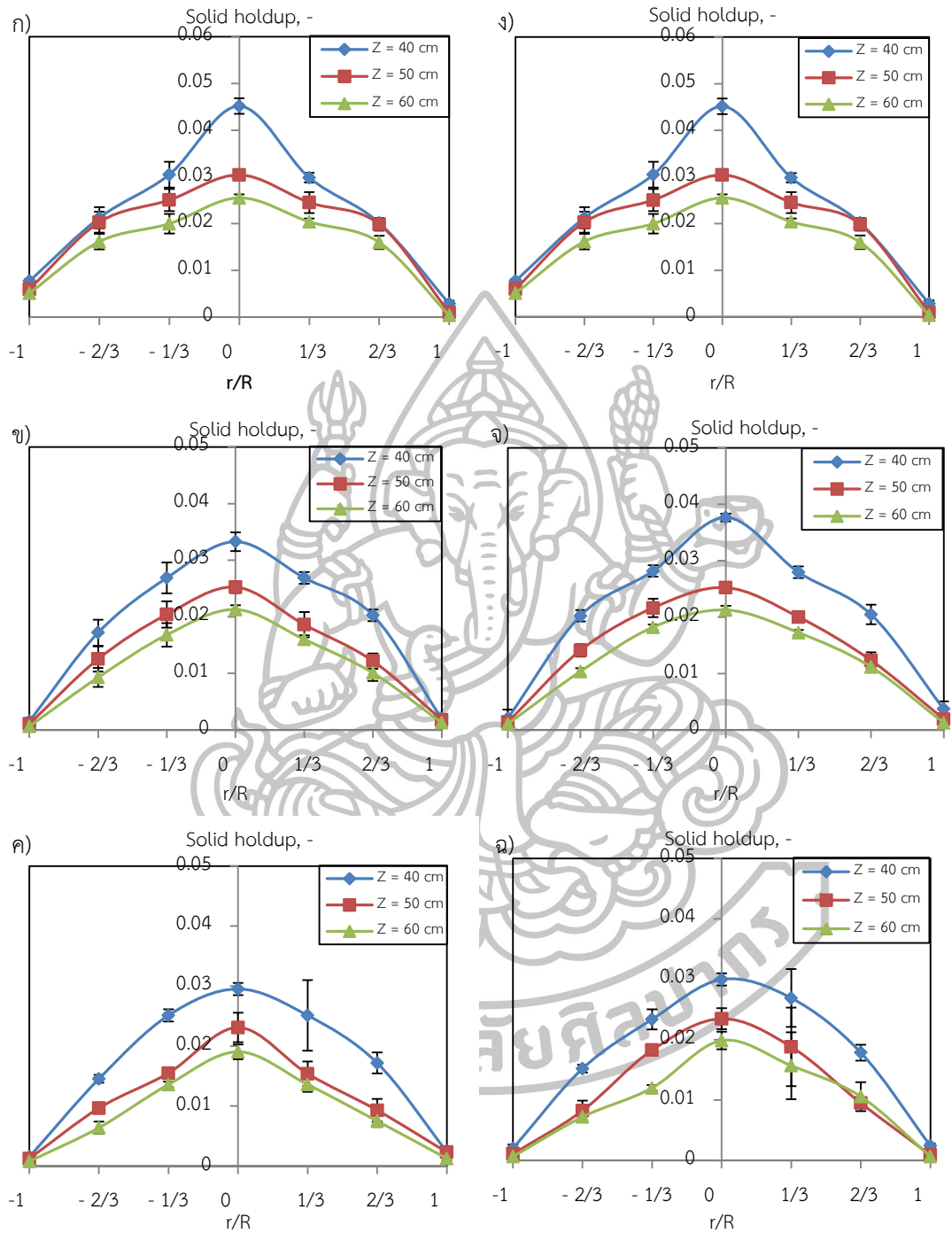
รูปที่ ข.4 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $2u_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_p = 0$ สำหรับ $s_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm ค) 700-1000 μm และที่ $s_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300-500 μm , จ) 600-710 μm และฉ) 700-1000 μm



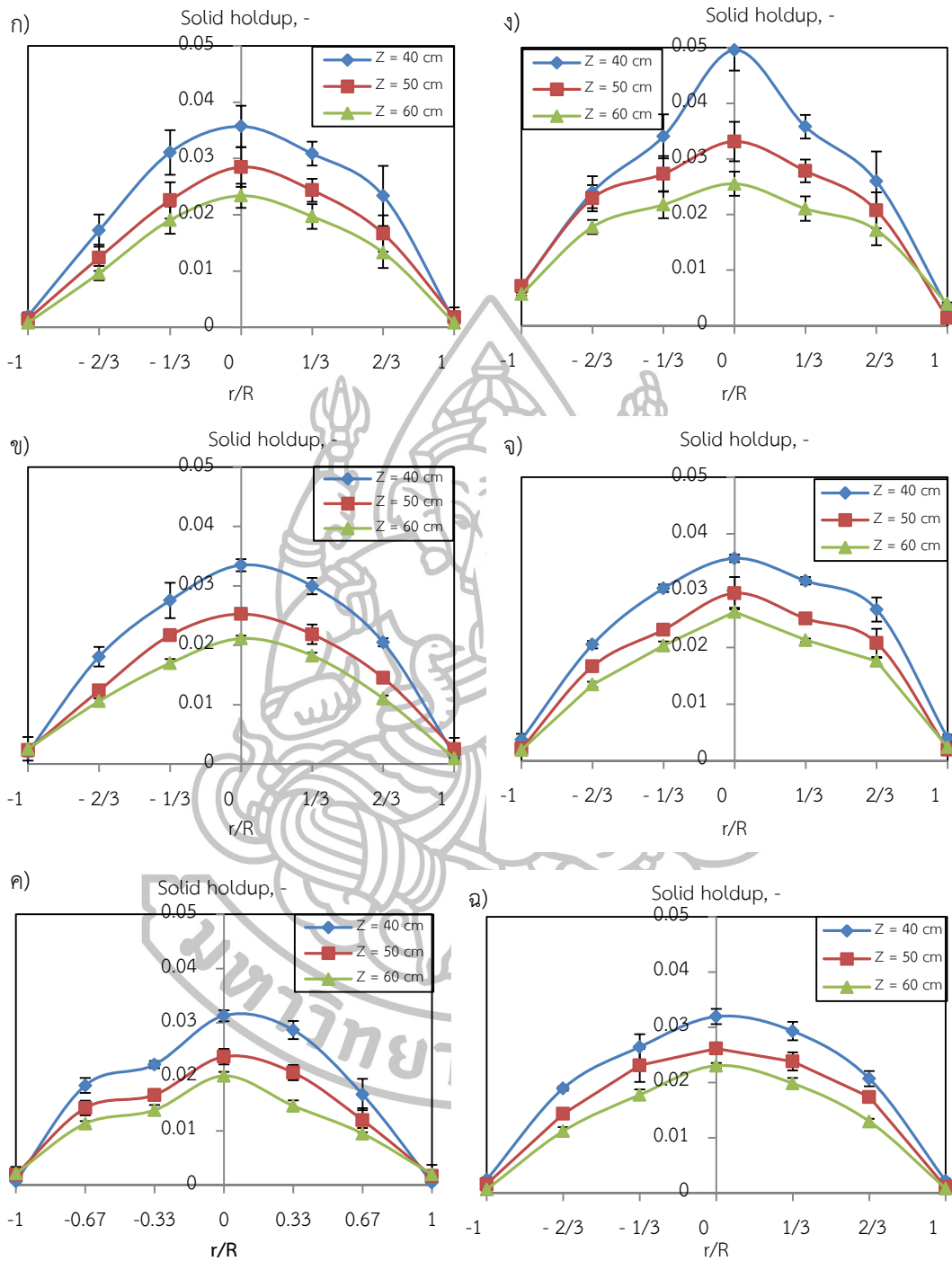
รูปที่ ข.5 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $2U_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_p = 0.3$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm และ ค) 700-1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300-500 μm จ) 600-710 μm และ ฉ) 700-1000 μm



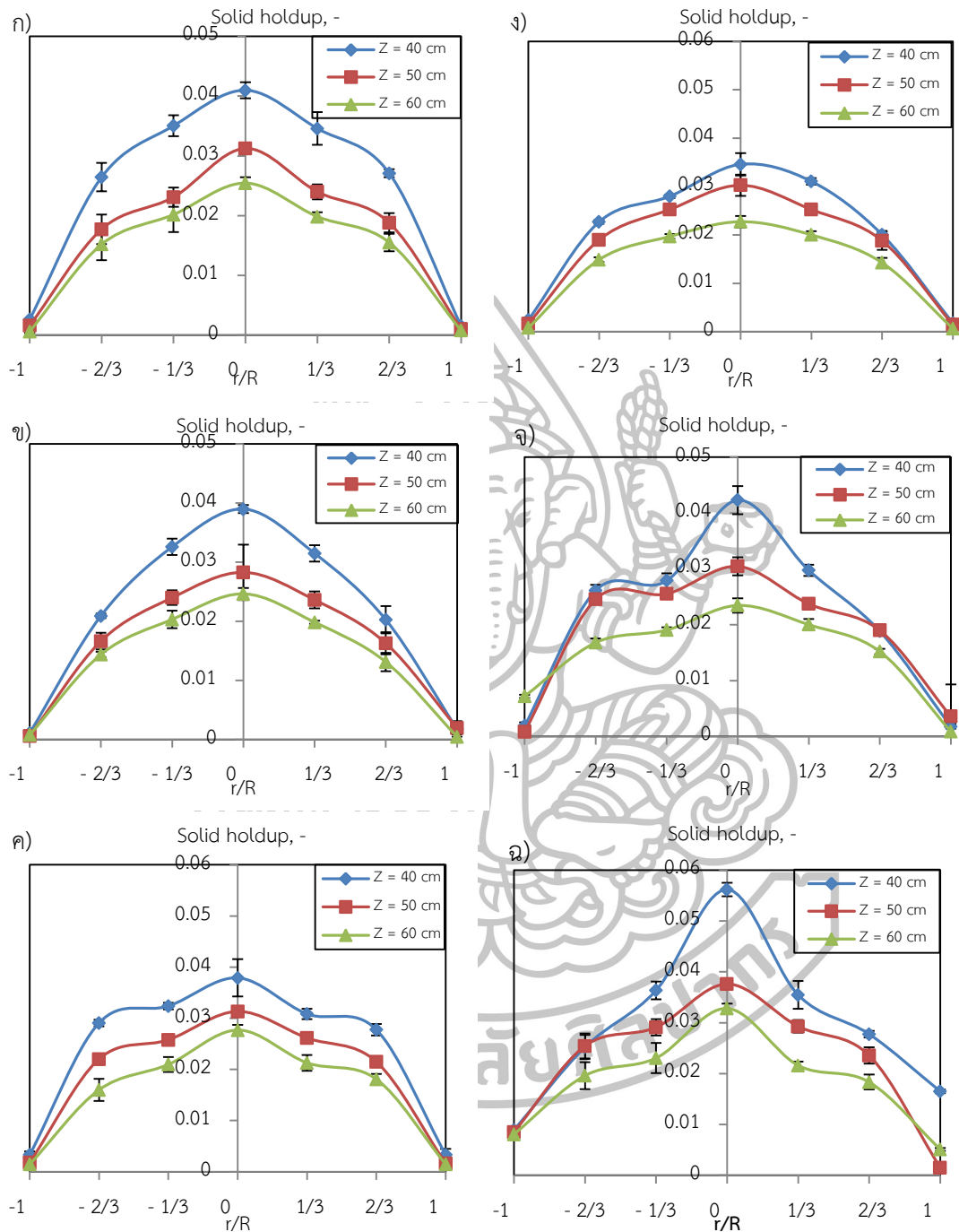
รูปที่ ข.6 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวนอนที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $2U_{mf}$ ที่ $(Q_S+Q_T)/Q_F = 0.5$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm และ ค) 700-1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300-500 μm จ) 600-710 μm และ ฉ) 700-1000 μm



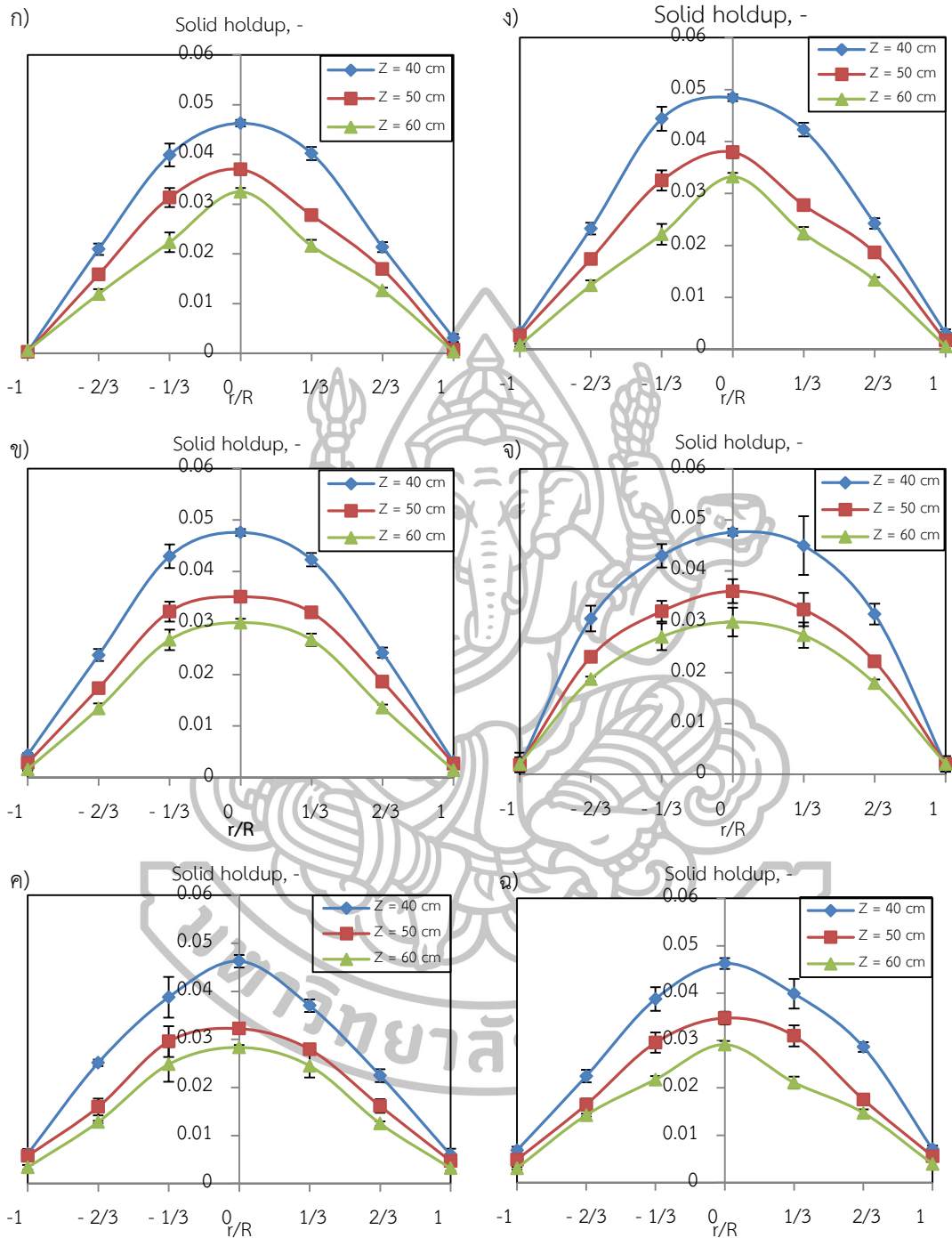
รูปที่ ข.7 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_p = 0$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm และ ค) 700-1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300-500 μm , จ) 600-710 μm และ ฉ) 700-1000 μm



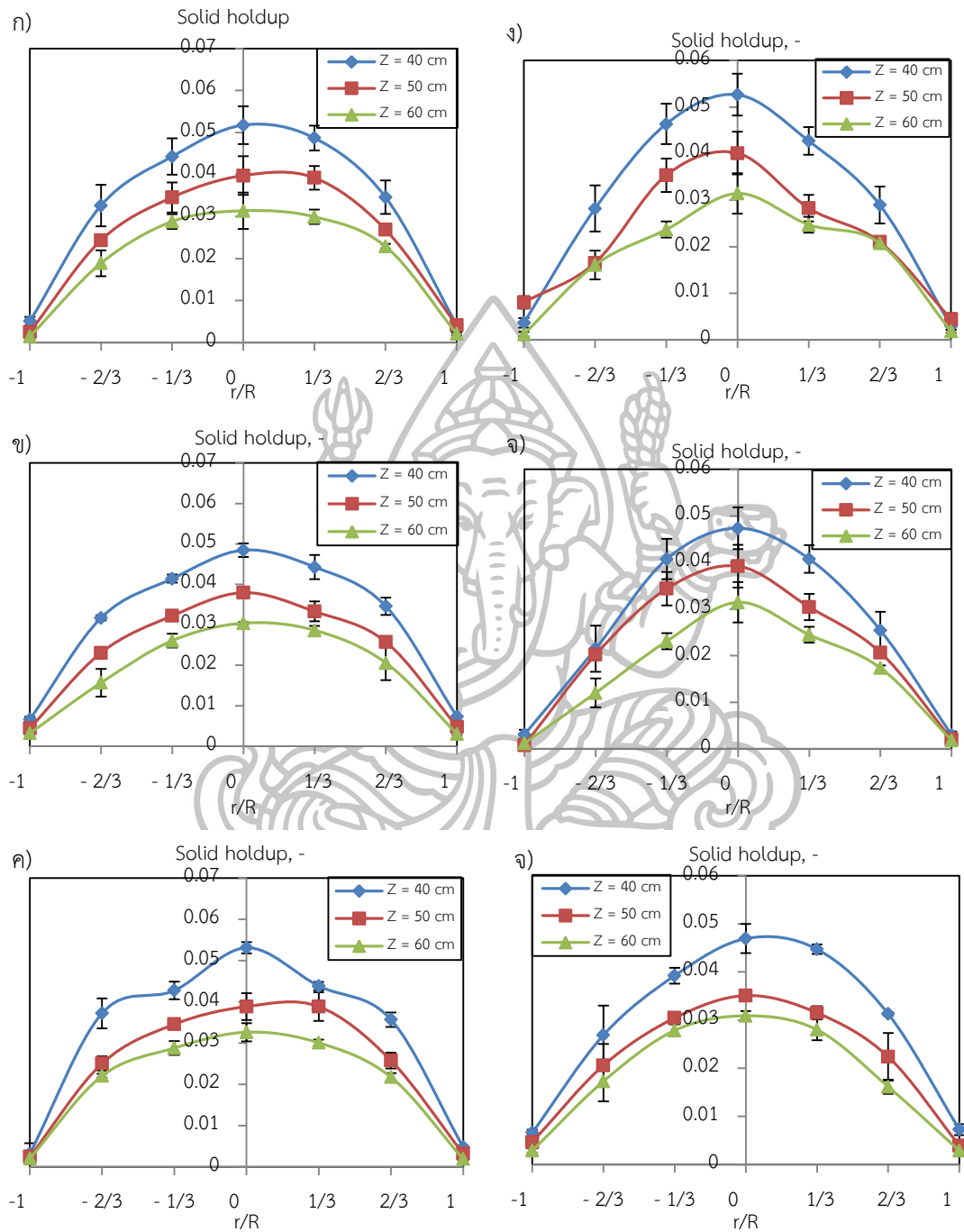
รูปที่ ข.8 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_F = 0.3$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm และ ค) 700-1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300-500 μm, จ) 600-710 μm และ ฉ) 700-1000 μm



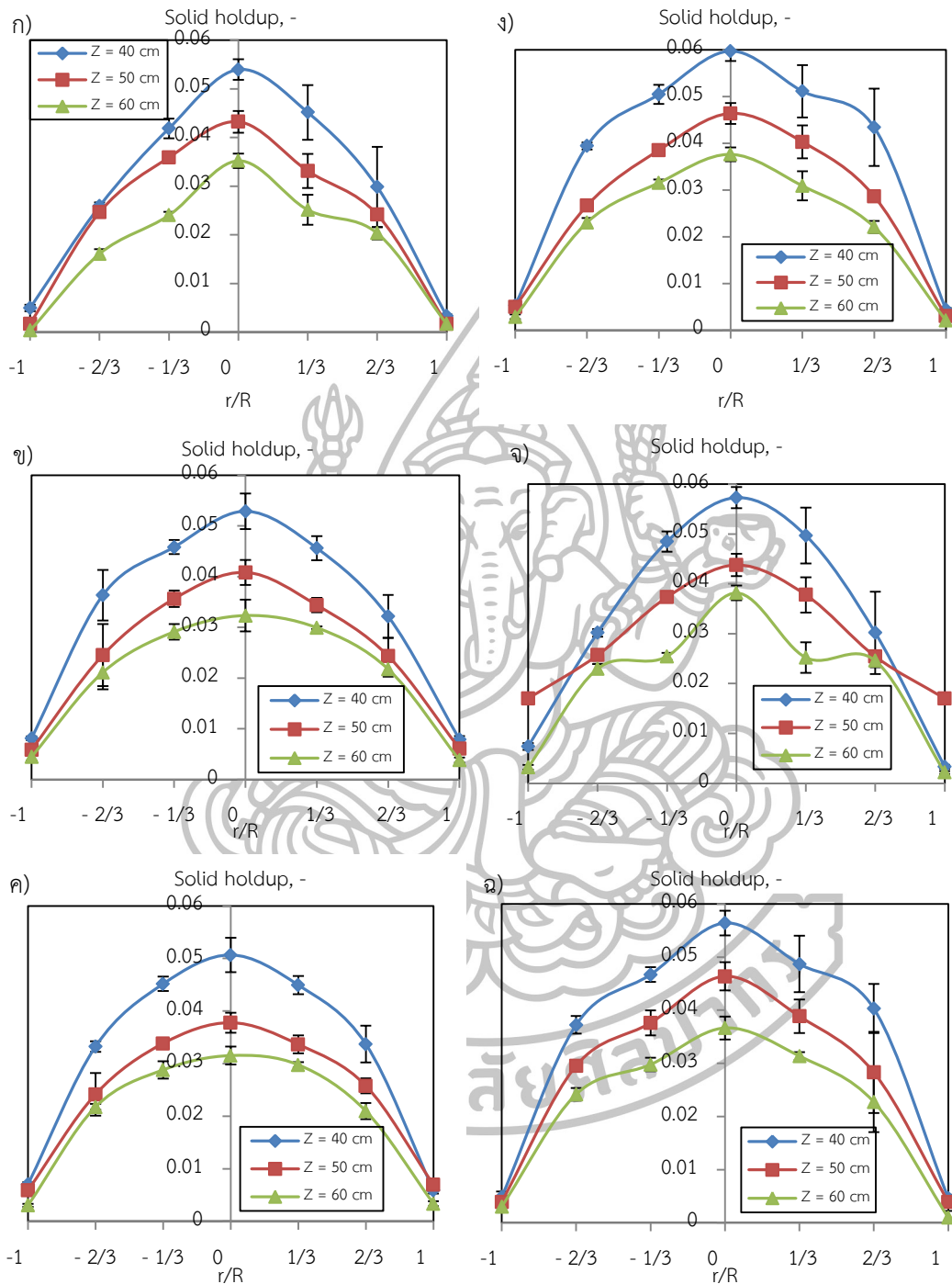
รูปที่ ข.9 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวนอนที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_p = 0.5$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) $300-500 \mu\text{m}$ ข) $600-710 \mu\text{m}$ และ ค) $700-1000 \mu\text{m}$ และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) $300-500 \mu\text{m}$, จ) $600-710 \mu\text{m}$ และ ฉ) $700-1000 \mu\text{m}$



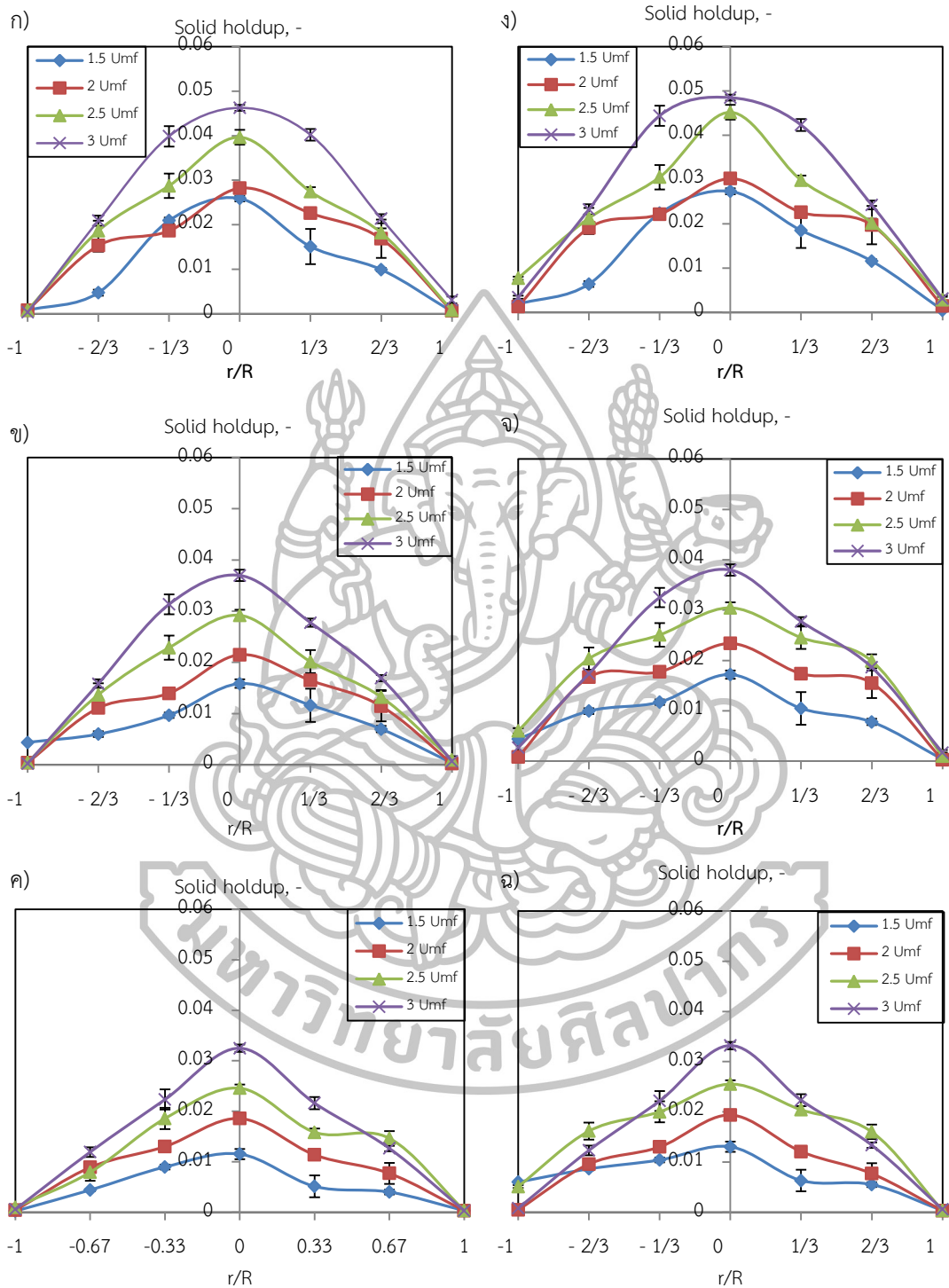
รูปที่ ข.10 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $3u_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_F = 0$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300–500 μm ข) 600–710 μm และ ค) 700–1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300–500 μm , จ) 600–710 μm และ ฉ) 700–1000 μm



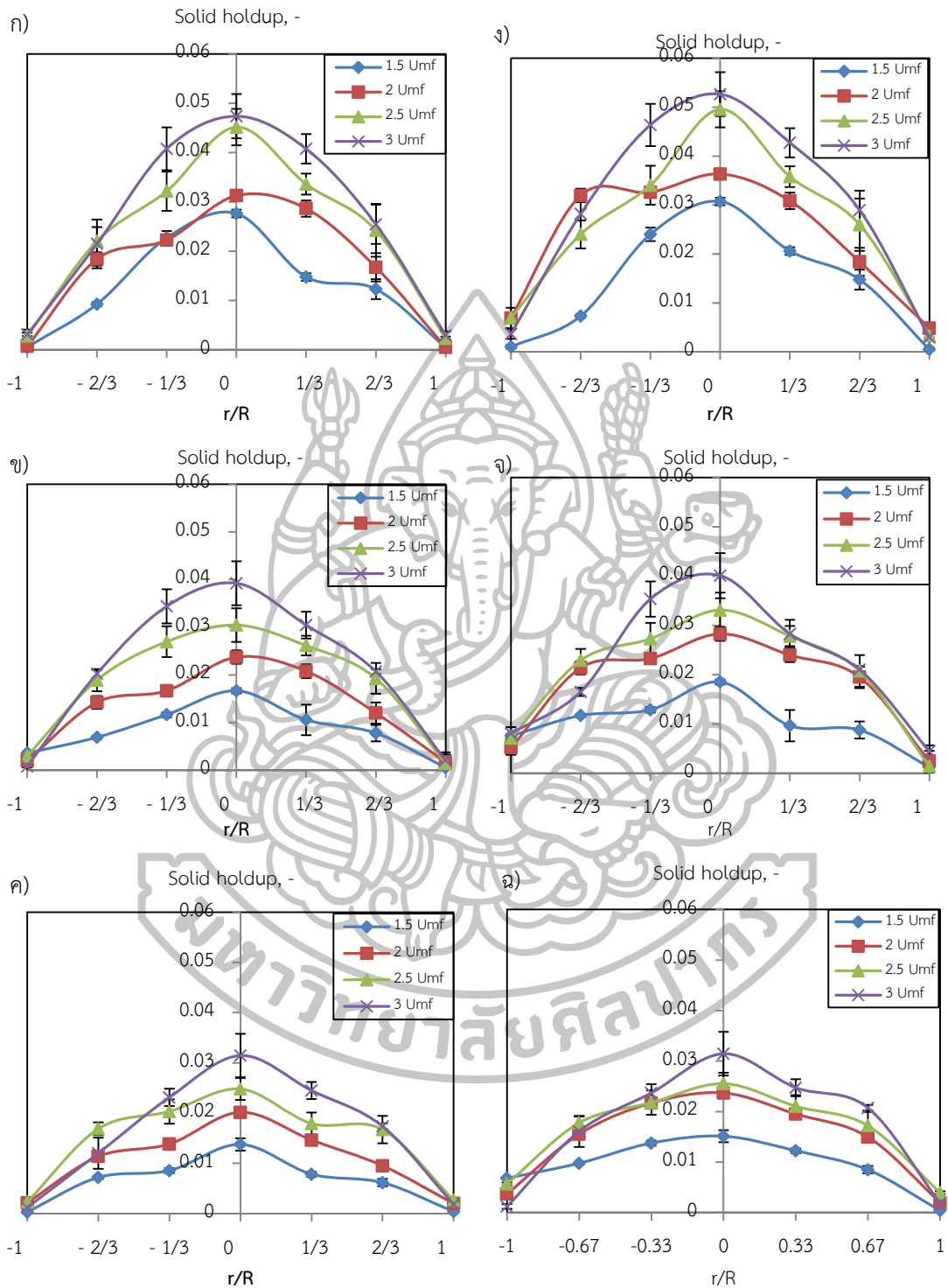
รูปที่ ข.11 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สถานะความเร็วปฐมภูมิ $3u_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_p = 0.3$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300–500 μm ข) 600–710 μm ค) 700–1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300–500 μm , จ) 600–710 μm และ ฉ) 700–1000 μm



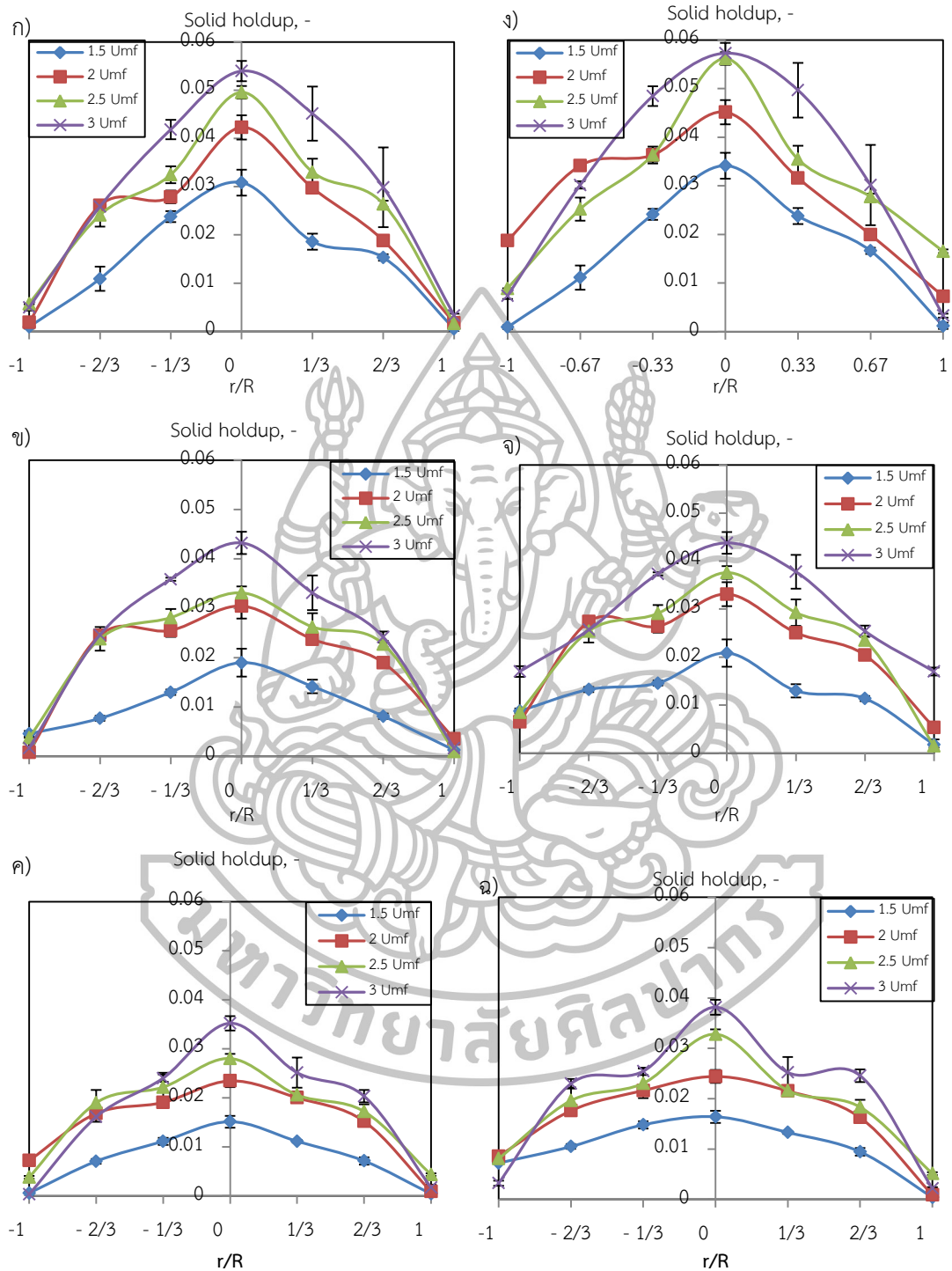
รูปที่ ข.12 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวนอนที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่สภาวะความเร็วปฐมภูมิ $3u_{mf}$ ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_F = 0.5$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ขนาดอนุภาคเบต ก) 300-500 μm ข) 600-710 μm ค) 700-1000 μm และที่ $S_w = 2.98$ ขนาดอนุภาคเบต ง) 300-500 μm , จ) 600-710 μm และ ฉ) 700-1000 μm



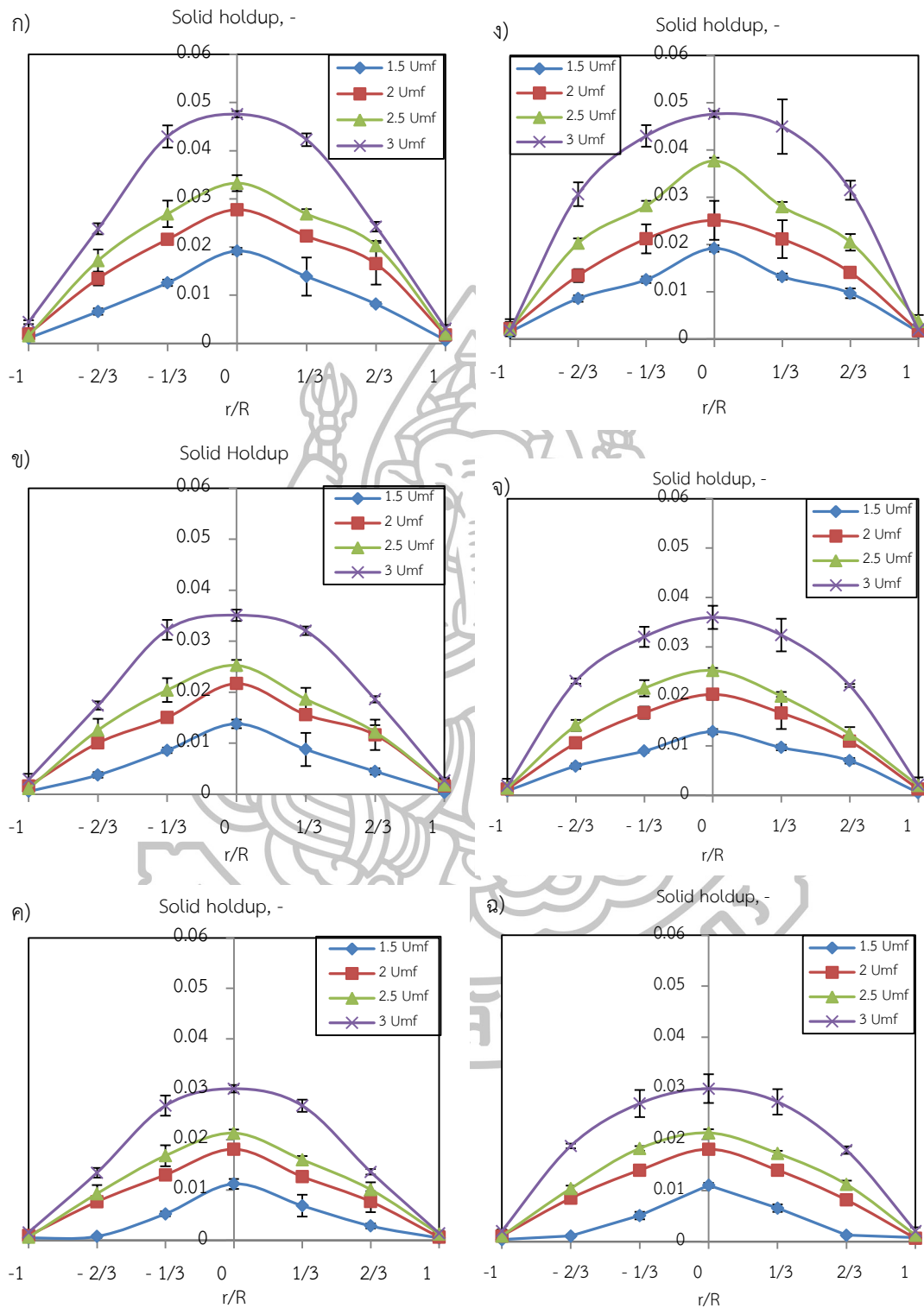
รูปที่ ข.13 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 300-500 μm ที่ $(Q_s+Q_T)/Q_p = 0$ สำหรับ $s_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $s_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



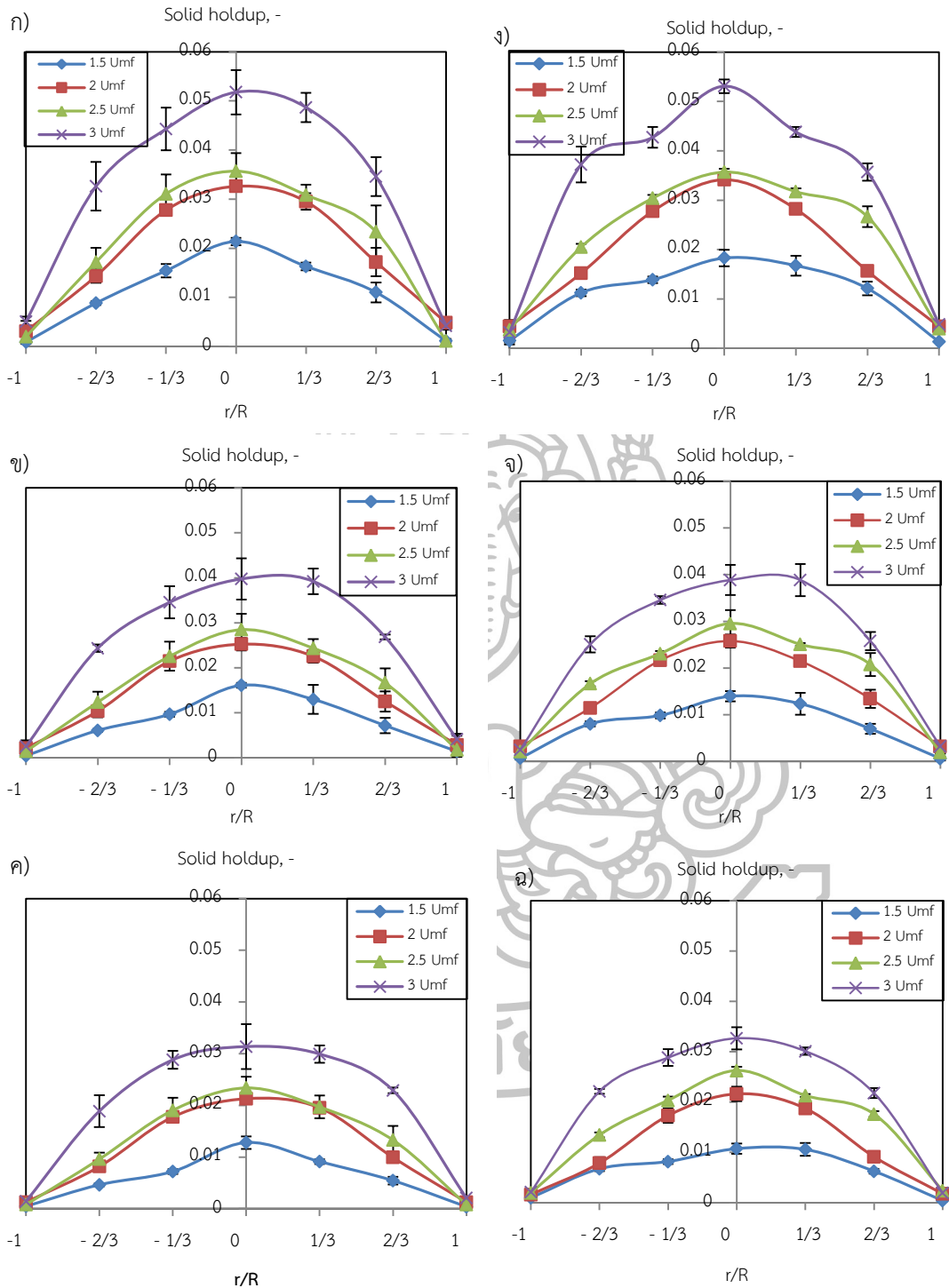
รูปที่ ข.14 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่มีความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 300-500 μm ที่ $(Q_s+Q_t)/Q_p = 0.3$ สำหรับ $s_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $s_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



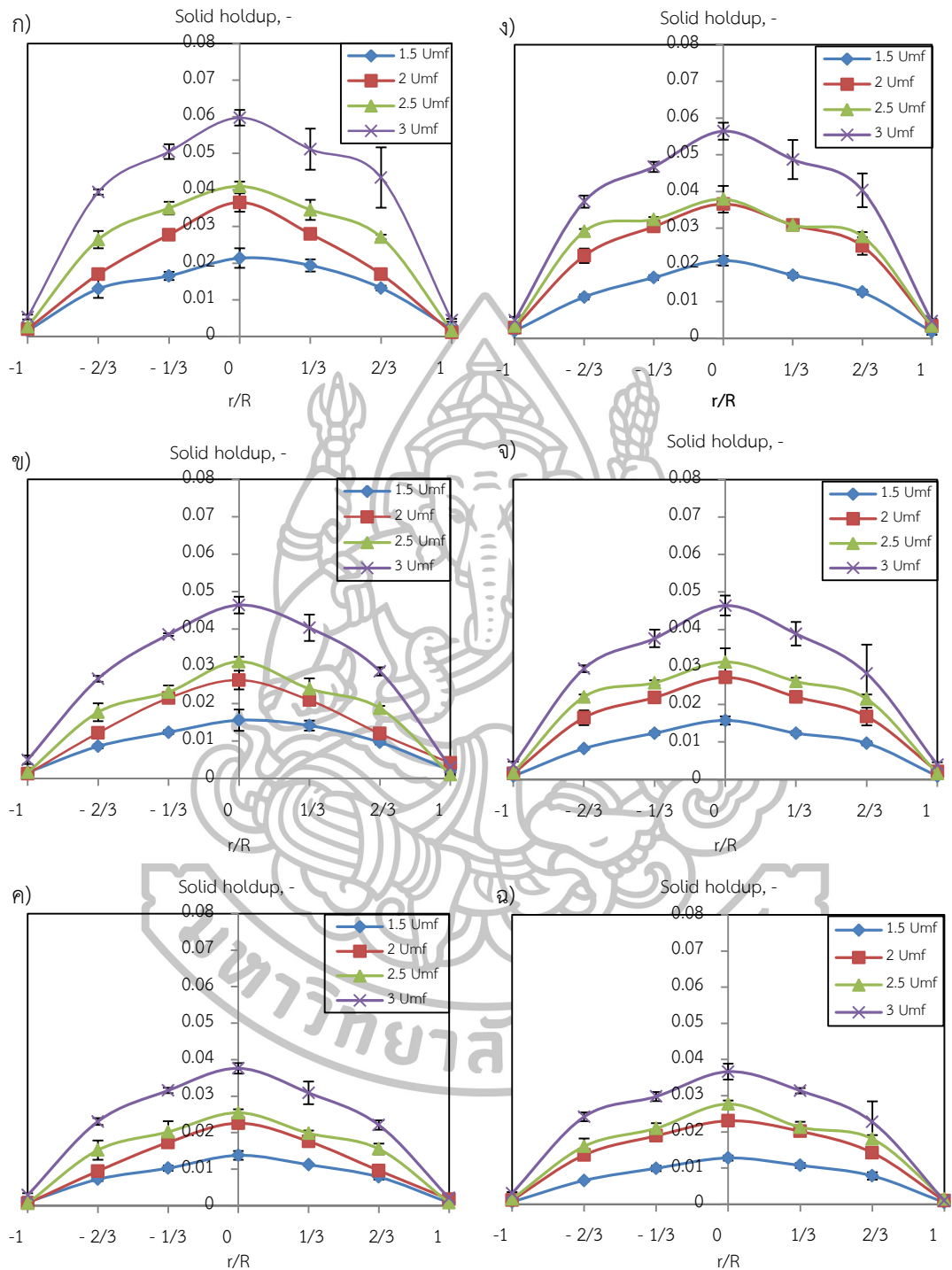
รูปที่ ข.15 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่มีความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบต 300-500 μm ที่ $(Q_s+Q_t)/Q_p = 0.5$ สำหรับ $s_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40cm ข) 50 cm ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $s_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



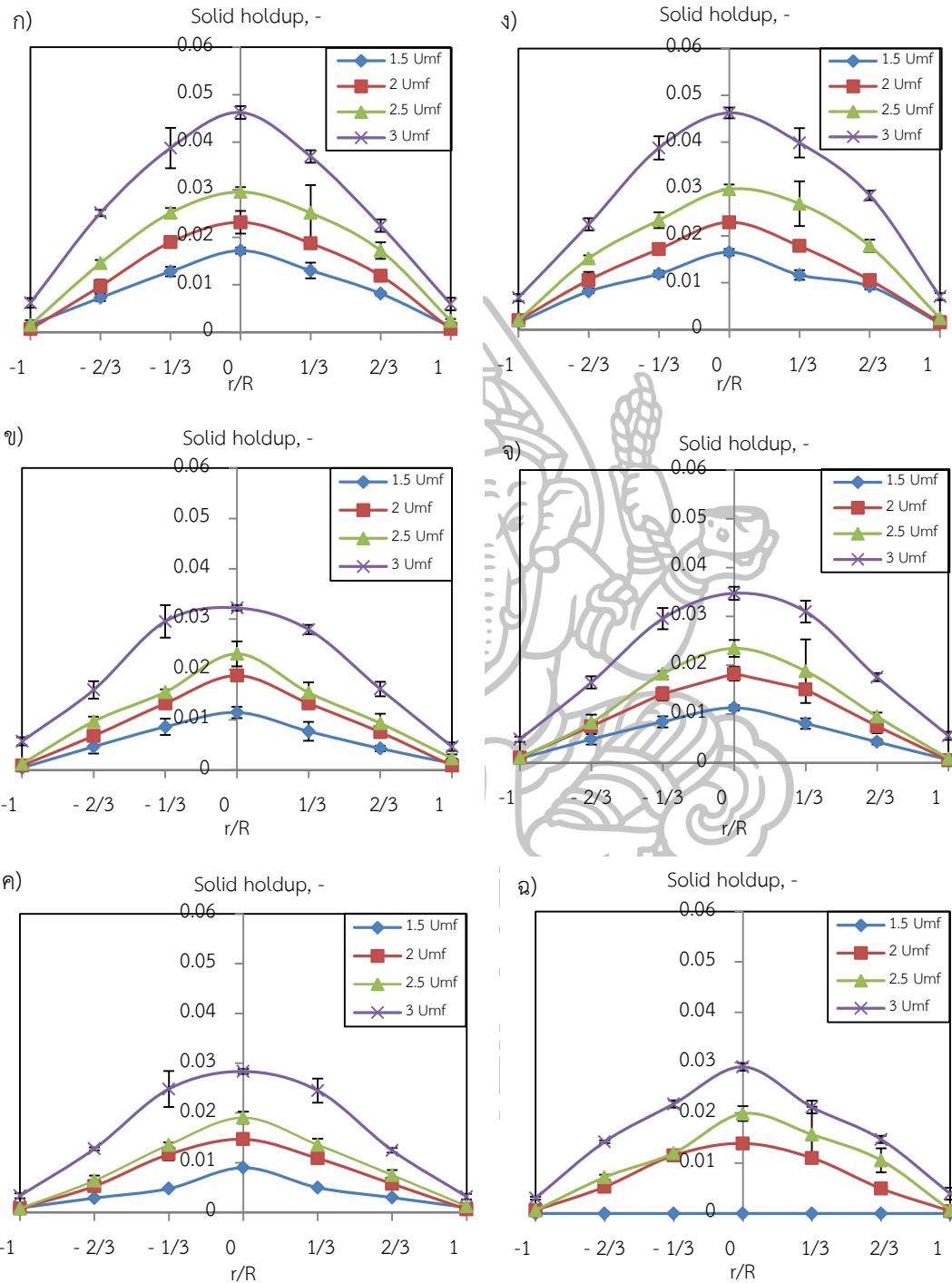
รูปที่ ข.16 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐมนุ้มีแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 600-710 μm ที่ $(Q_5+Q_7)/Q_p = 0$ สำหรับ $s_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $s_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



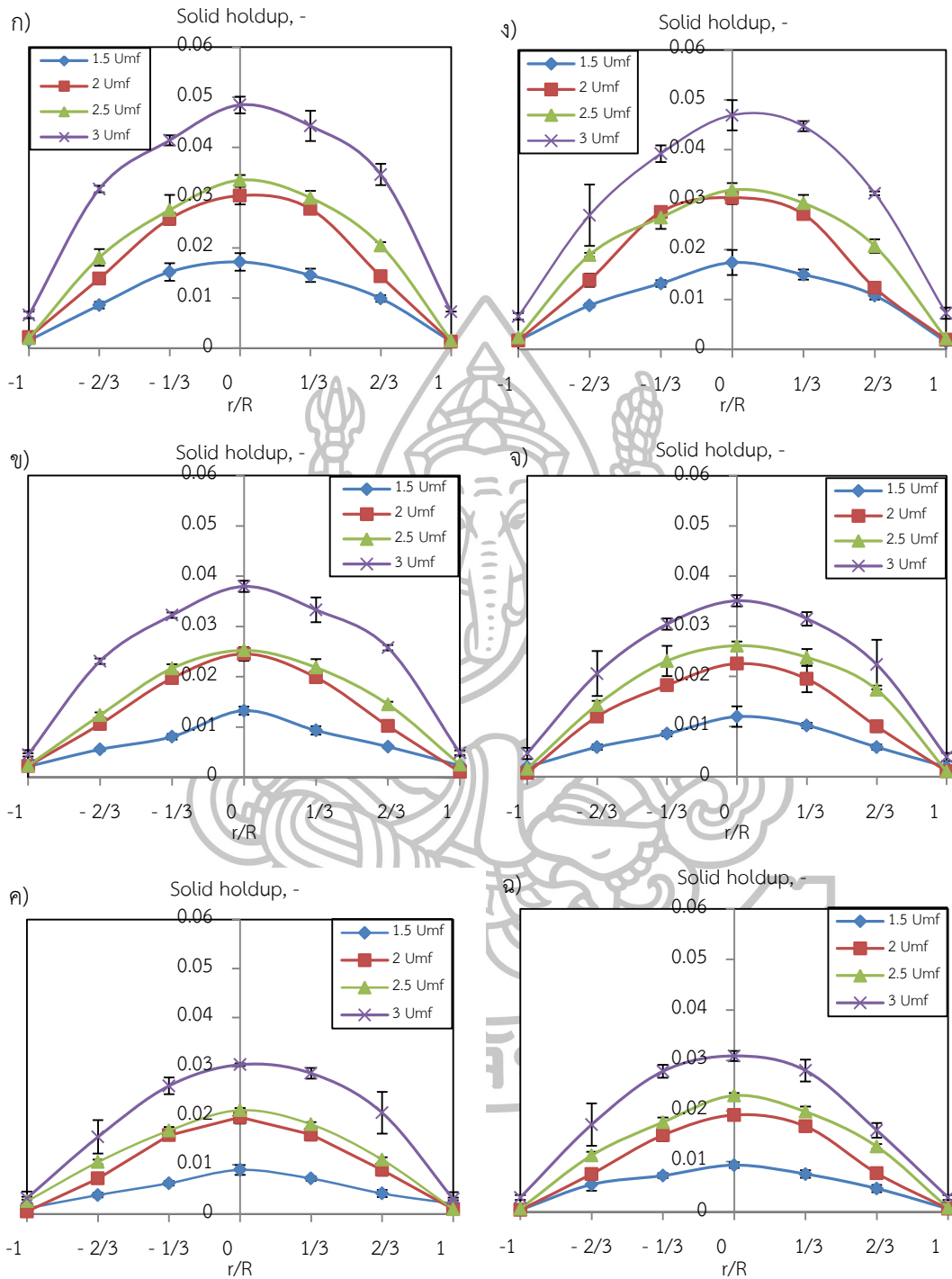
รูปที่ ข.17 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 600-710 μm ที่ $(Q_5+Q_7)/Q_p = 0.3$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



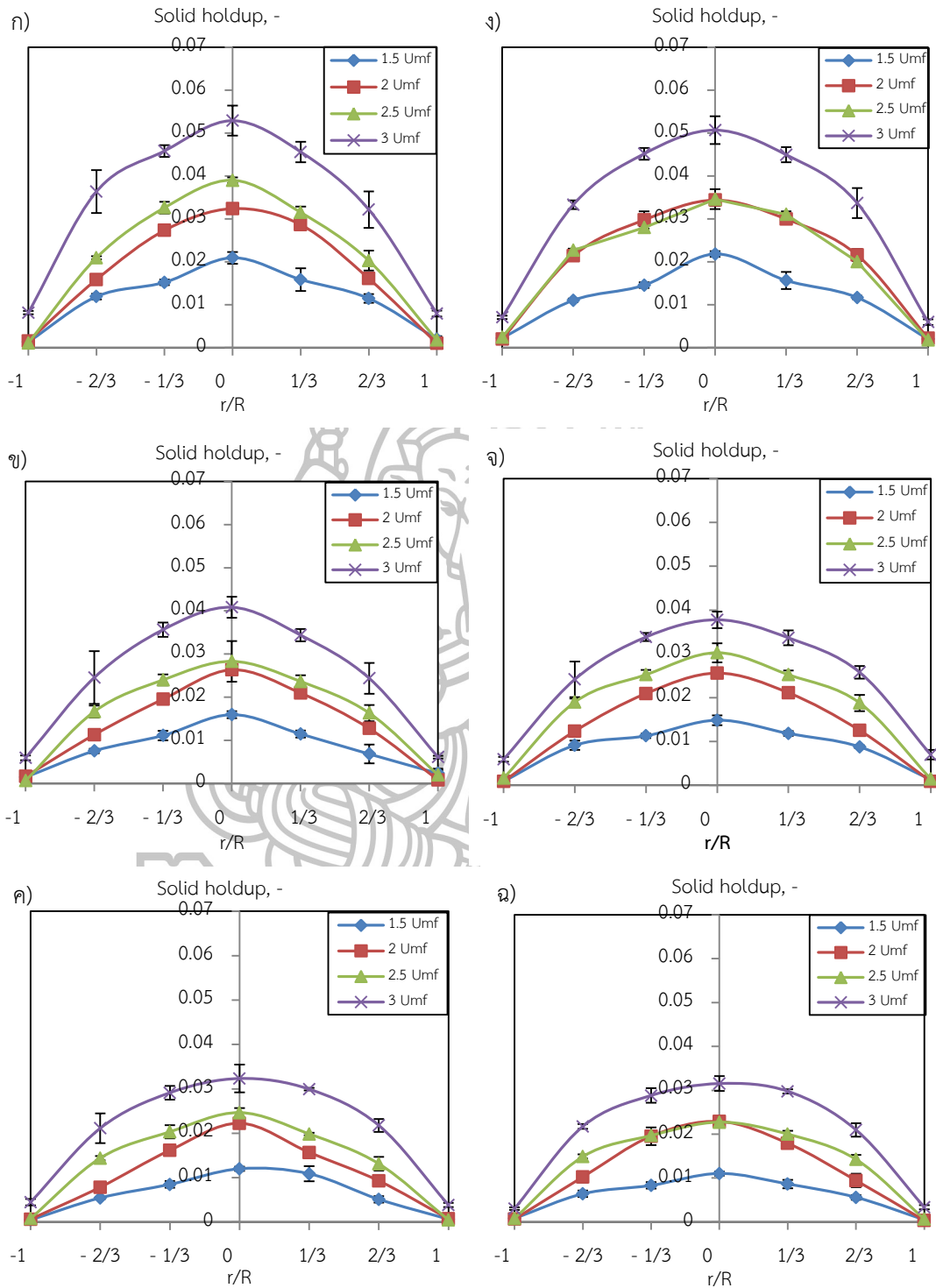
รูปที่ ข.18 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบต 600-710 μm ที่ $(Q_5+Q_7)/Q_p = 0.5$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



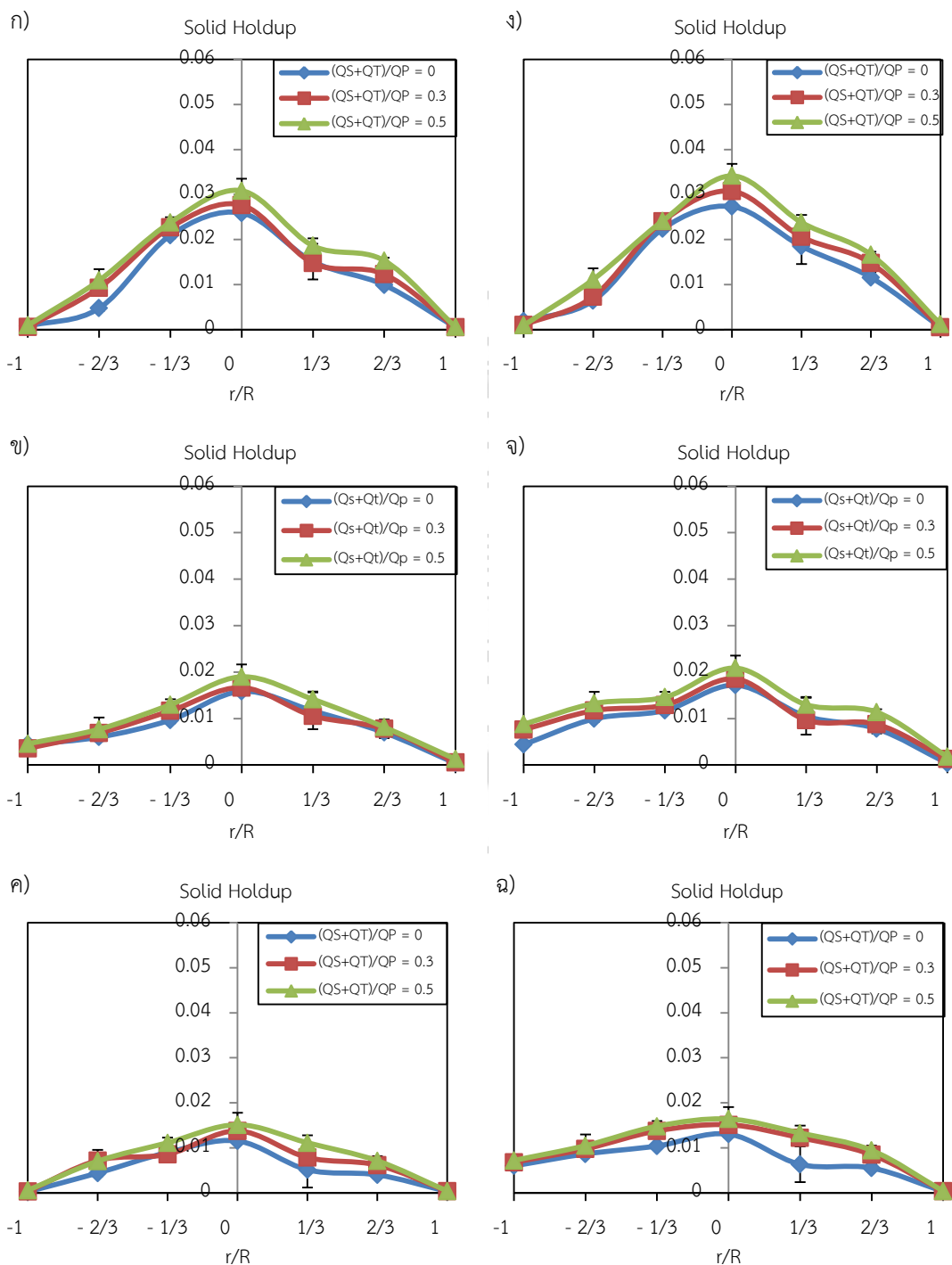
รูปที่ ข.19 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบต 710 - 1000 μm ที่ $(Q_s+Q_r)/Q_p = 0$ สำหรับ $s_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $s_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



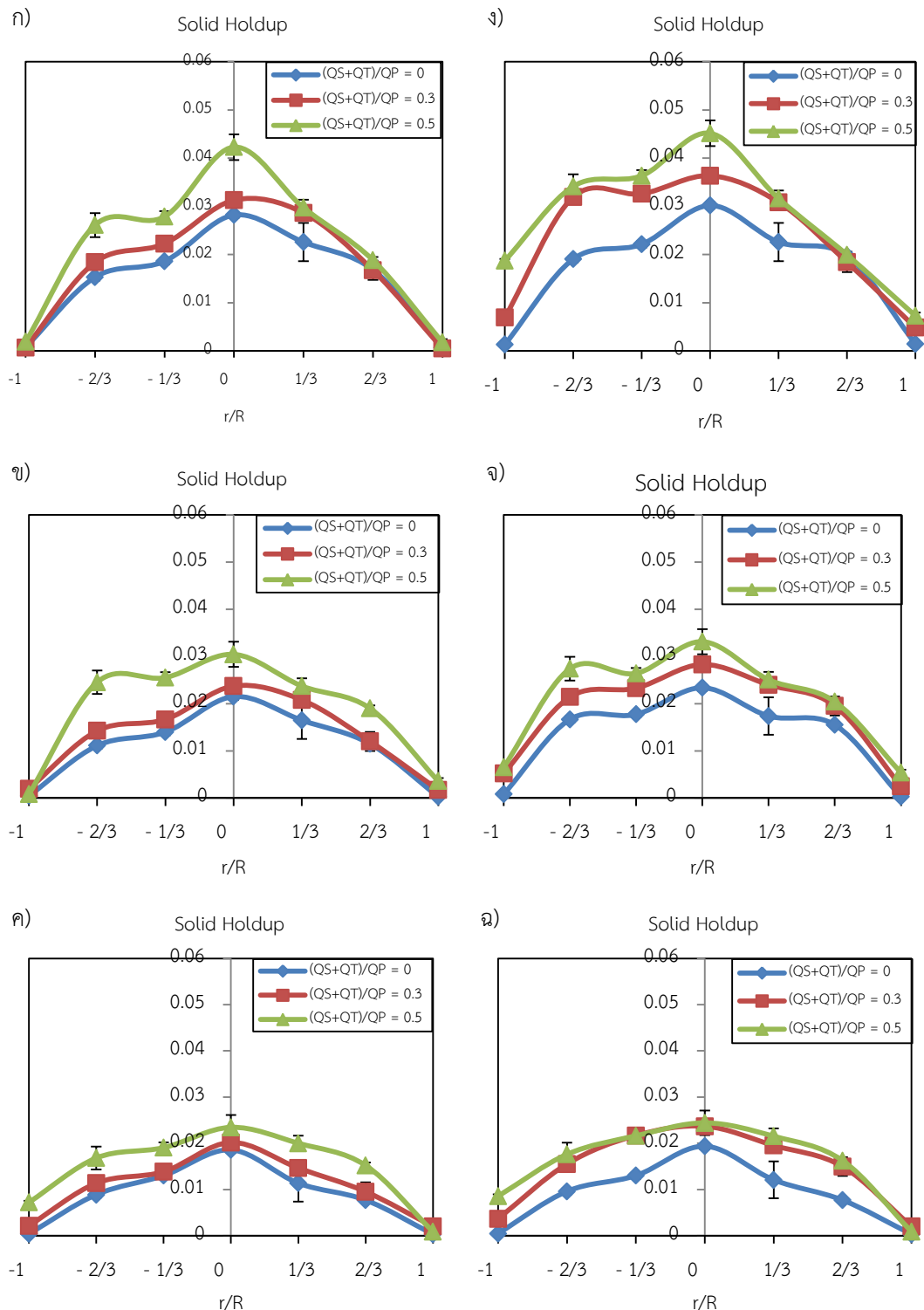
รูปที่ ข.20 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 710-1000 μm ที่ $(Q_s+Q_r)/Q_p = 0.3$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



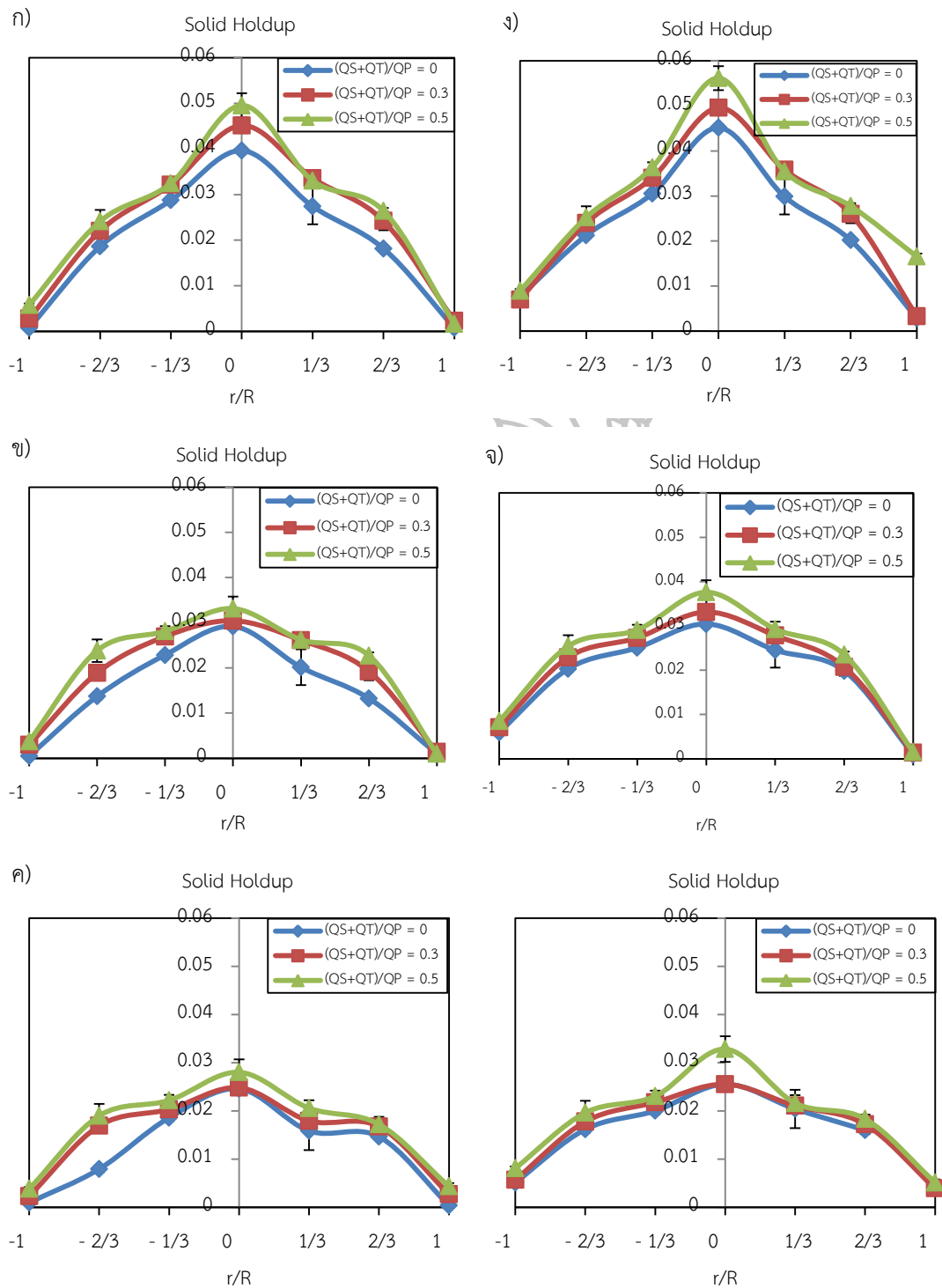
รูปที่ ข.21 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ความเร็วของอากาศปฐุมภูมิแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบต 710 - 1000 μm ที่ $(Q_s+Q_t)/Q_p = 0.5$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในภากรวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในภากรวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



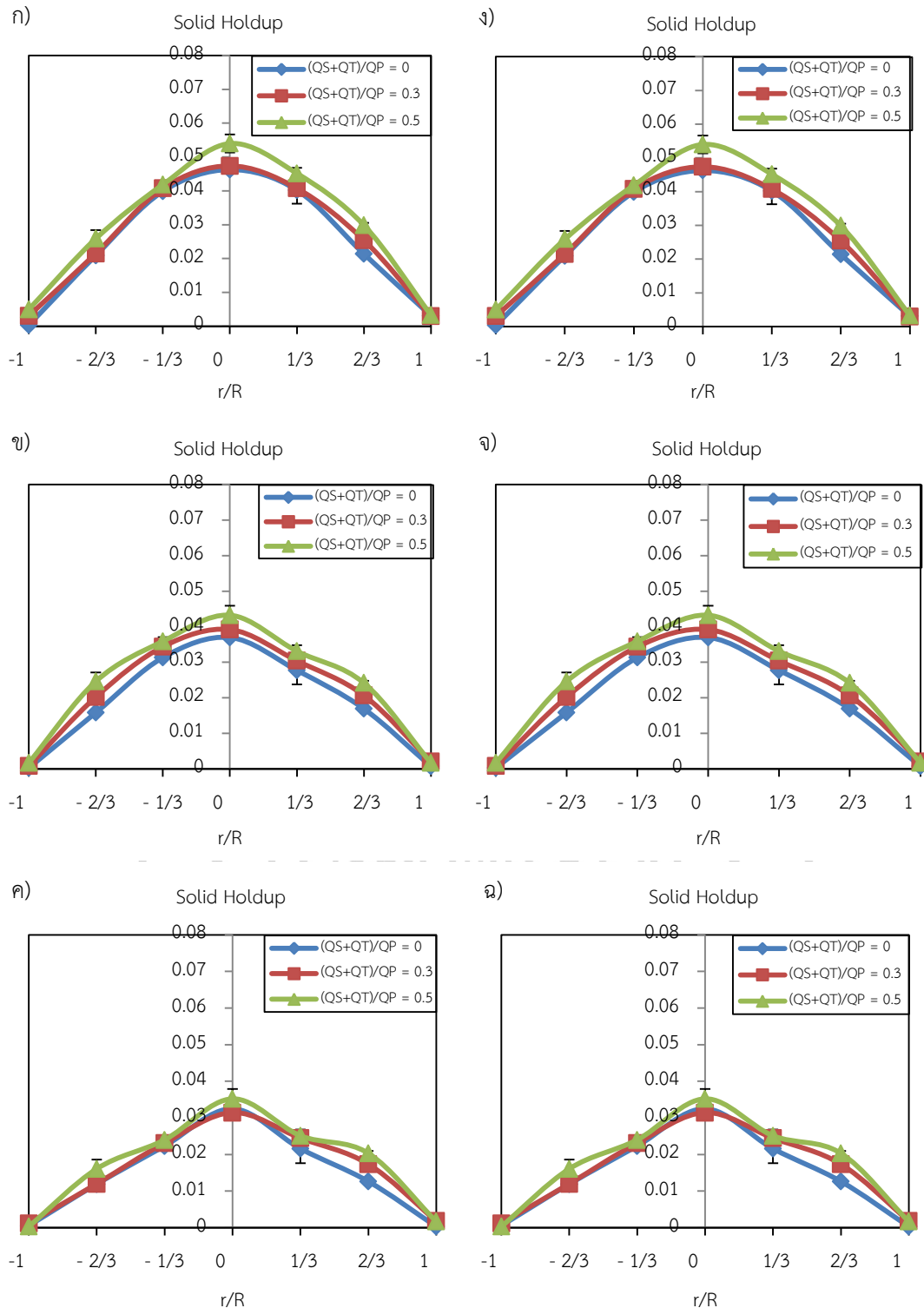
รูปที่ ข.22 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบต 300–500 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5 u_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



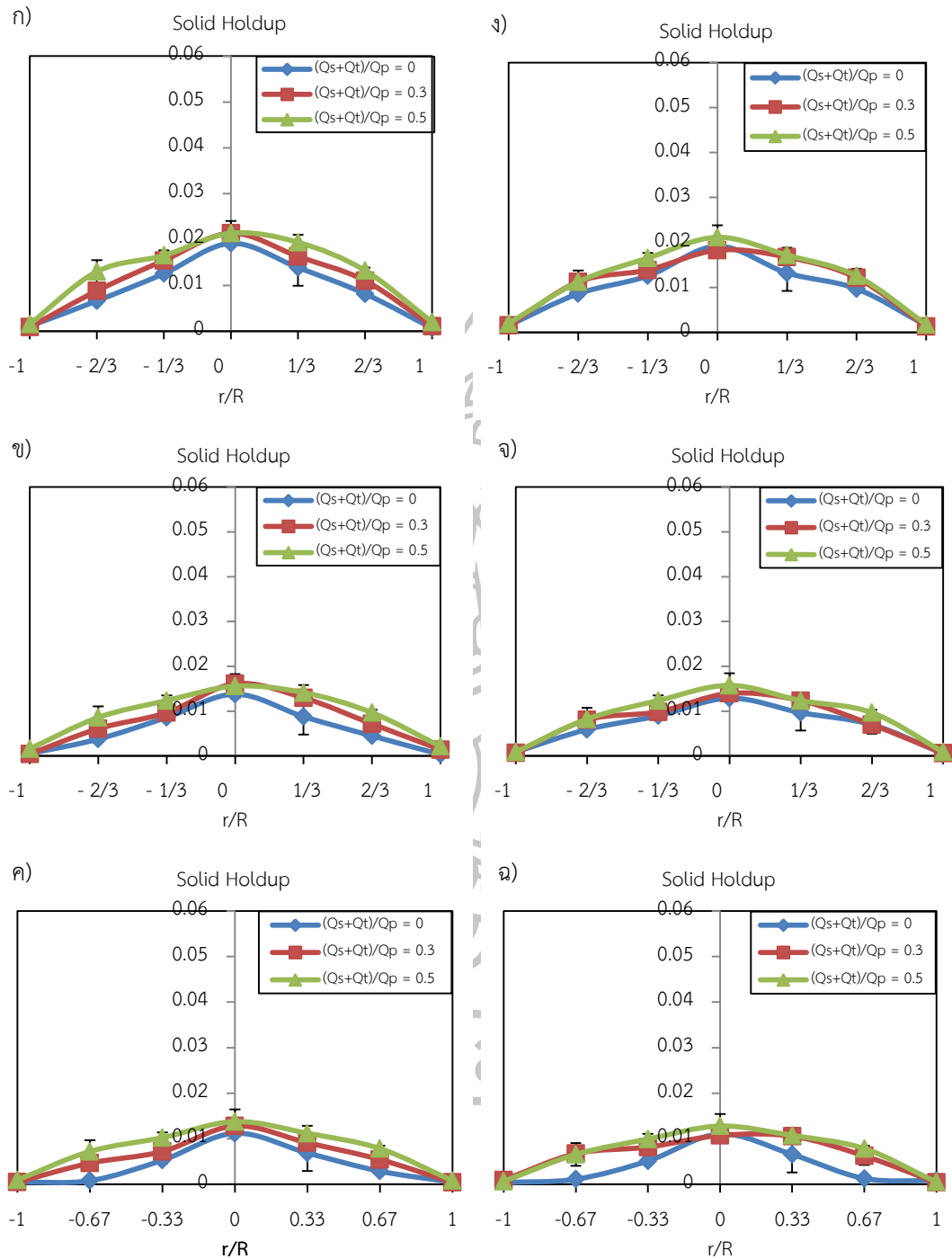
รูปที่ ข.23 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 300–500 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



รูปที่ ข.24 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเขต 300–500 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm

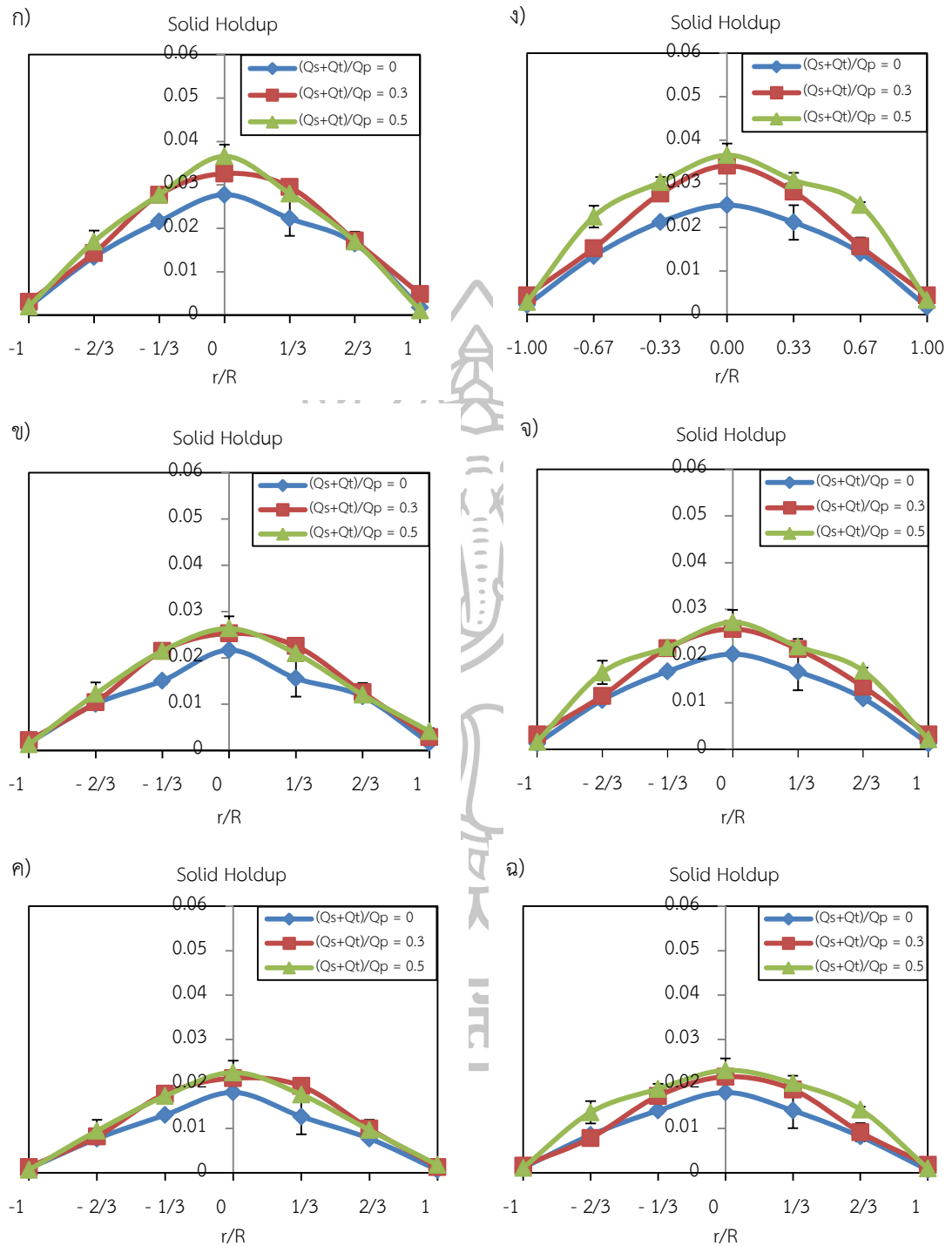


รูปที่ ข.25 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 300–500 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $3U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm

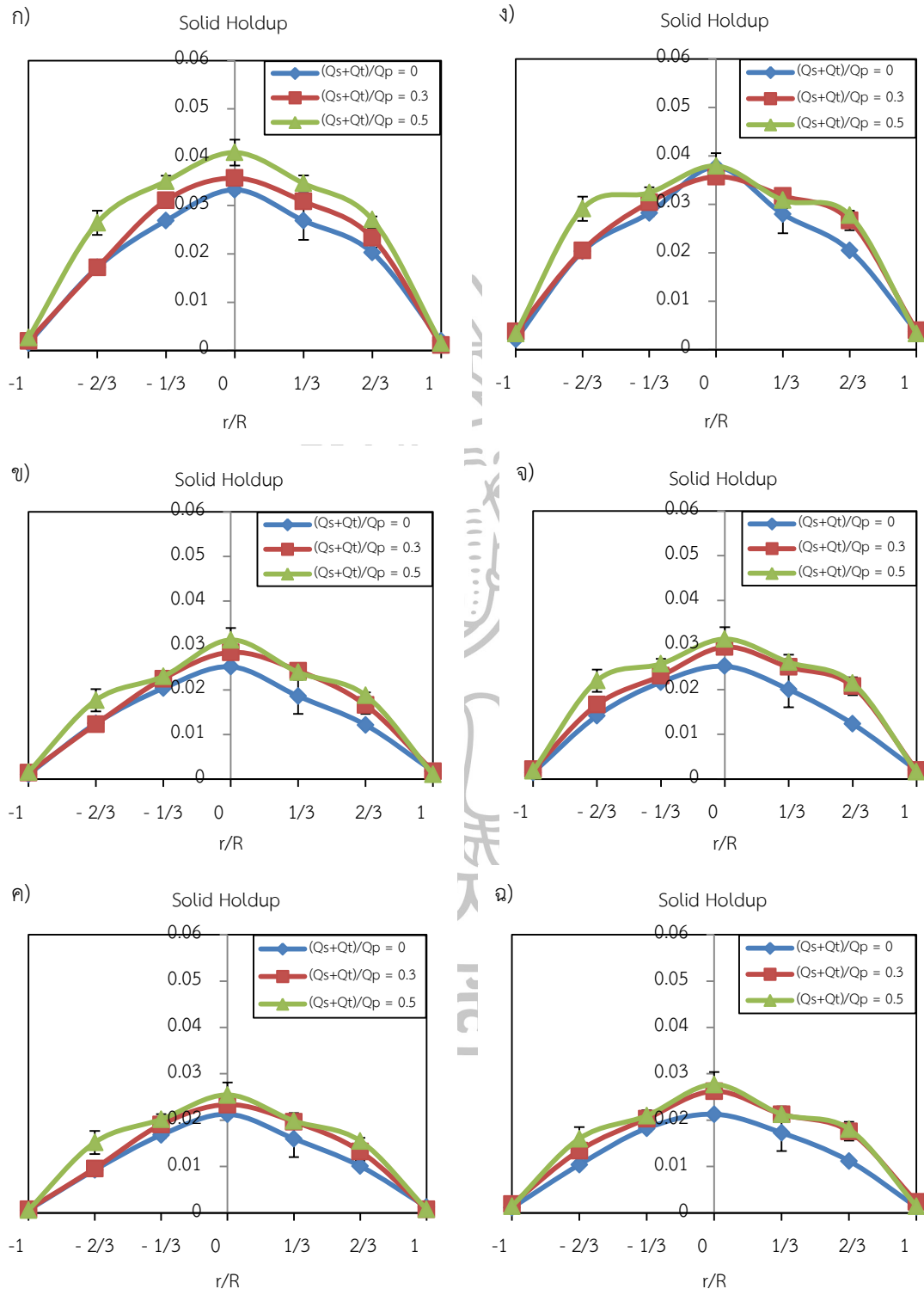


รูป

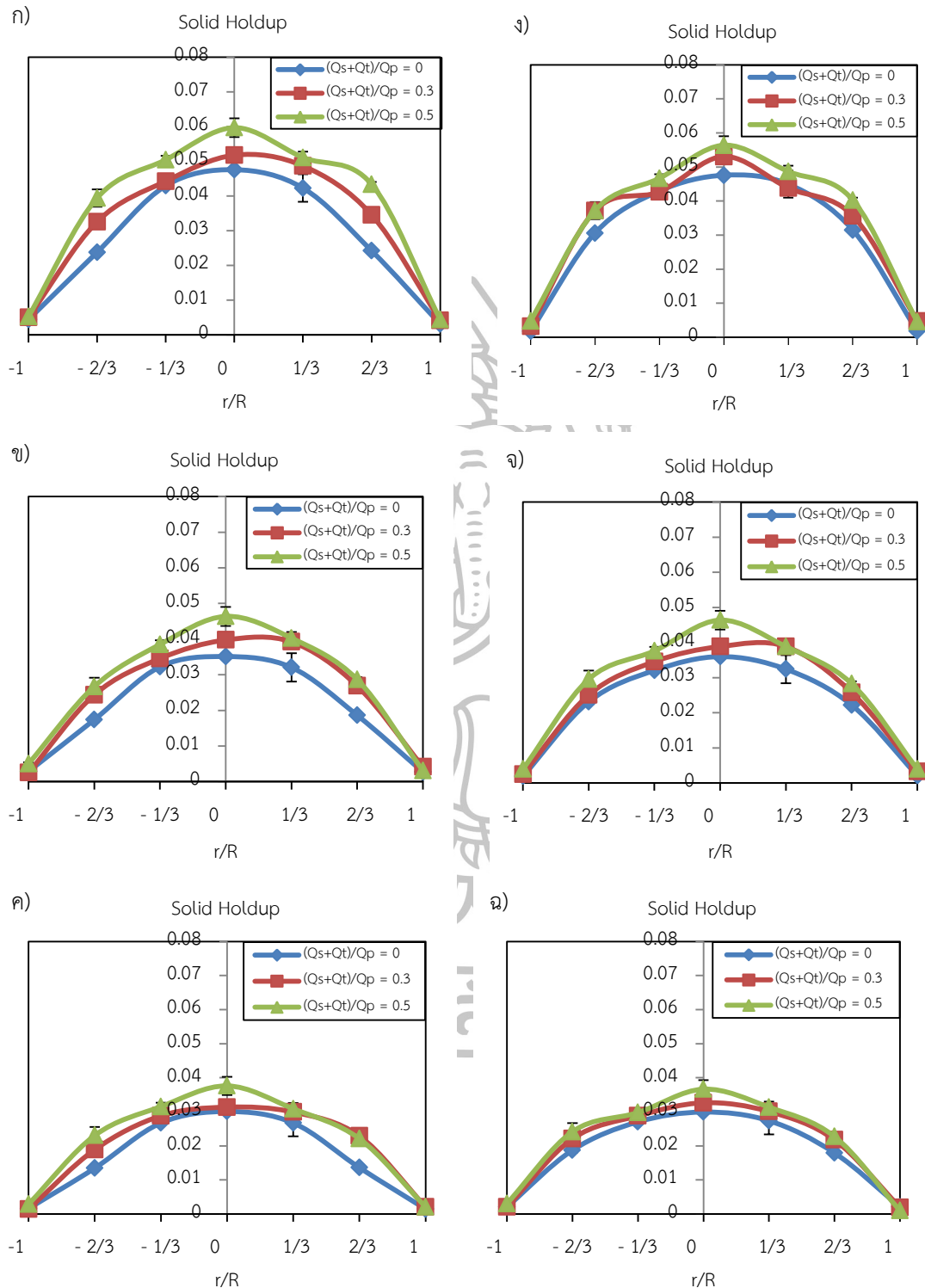
ที่ ข.26 ราค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบต 600–710 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



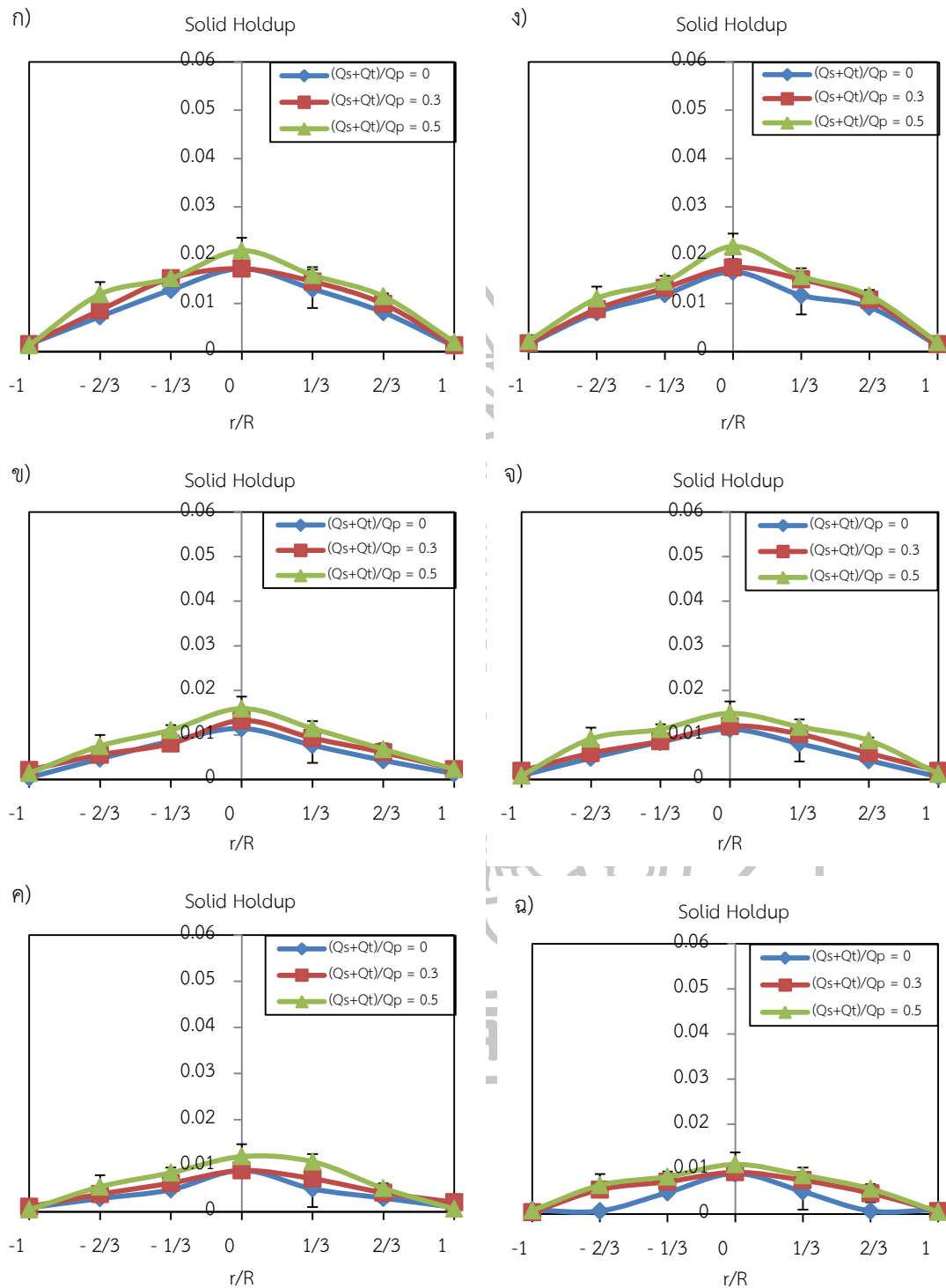
รูปที่ ข.27 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 600–710 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 c m จ) 5 0 c m และ ฉ) 6 0 c m



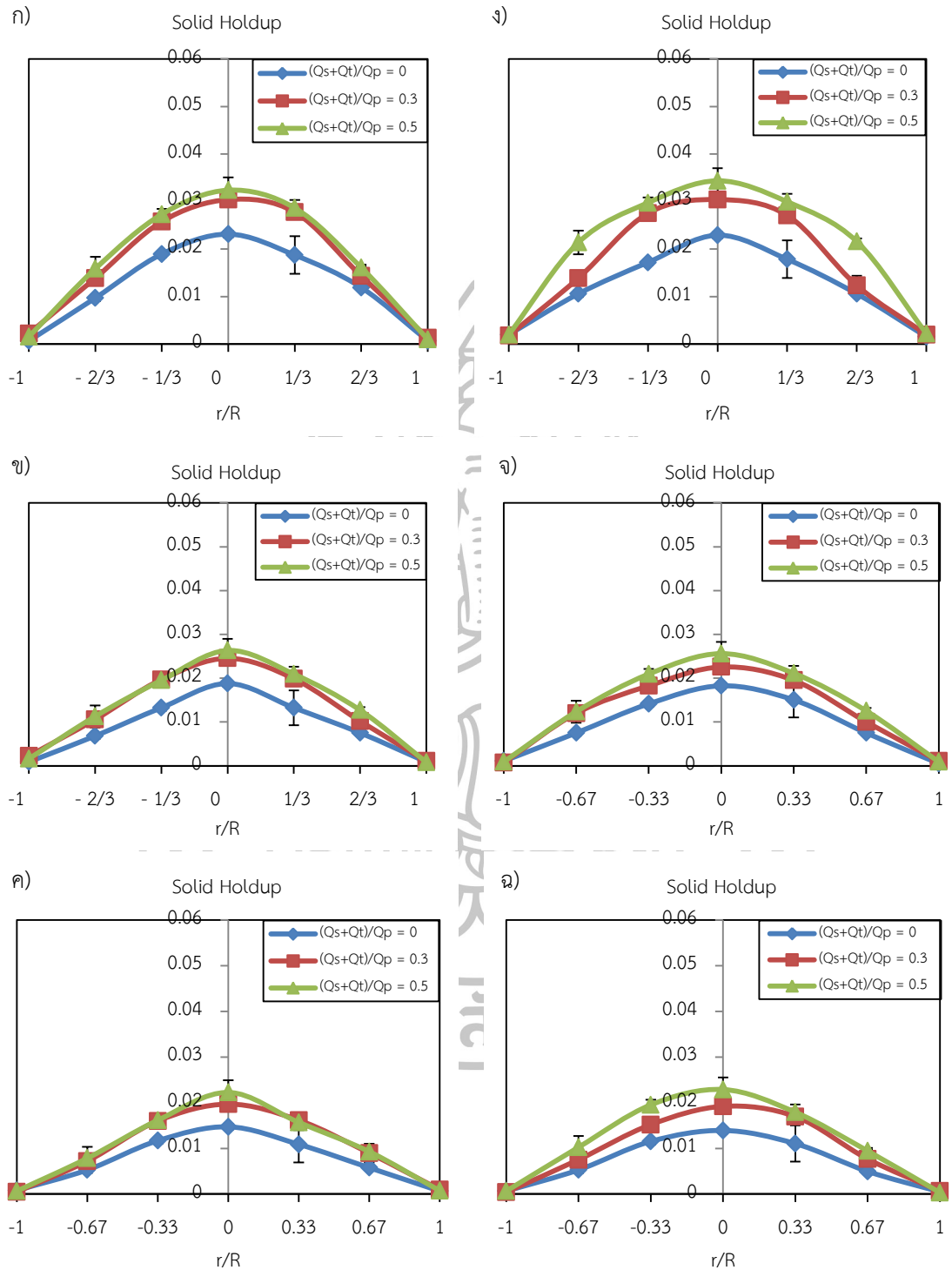
รูปที่ ข.28 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 600–710 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 c m จ) 5 0 c m และ ฉ) 6 0 c m



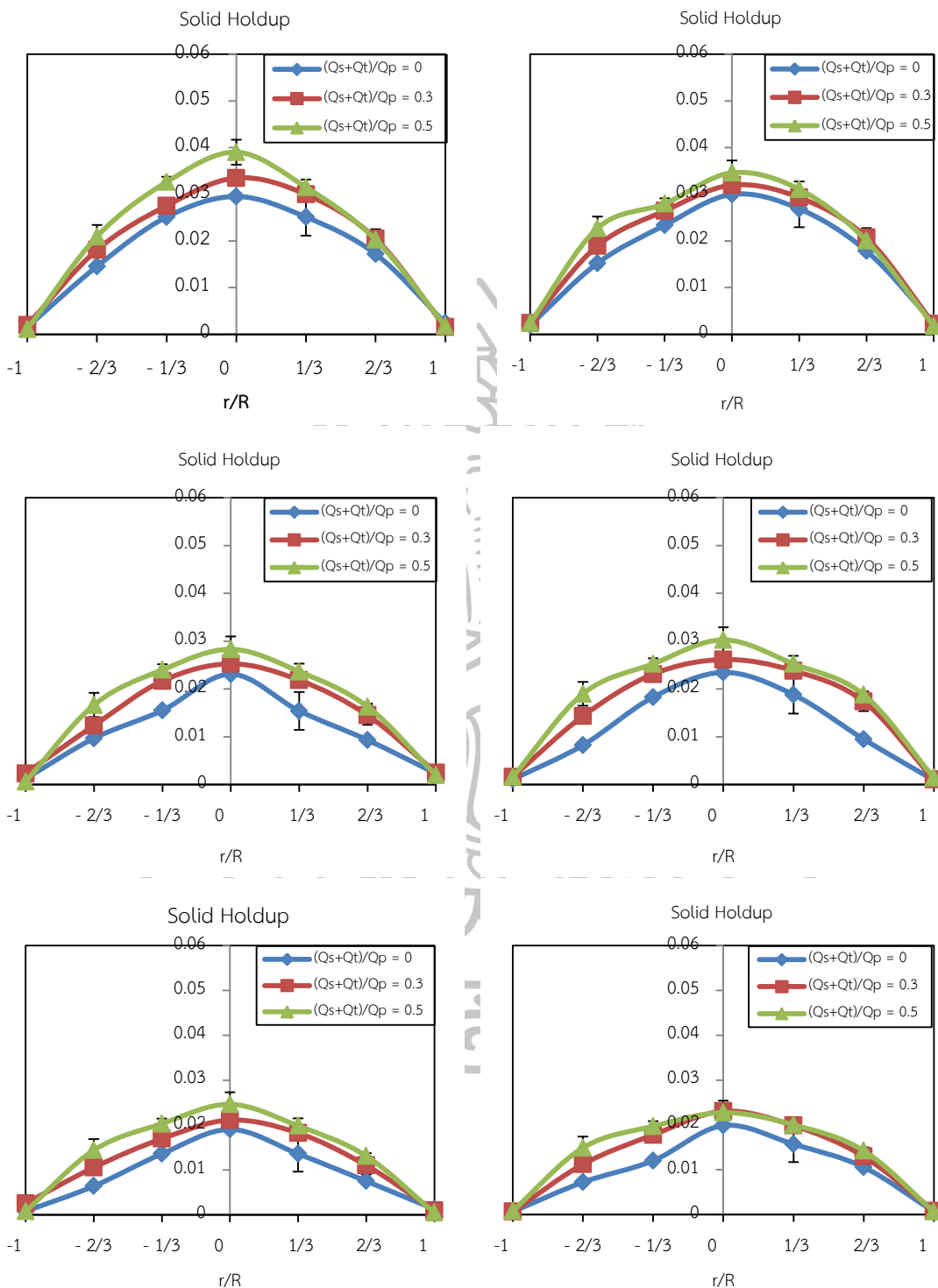
รูปที่ ข.29 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 600–710 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $3U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 c m จ) 5 0 c m และ ฉ) 6 0 c m



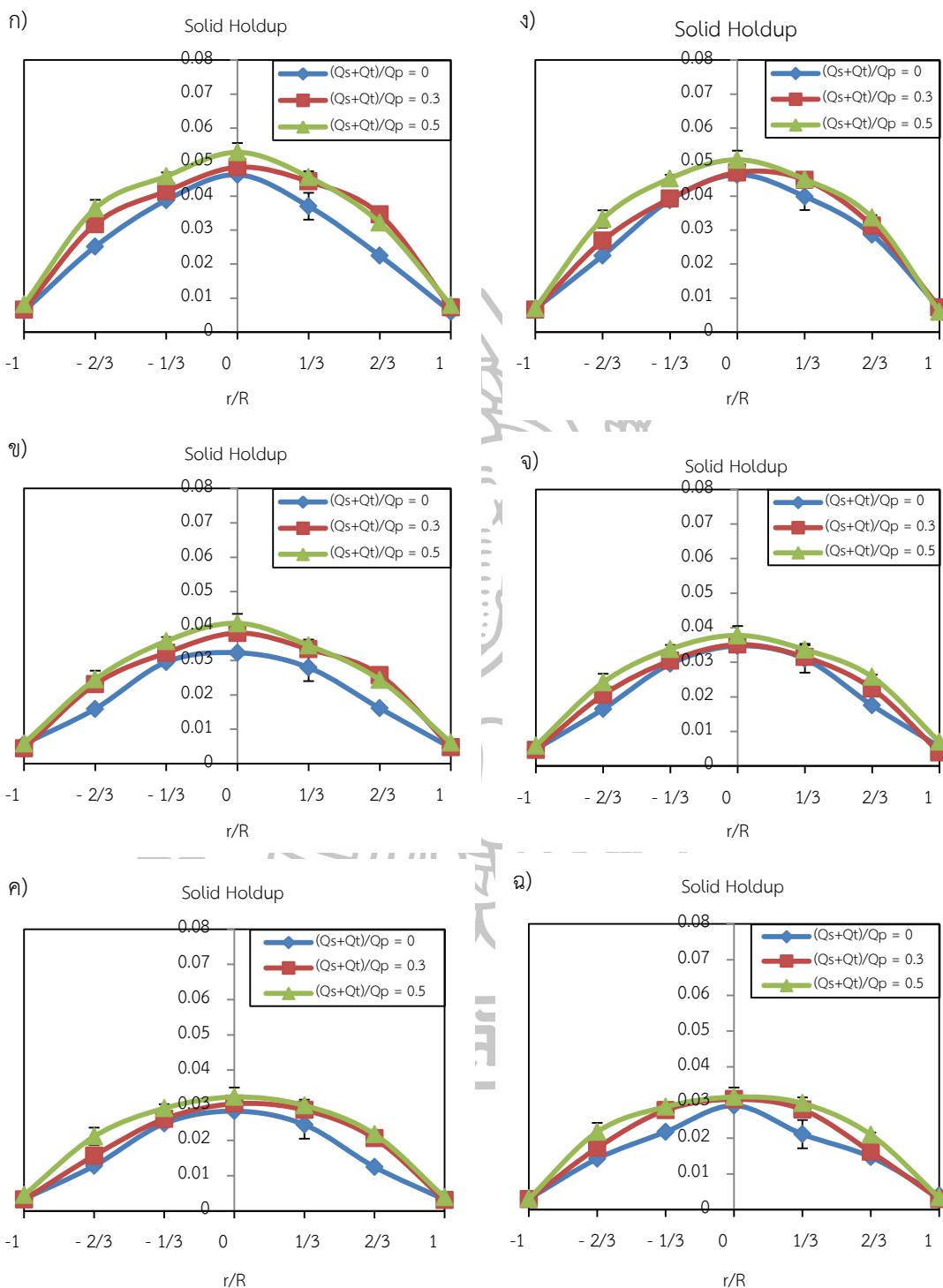
รูปที่ ข.3 0 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 710 - 1000 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 c m จ) 5 0 c m และ ฉ) 6 0 c m



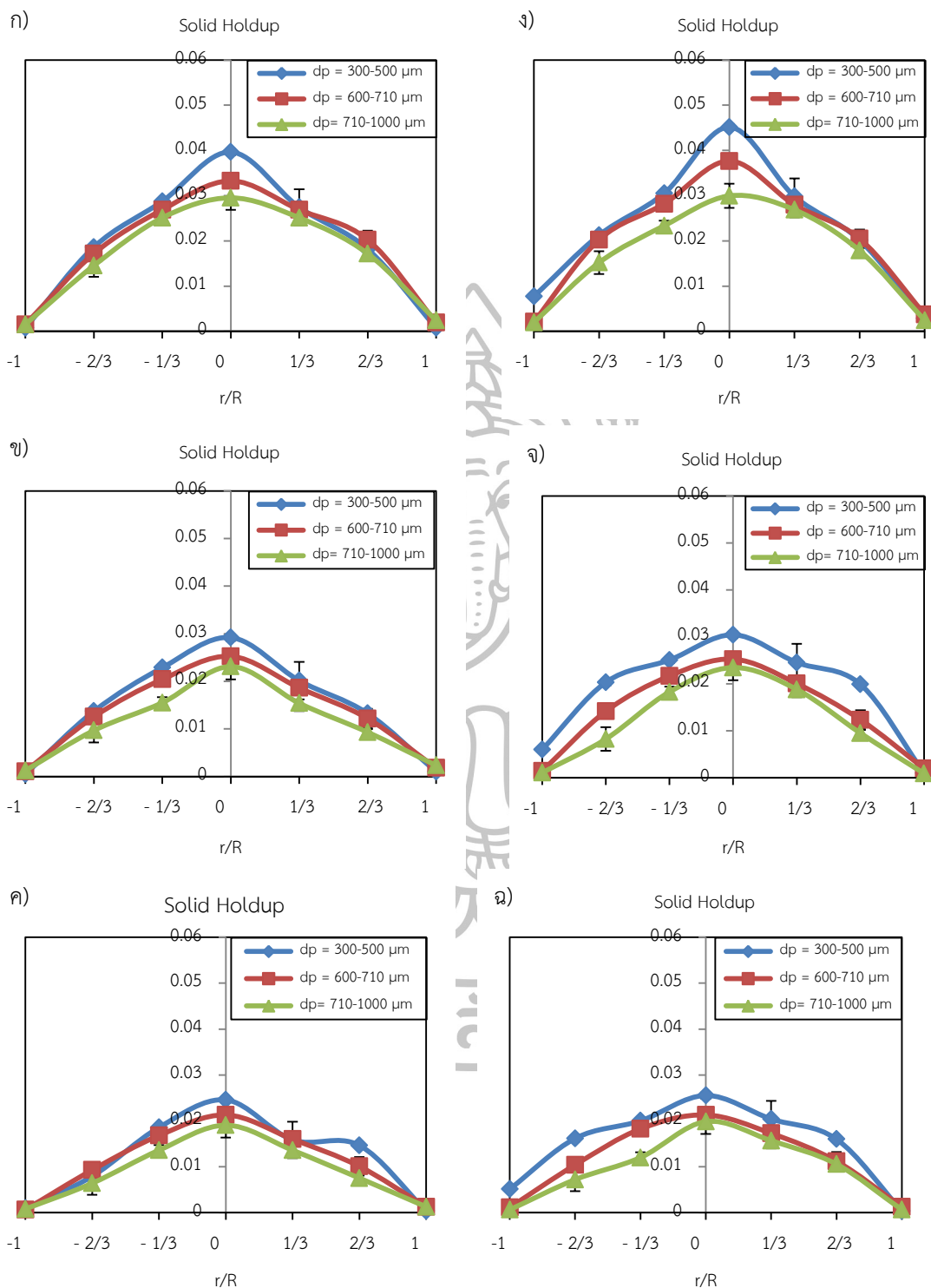
รูปที่ ข.31 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเขต 710–1000 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 c m จ) 5 0 c m และ ฉ) 6 0 c m



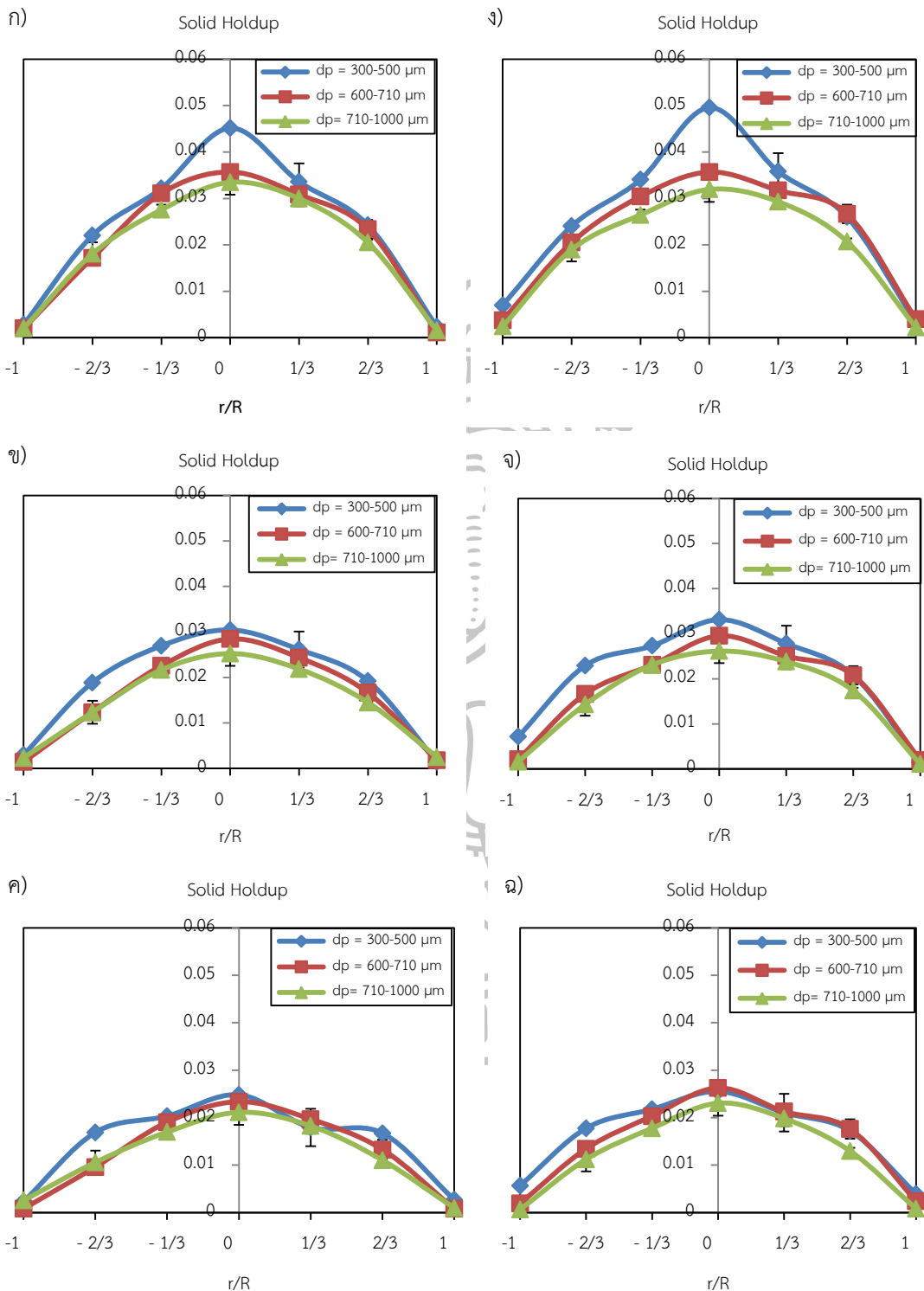
รูปที่ ข.32 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเบด 710–1000 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 c m จ) 5 0 c m และ ฉ) 6 0 c m



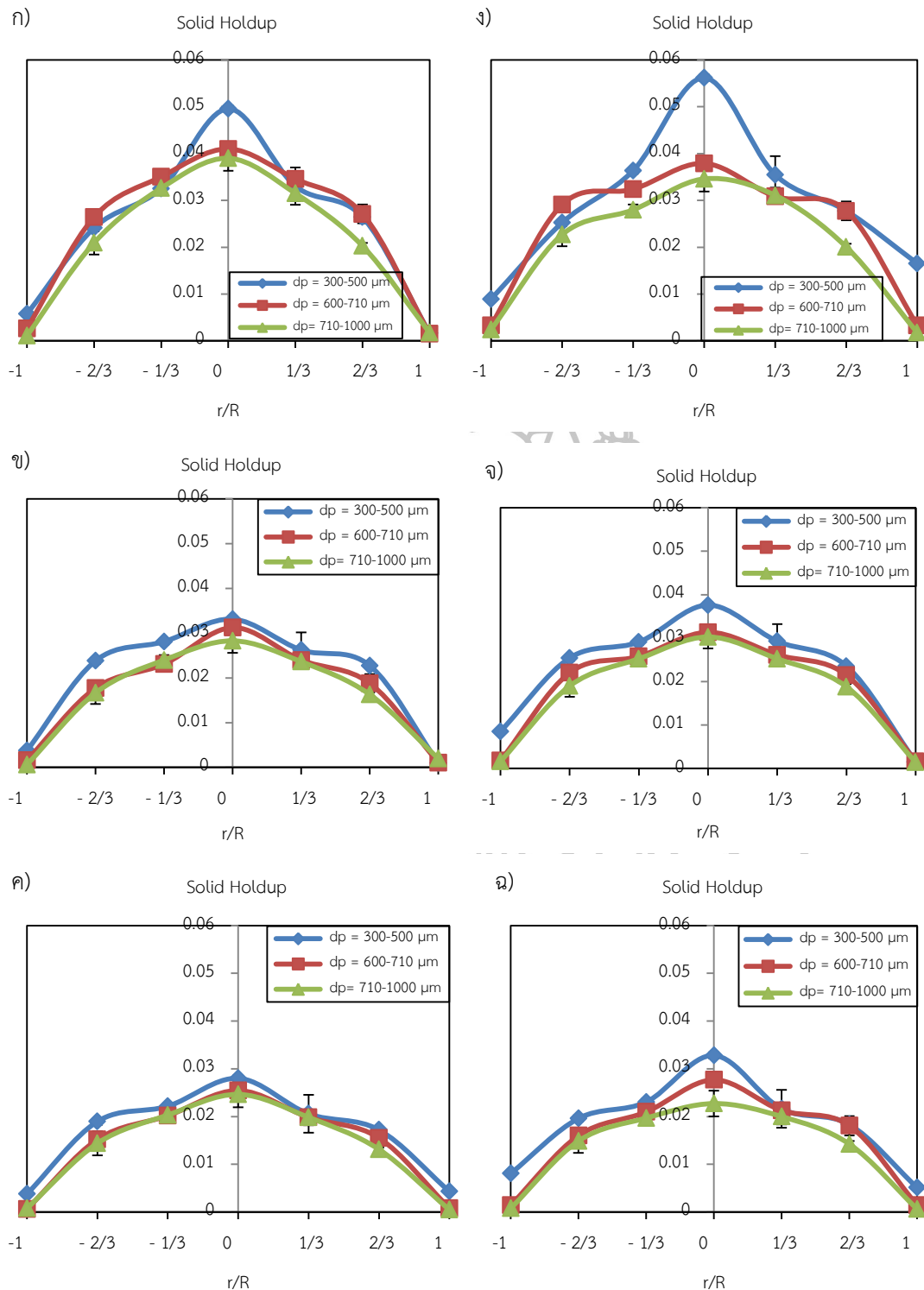
รูปที่ ข.33 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ระดับความสูงแตกต่างกันขนาดอนุภาคเขต 710-1000 μm ที่ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $3U_{mf}$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 c m จ) 5 0 c m และ ฉ) 6 0 c m



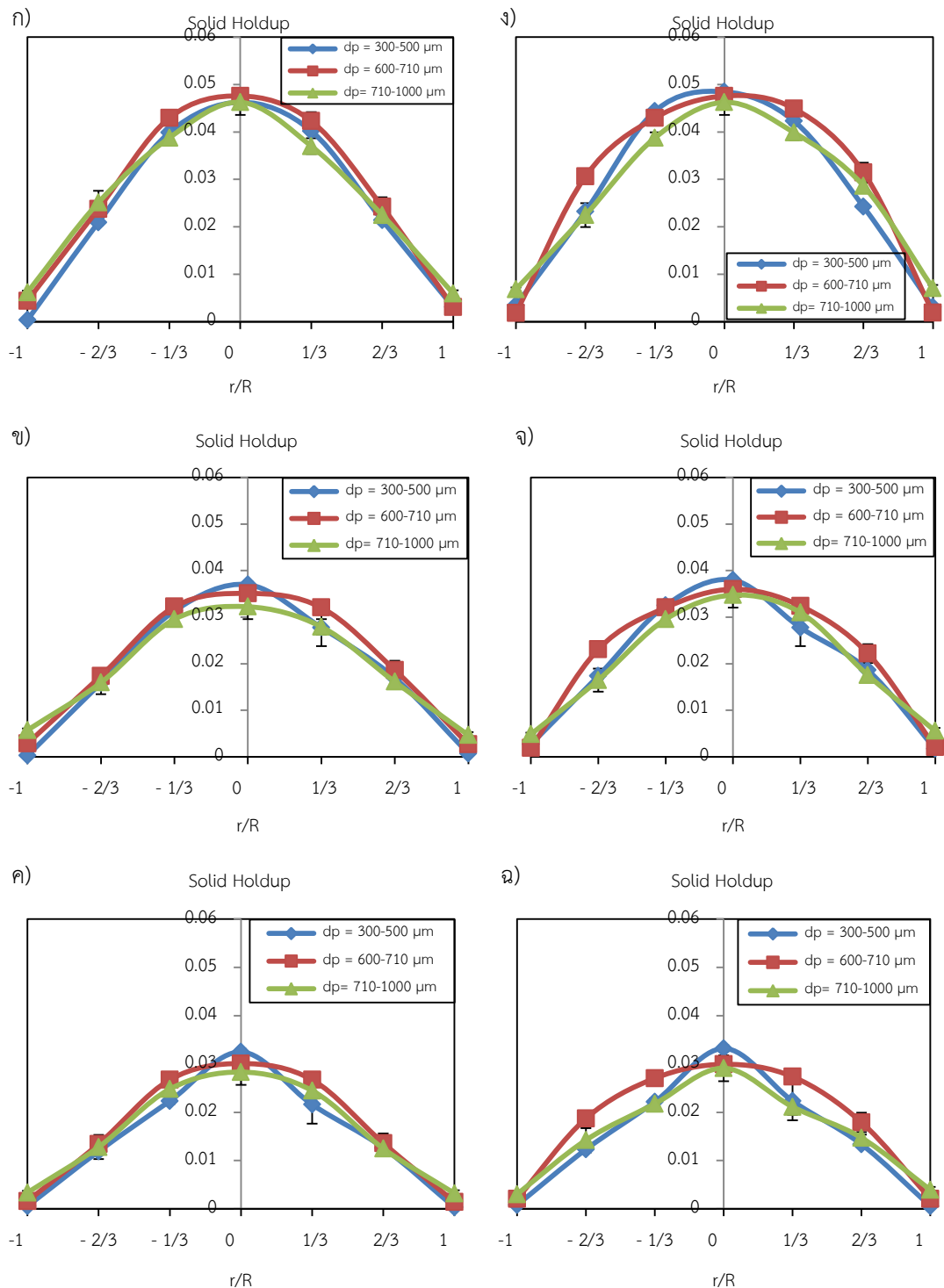
รูปที่ ข.34 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ความเร็วอากาศ ปริมาตร $2.5U_{mf}$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 c m จ) 5 0 c m และ ฉ) 6 0 c m



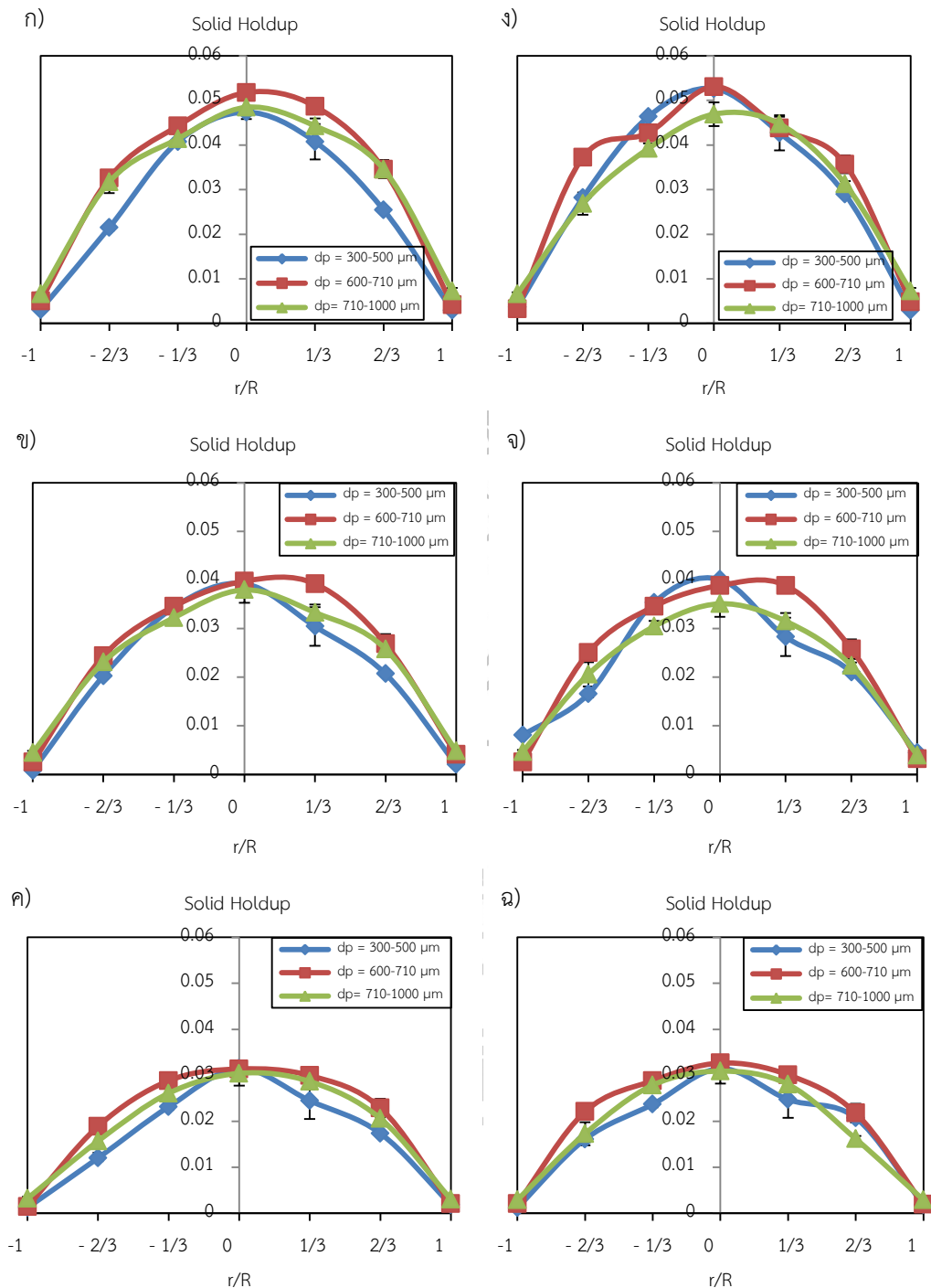
รูปที่ ข.35 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ความเร็วอากาศป้อน 2.5 U_{mf} ที่อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



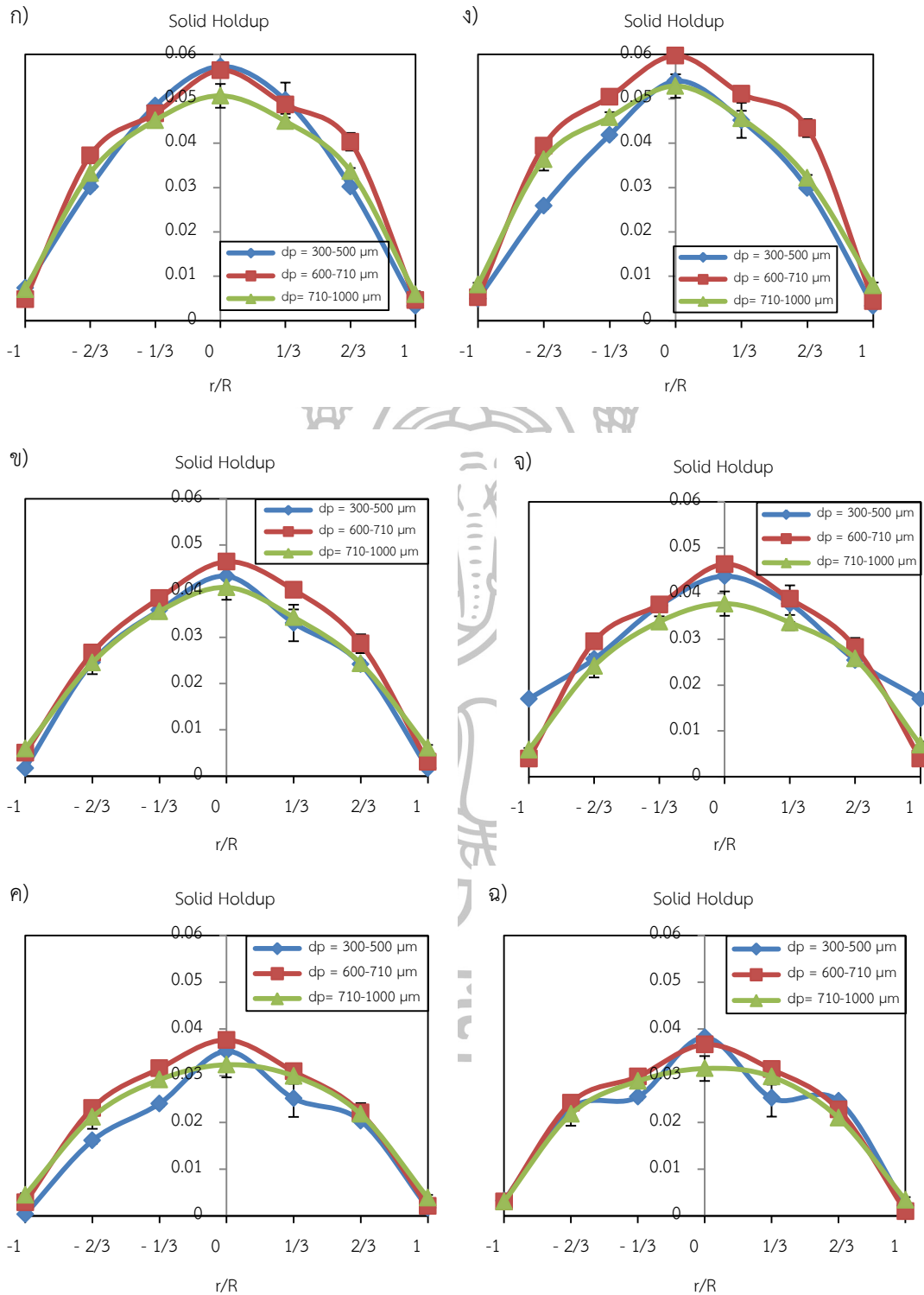
รูปที่ ข.36 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.5$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



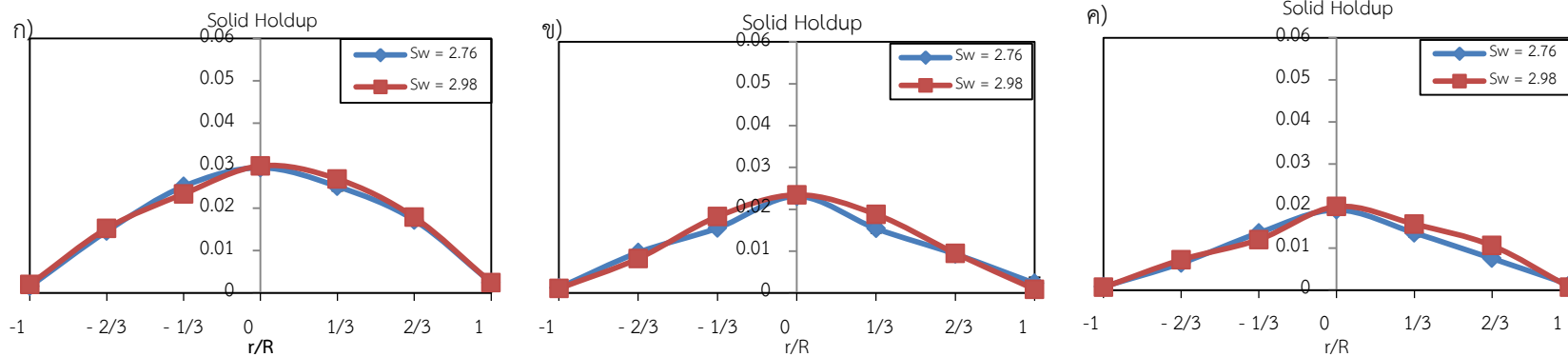
รูปที่ ข.37 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ความเร็วอากาศ ปริมาณ $3U_{mf}$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



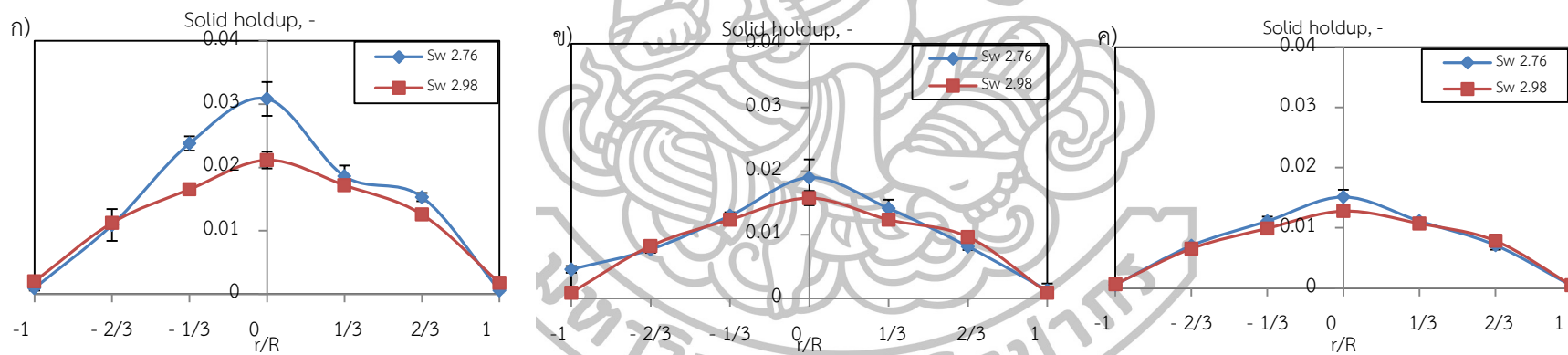
รูปที่ ข.38 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ความเร็วอากาศ ปริมาตร $3U_{mf}$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm เหนือหัวกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



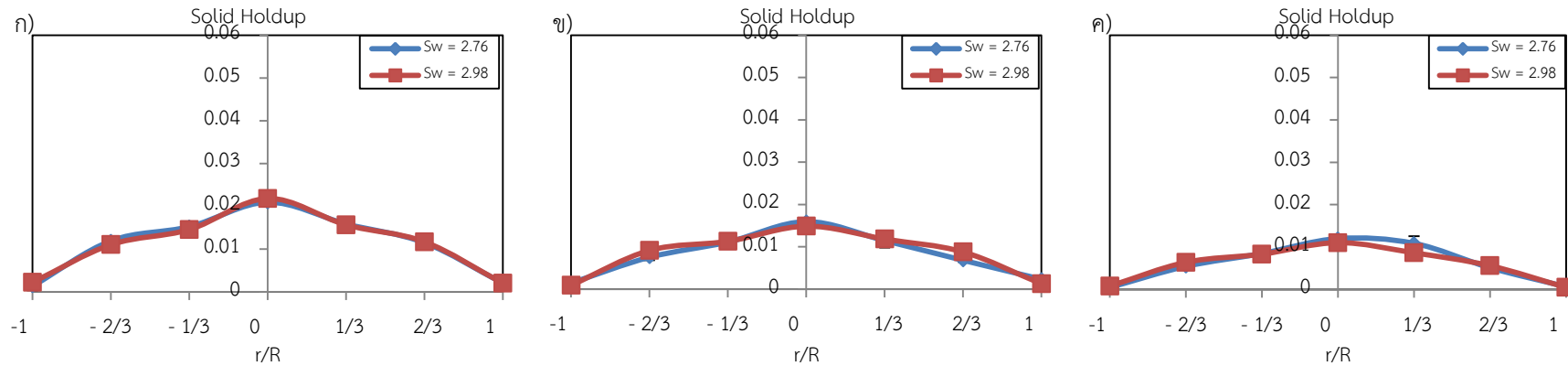
รูปที่ ข.39 กราฟค่าการยกตัวของอนุภาคในแนวรัศมีที่ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ความเร็วอากาศ
 ปริมาณ $3U_{mf}$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ สำหรับ $S_w = 2.76$ ระดับความสูงในการวัด ก) 40 cm
 ข) 50 cm ค) 60 cm เนื้อหั่วกระจายอากาศและที่ $S_w = 2.98$ ระดับความสูงในการวัด ง) 40 cm
 จ) 50 cm และ ฉ) 60 cm



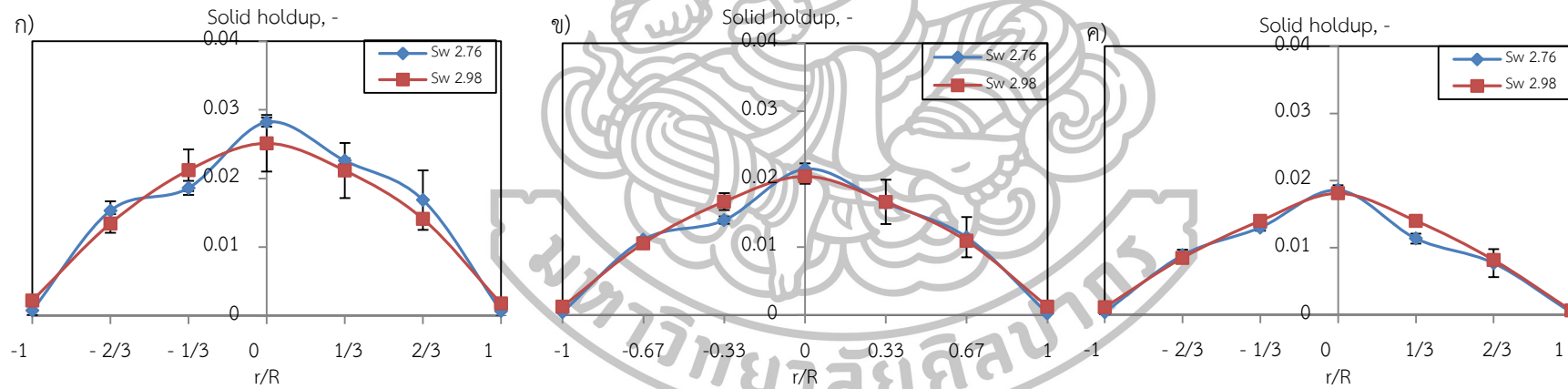
รูปที่ ข. 40 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$



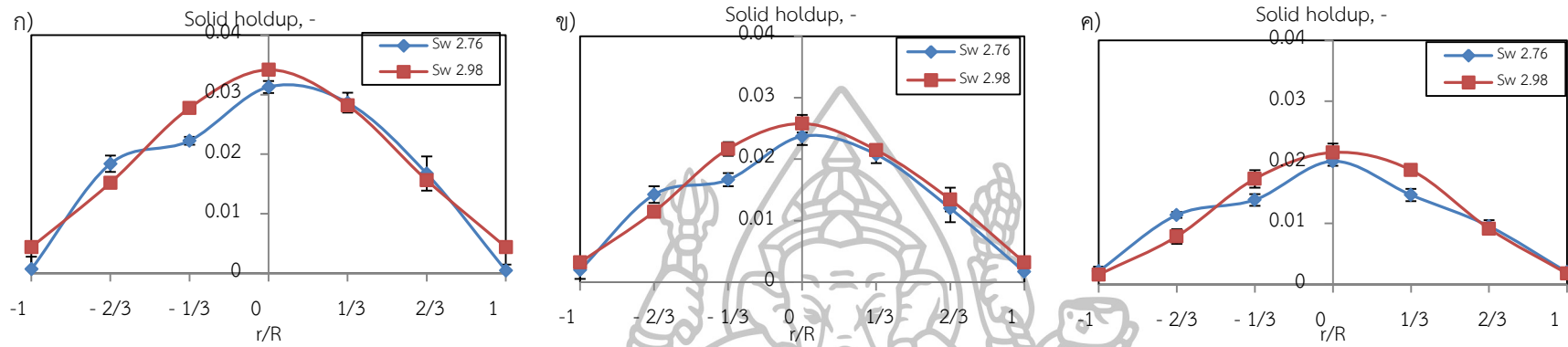
รูปที่ ข. 41 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$



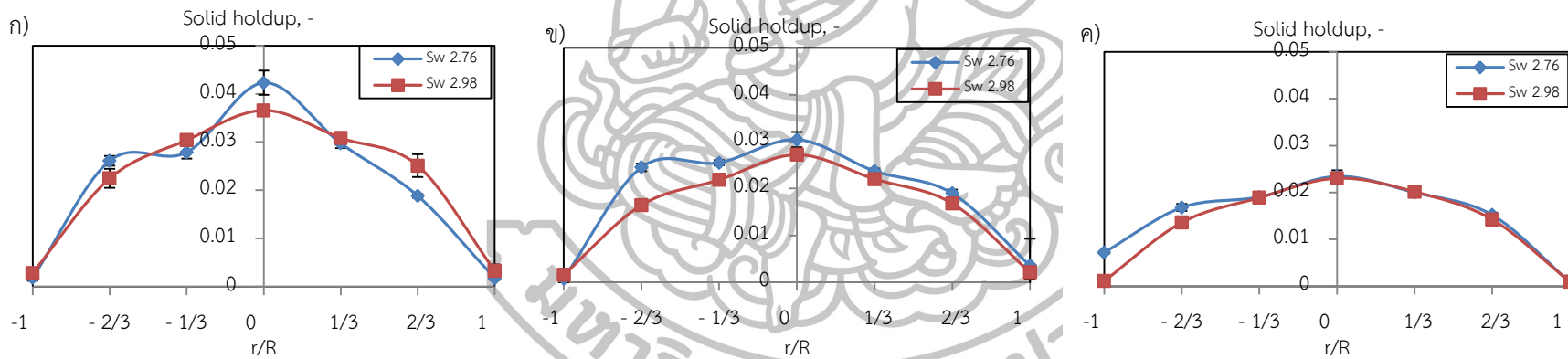
รูปที่ ข. 42 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$



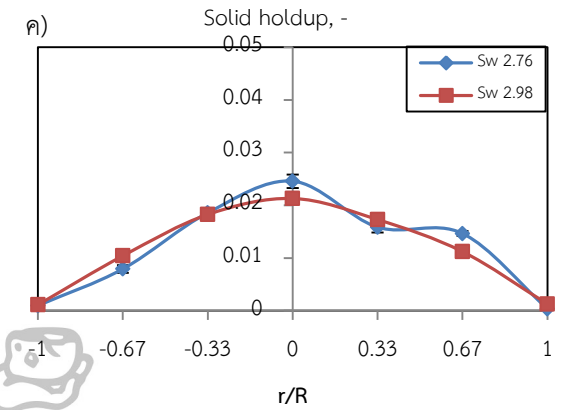
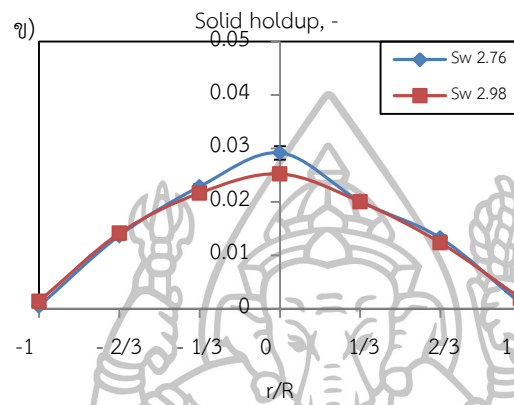
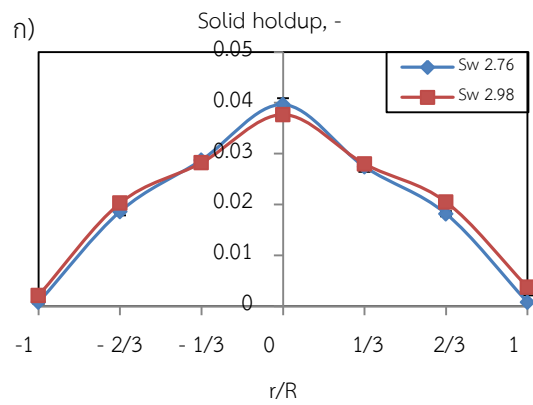
รูปที่ ข. 43 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$



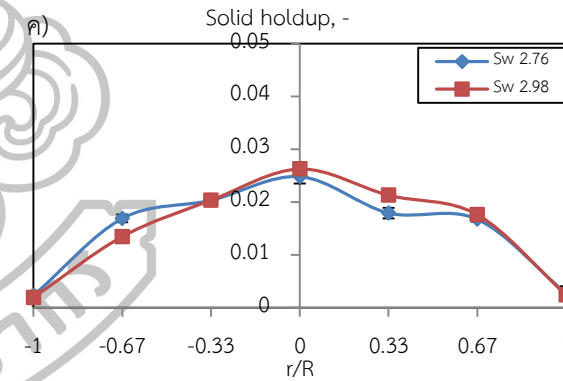
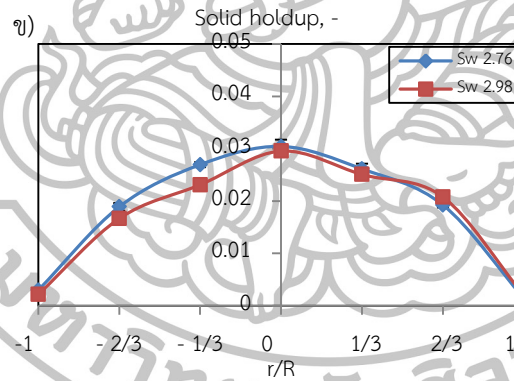
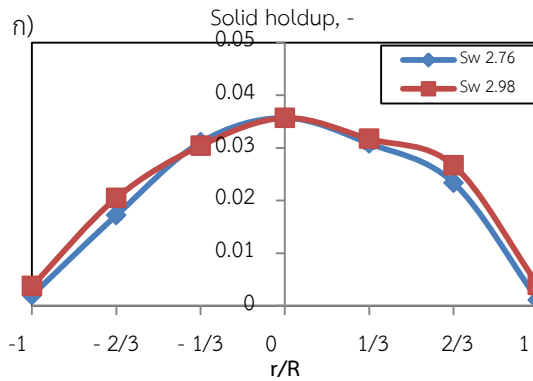
รูปที่ ข. 44 กราฟ $\varepsilon - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mi}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$



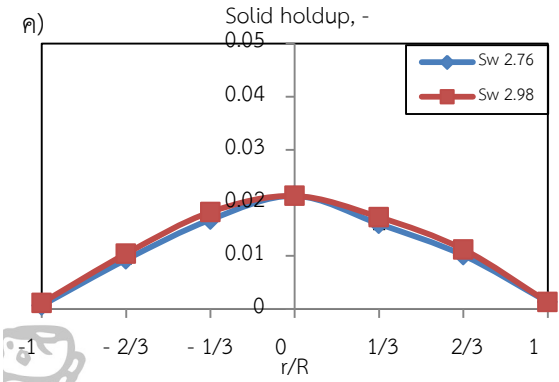
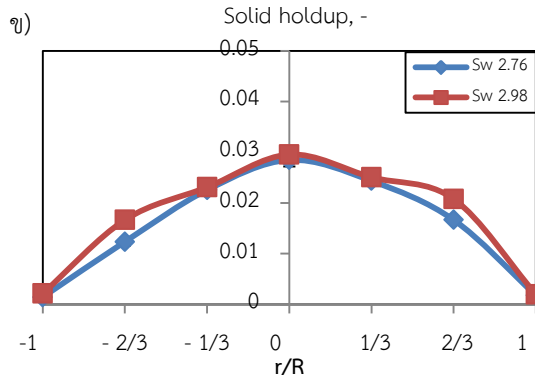
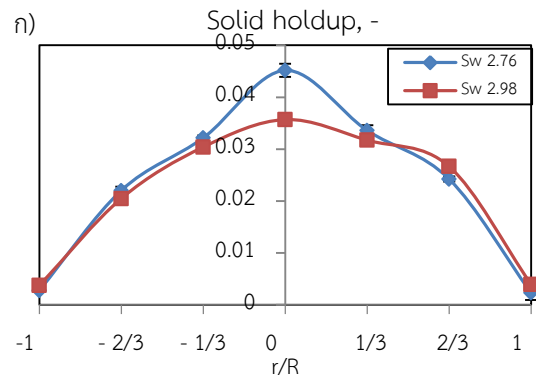
รูปที่ ข. 45 กราฟ $\varepsilon - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mi}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$



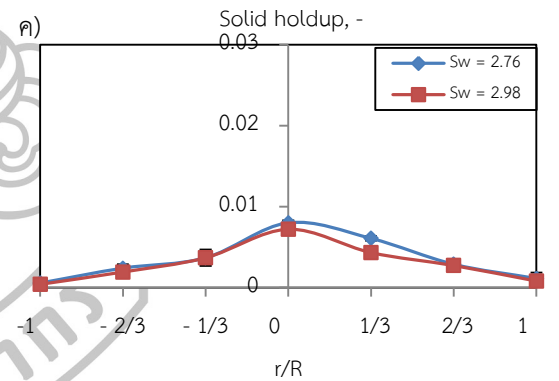
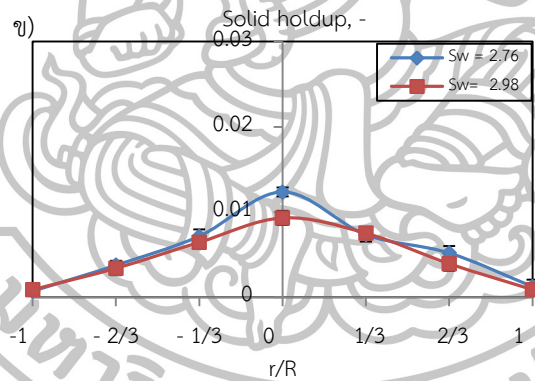
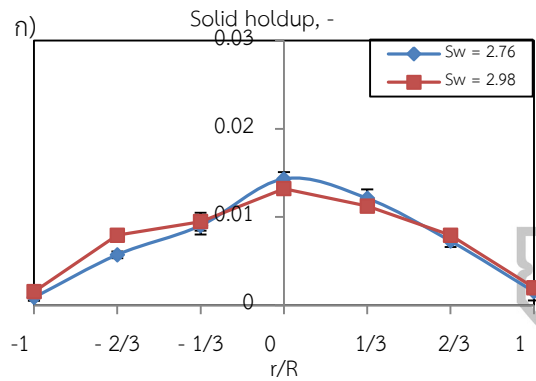
รูปที่ ข. 46 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$



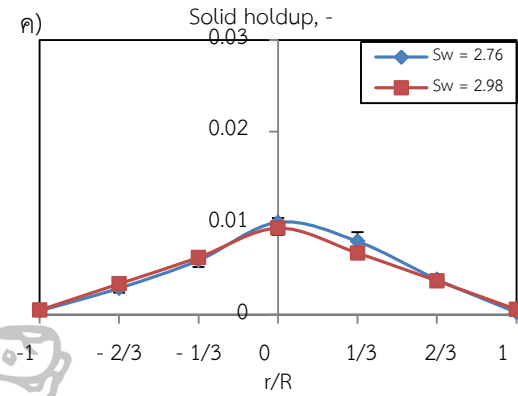
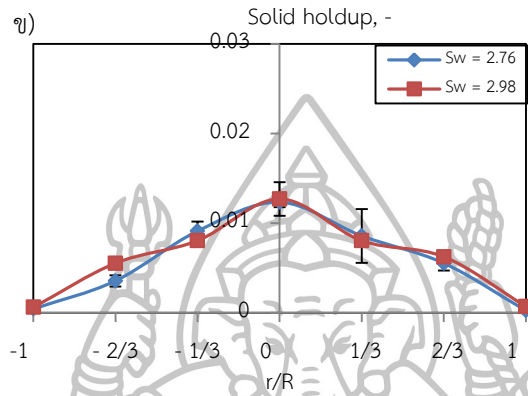
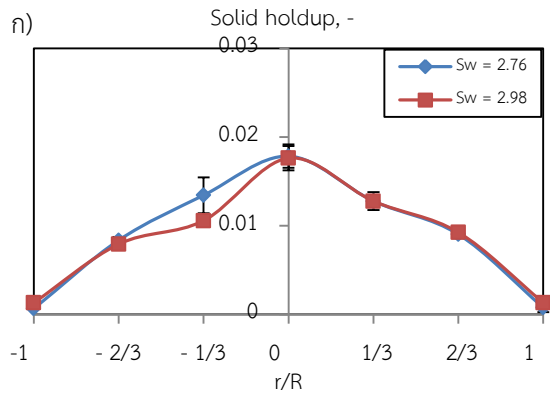
รูปที่ ข. 47 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$



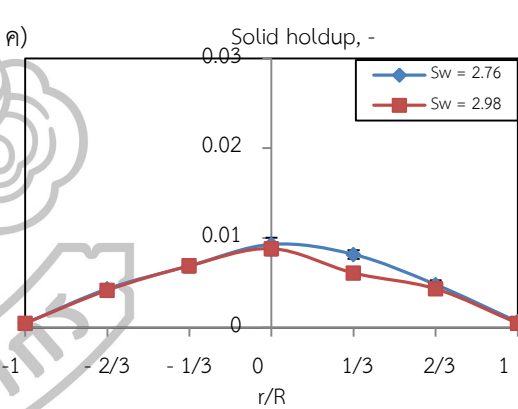
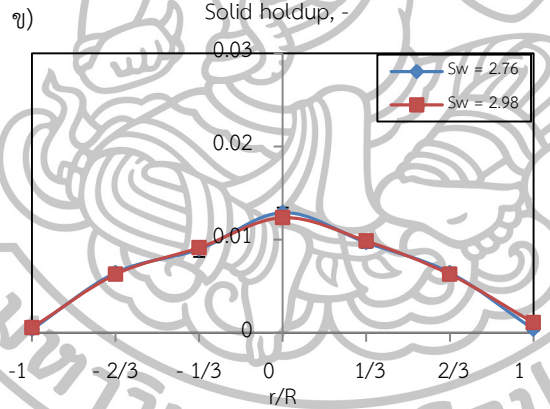
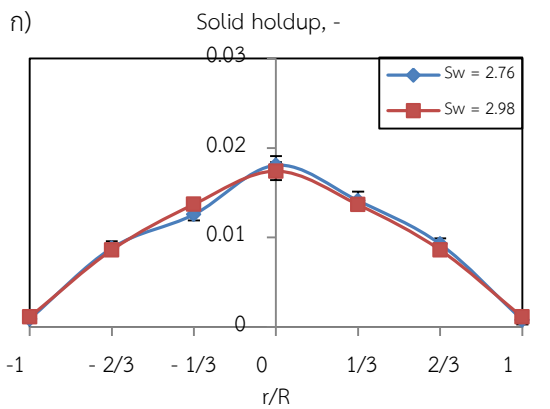
รูปที่ ข.48 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 300-500 \mu\text{m}$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$



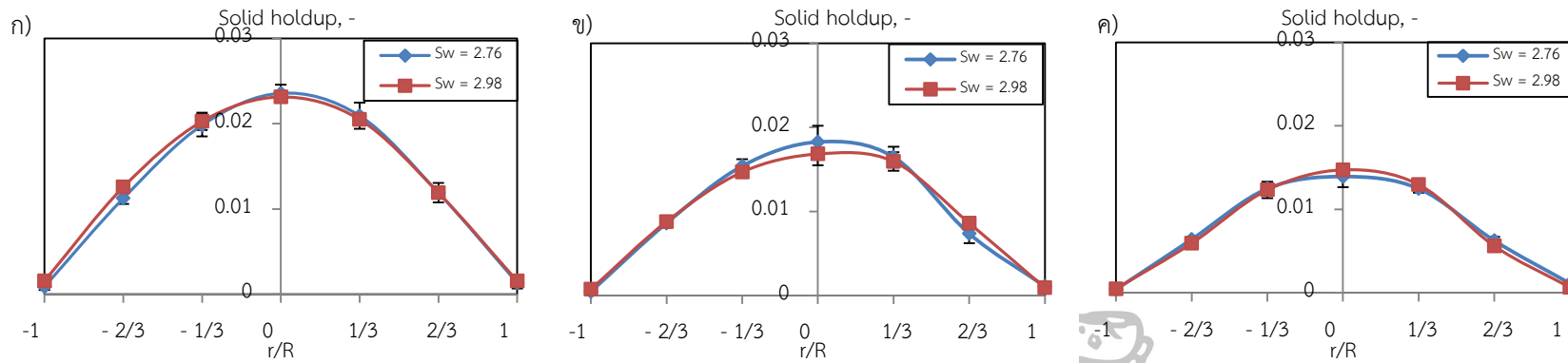
รูปที่ ข.49 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 600-710 \mu\text{m}$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$



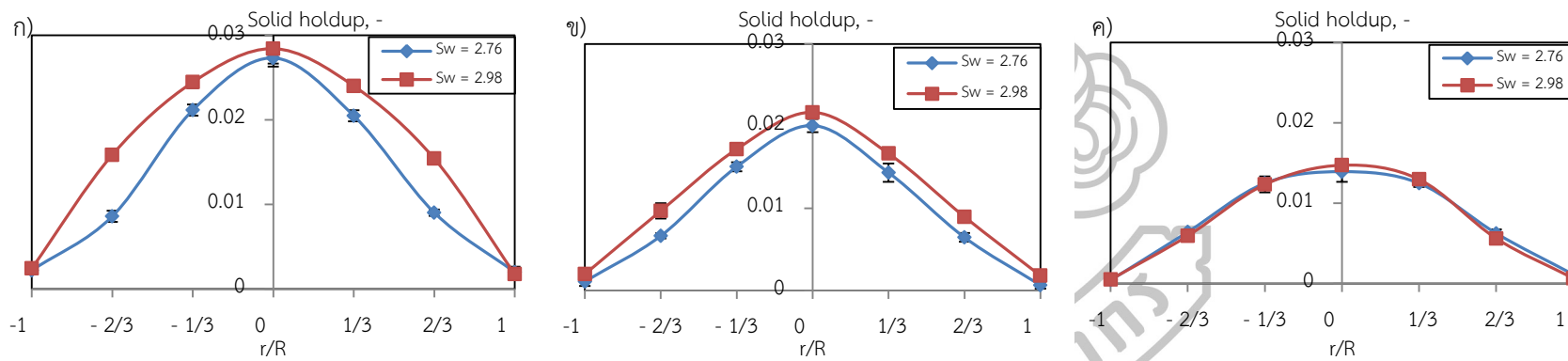
รูปที่ ข.50 กราฟ $\varepsilon - s_w$ ณ ความเร็วอากาศป้อนลม 1.5 u_{nr} สำหรับ $d_p = 600-710 \mu m$ ที่ z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_r)/Q_p] = 0.5$



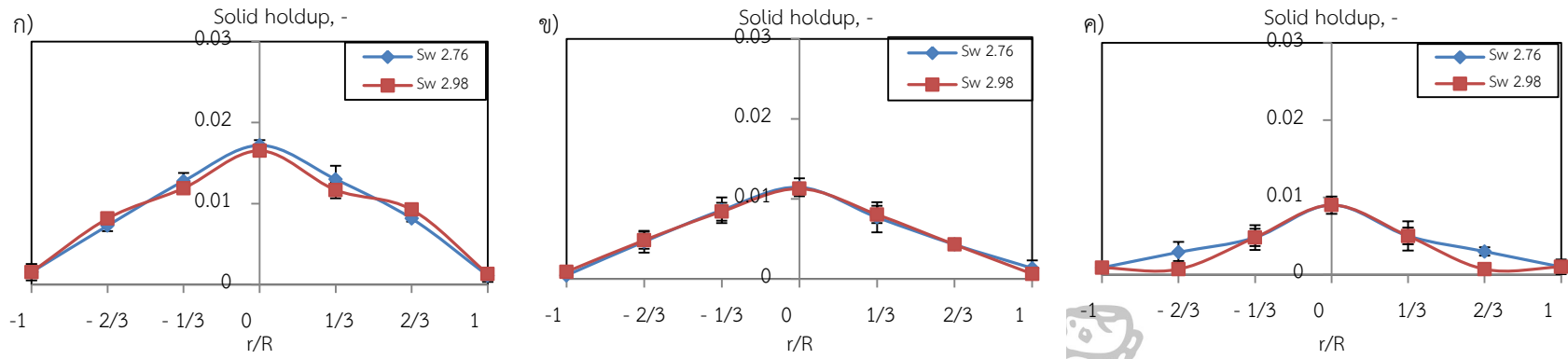
รูปที่ ข.51 กราฟ $\varepsilon - s_w$ ณ ความเร็วอากาศป้อนลม 2 u_{nr} สำหรับ $d_p = 600-710 \mu m$ ที่ z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_r)/Q_p] = 0$



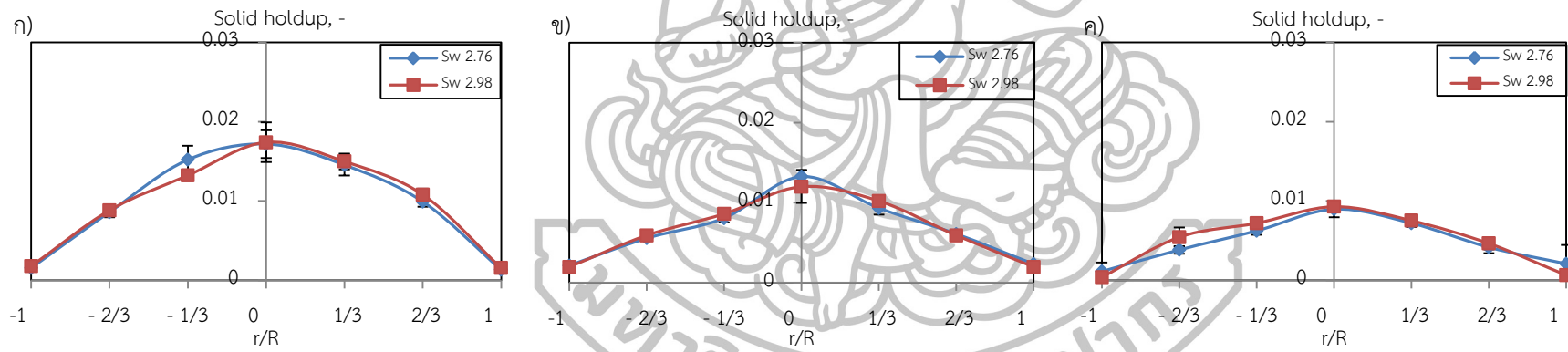
รูปที่ ข. 52 กราฟ $\epsilon - s_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 600-710 \mu m$ ที่ z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_r)/Q_p] = 0.3$



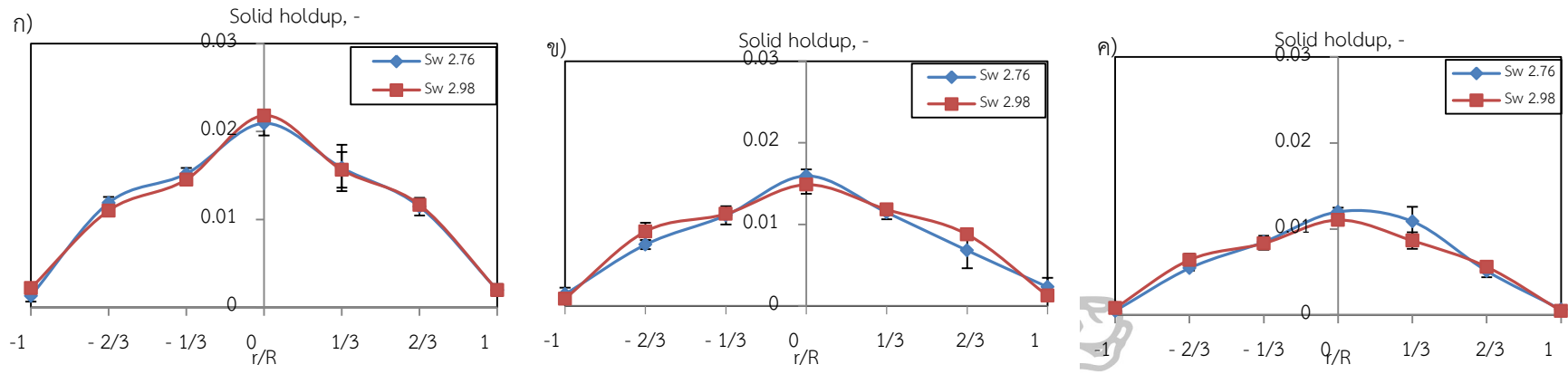
รูปที่ ข. 53 กราฟ $\epsilon - s_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 600-710 \mu m$ ที่ z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_r)/Q_p] = 0.5$



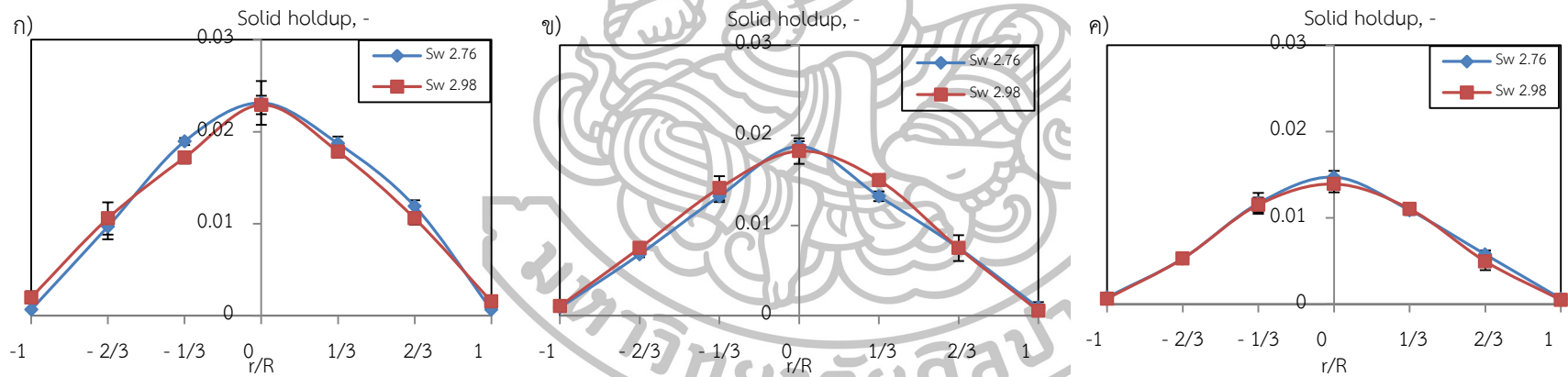
รูปที่ ข.54 กราฟ $\varepsilon - s_w$ ณ ความเร็วอากาศป้อนมุมมี $1.5u_{cr}$ สำหรับ $d_p = 710-1000 \mu m$ ที่ z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_r)/Q_p] = 0$



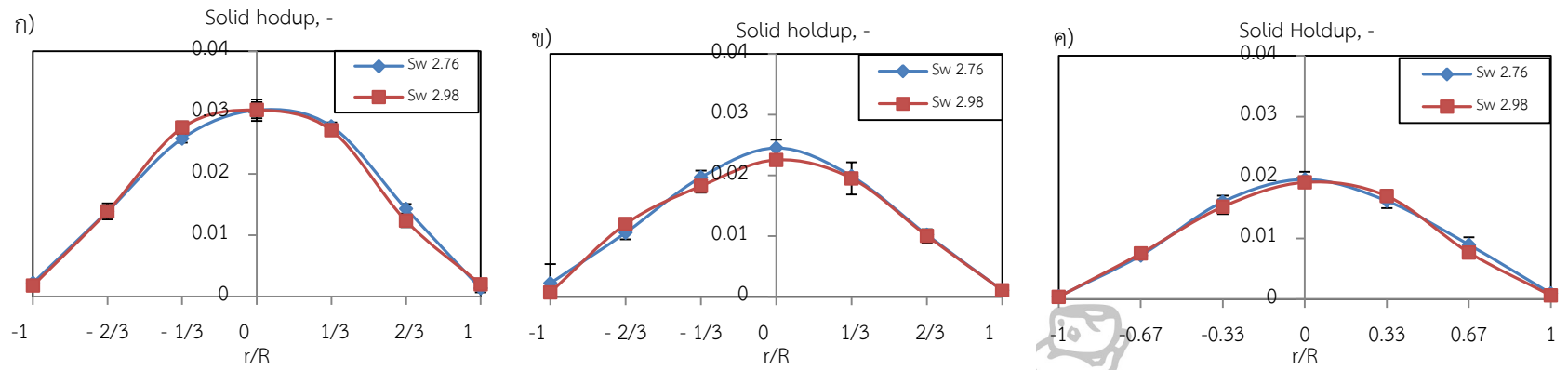
รูปที่ ข.55 กราฟ $\varepsilon - s_w$ ณ ความเร็วอากาศป้อนมุมมี $1.5u_{cr}$ สำหรับ $d_p = 710-1000 \mu m$ ที่ z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_r)/Q_p] = 0.3$



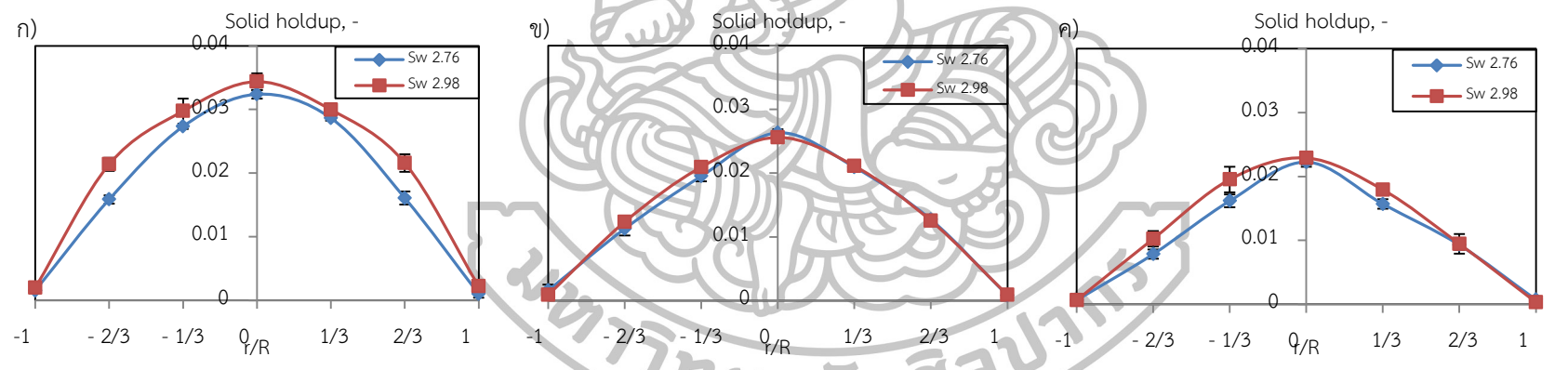
รูปที่ ข.56 กราฟ $\epsilon - s_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $1.5u_{inf}$ สำหรับ $d_p = 710-1000 \mu m$ ที่ z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$



รูปที่ ข.57 กราฟ $\epsilon - s_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2u_{inf}$ สำหรับ $d_p = 710-1000 \mu m$ ที่ z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$

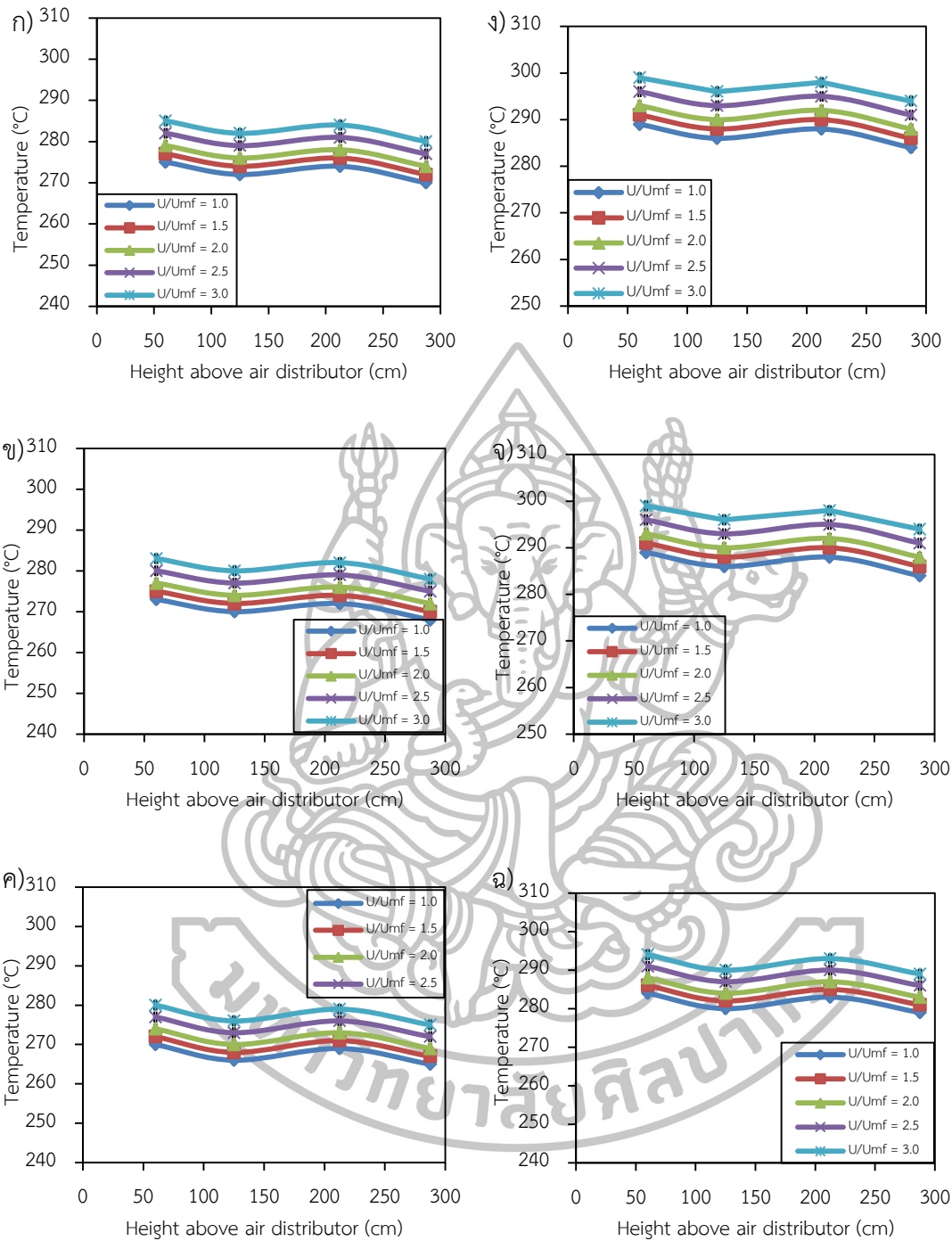


รูปที่ ข.58 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 710-1000 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$

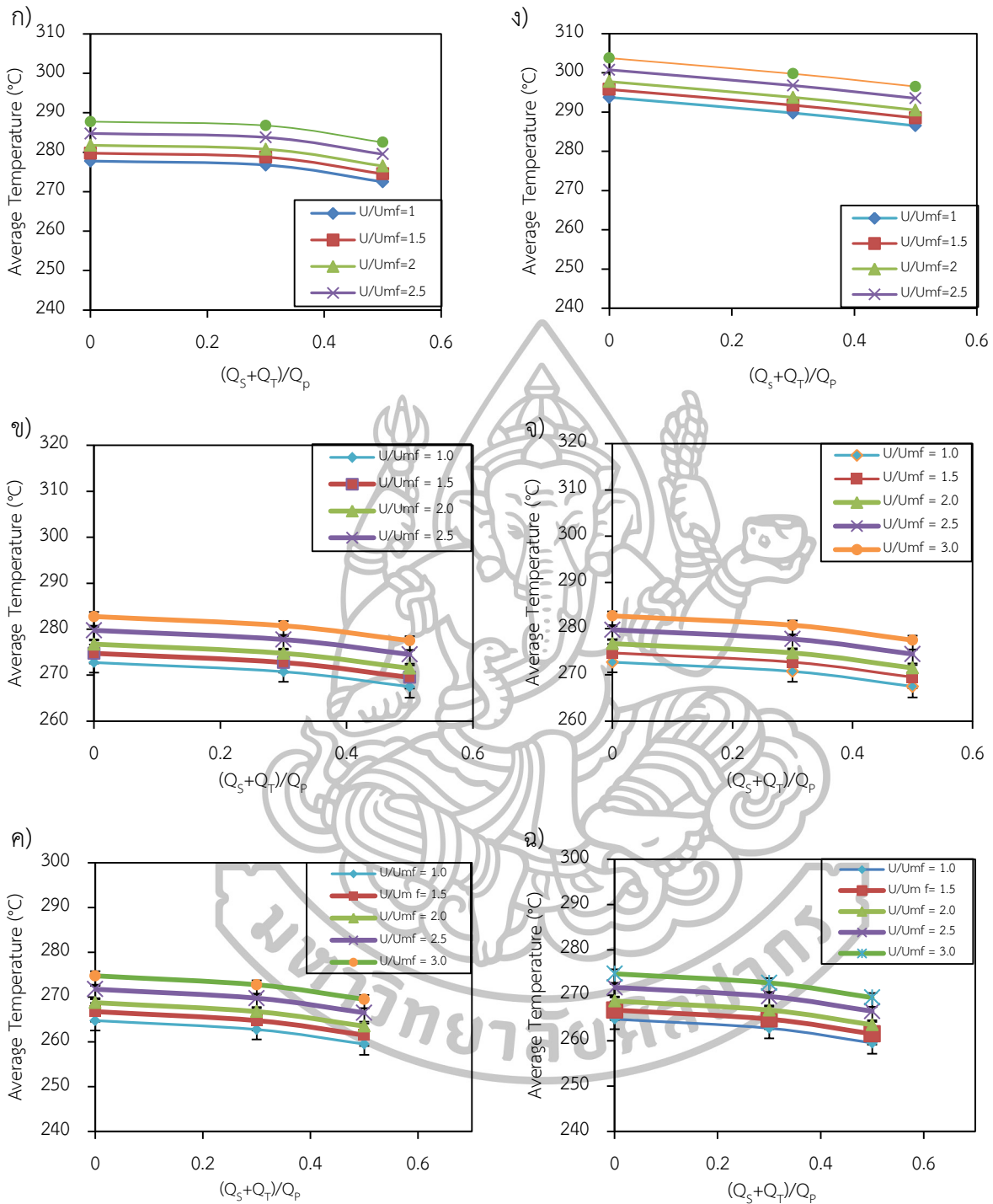


รูปที่ ข.59 กราฟ $\mathcal{E} - S_w$ ณ ความเร็วอากาศปฐมภูมิ $2U_{mf}$ สำหรับ $d_p = 710-1000 \mu m$ ที่ Z เท่ากับ ก) 40 cm ข) 50 cm และ ค) 60 cm สำหรับ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$

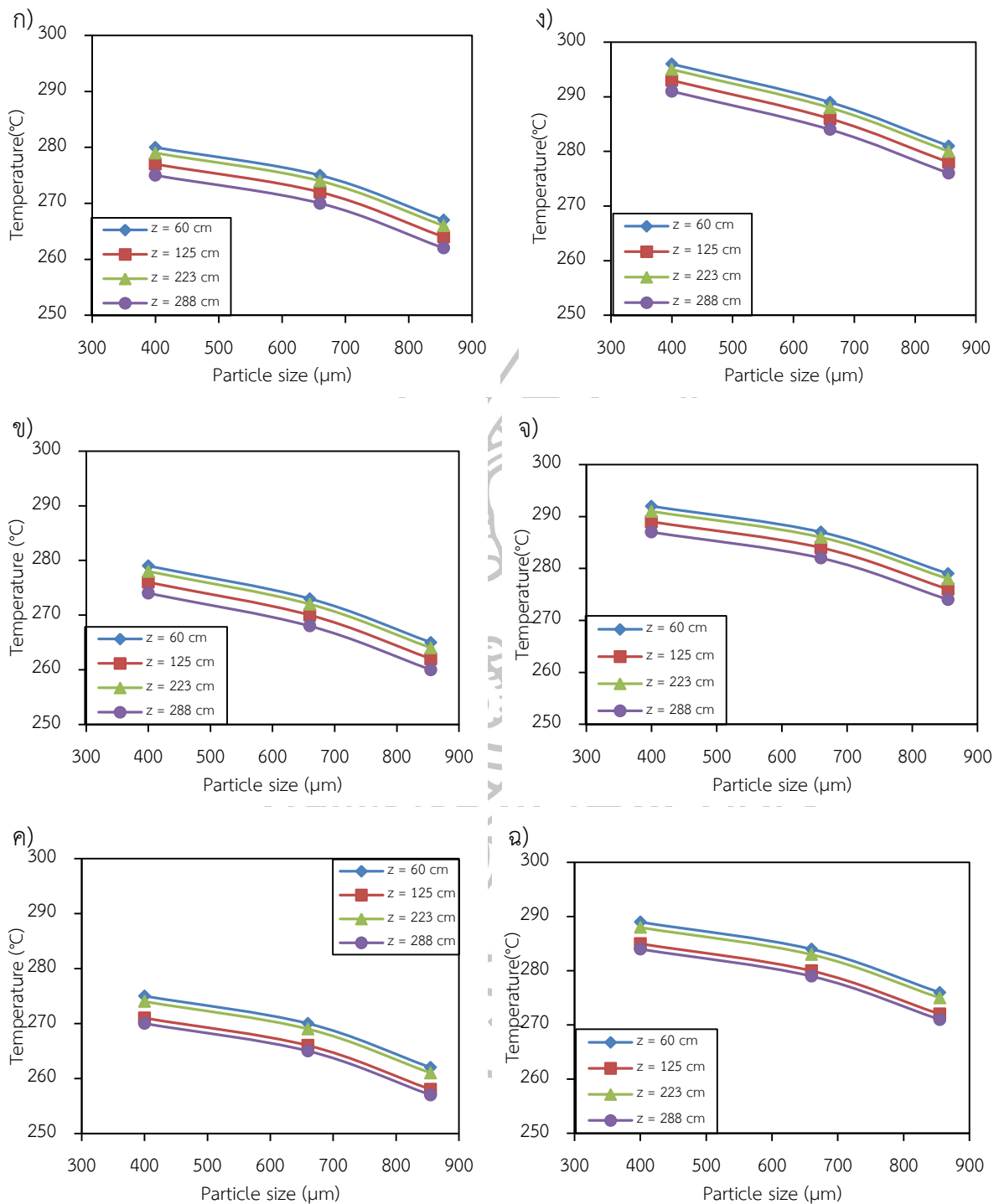




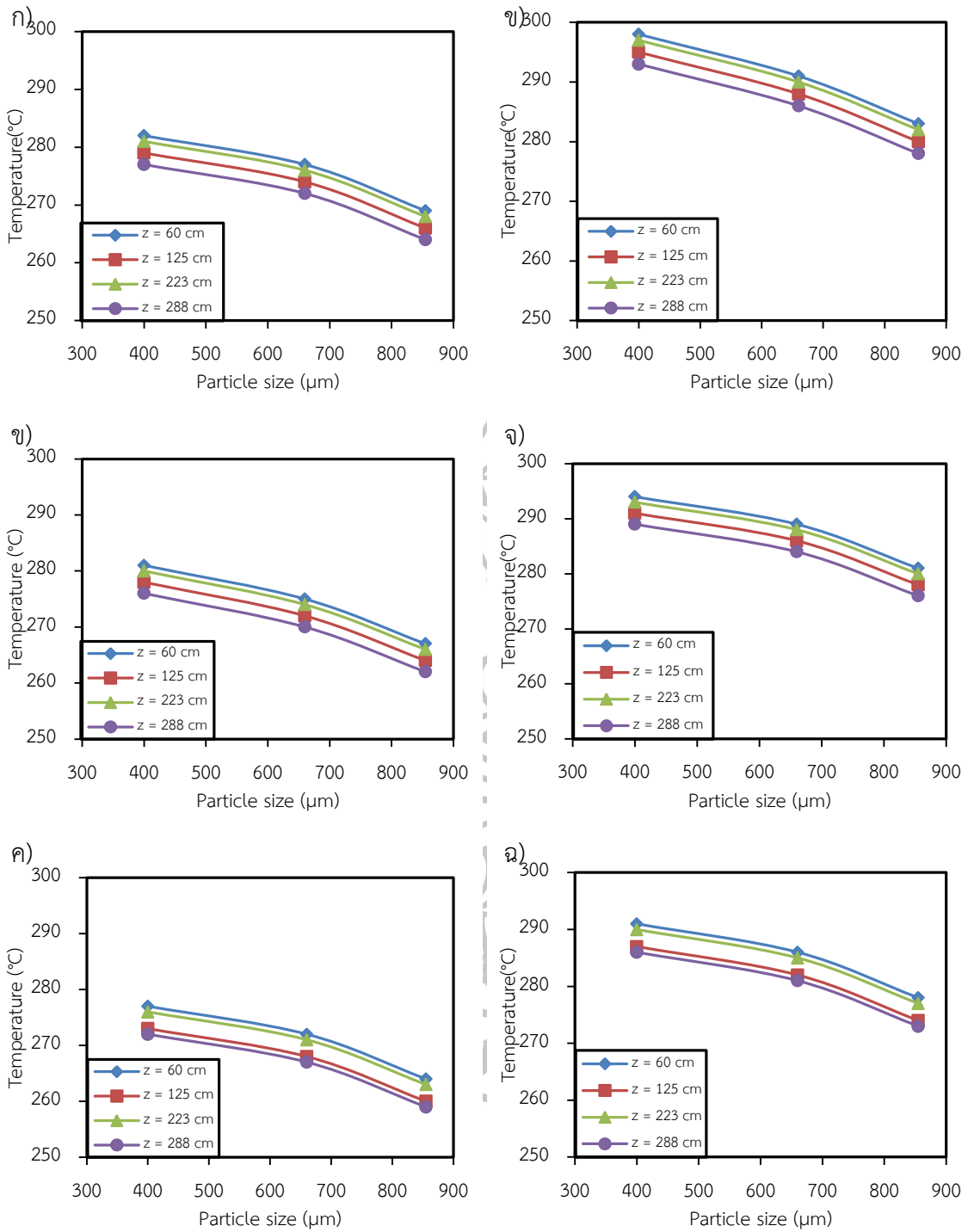
รูปที่ ค.1 กราฟแสดงผลตำแหน่งความสูงโดยวัดจากระบบป้อนอากาศต่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ตำแหน่งความสูง การวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยความเร็วอากาศปฐุมุมุมิ $U_{mf} - 3U_{mf}$ สำหรับอนุภาคขนาด 710-1000 μm สำหรับ $S_w = 2.76$ โดยสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิตติยภูมิต่ออากาศปฐุมุมุมิ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และค) 0.5 และ $S_w = 2.98$ ที่ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0



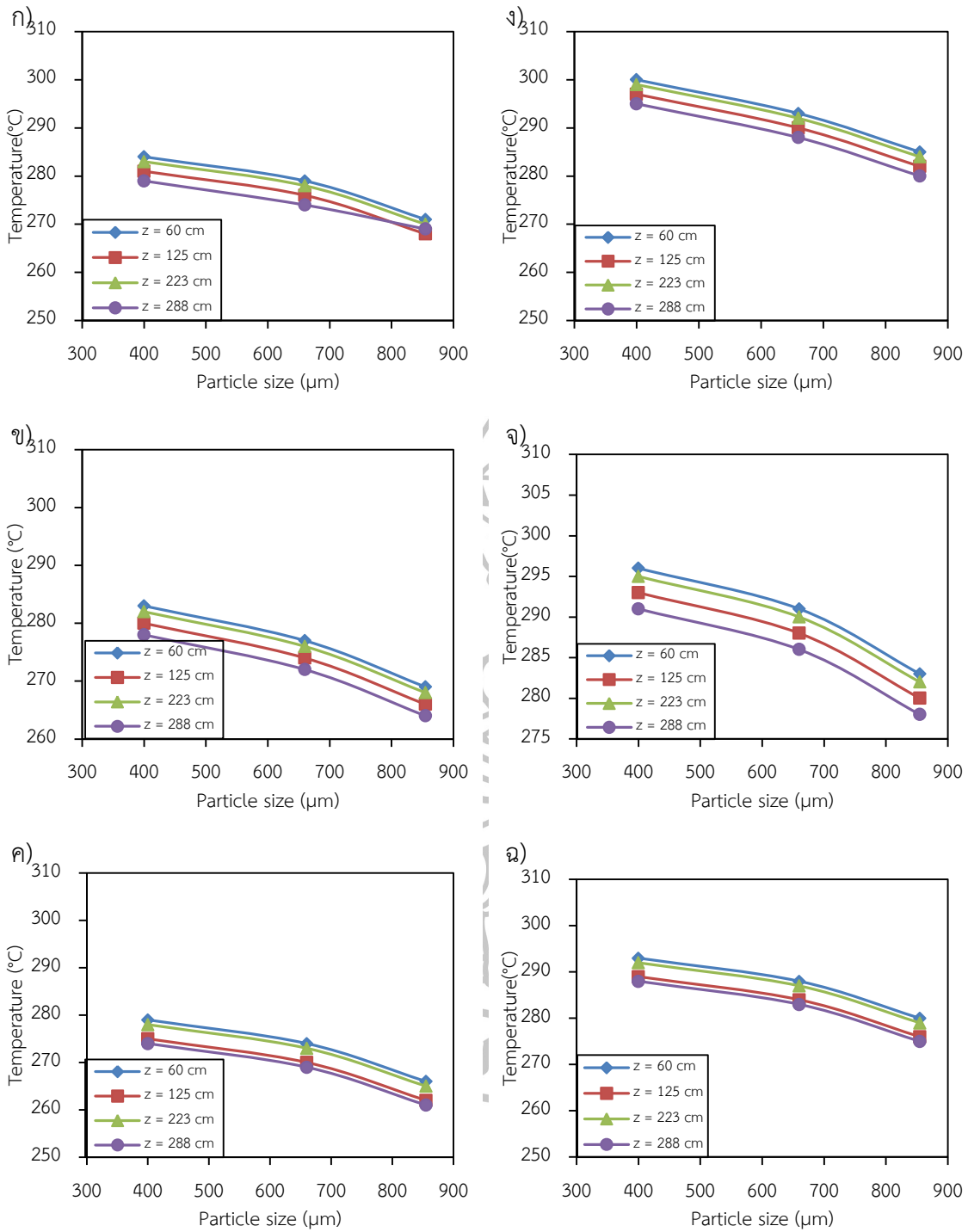
รูปที่ ค.2 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยตลอดทั้งเตา ณ ความเร็วปฐมภูมิต่างๆ S_w เท่ากับ 2.76 โดย $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0, 0.3$ และ 0.5 สำหรับ U_{mf} , - $3U_{mf}$ สำหรับอนุภาคขนาด ก) 300–500 μm ข) 600–710 μm ค) 710–1,000 และ สำหรับ S_w เท่ากับ 2.98 สำหรับอนุภาคขนาด ง) 300–500 μm จ) 600–710 μm และ ฉ) 710–1,000 μm



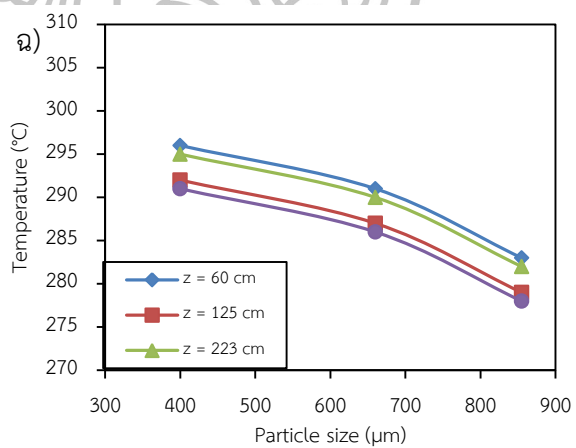
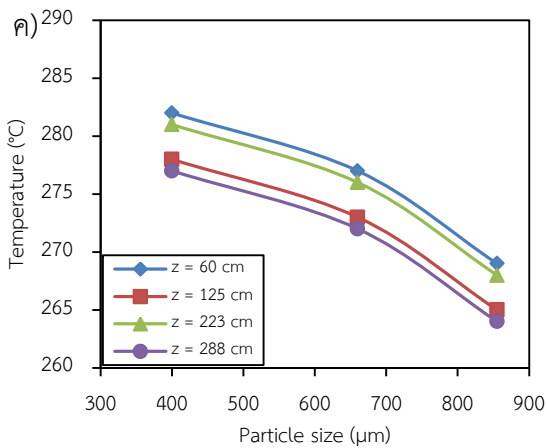
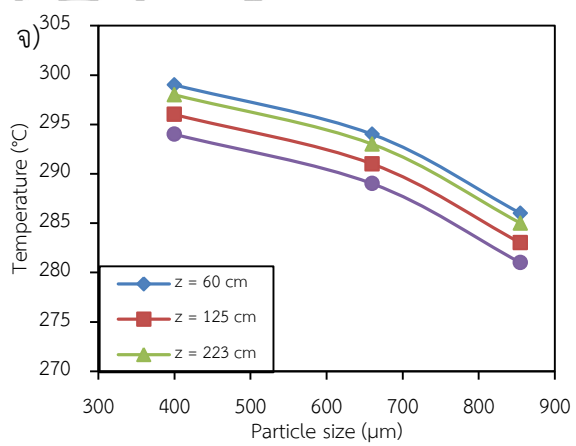
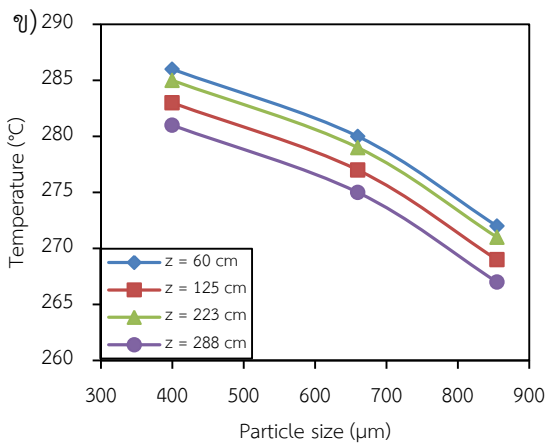
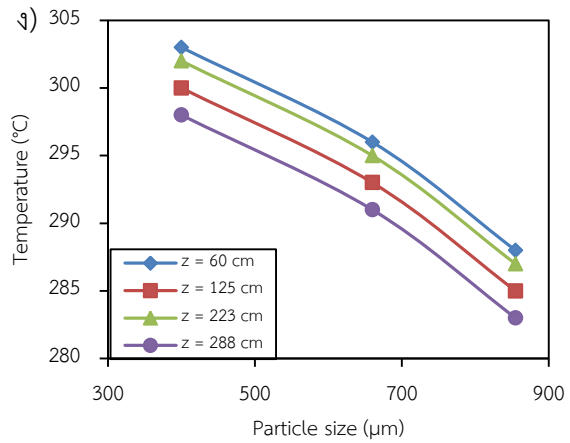
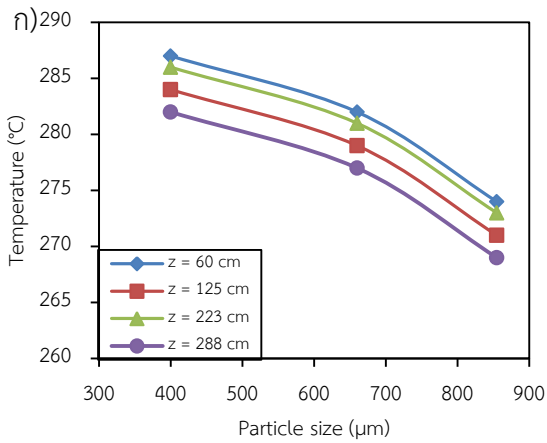
รูปที่ ค.3 กราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคมีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยภายในเตา สำหรับความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $1U_{mf}$ โดย $[(Q_S+Q_T)/Q_P]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.76 และ $[(Q_S+Q_T)/Q_P]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.98



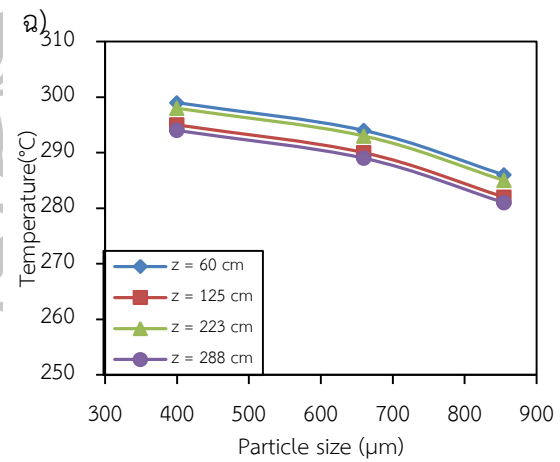
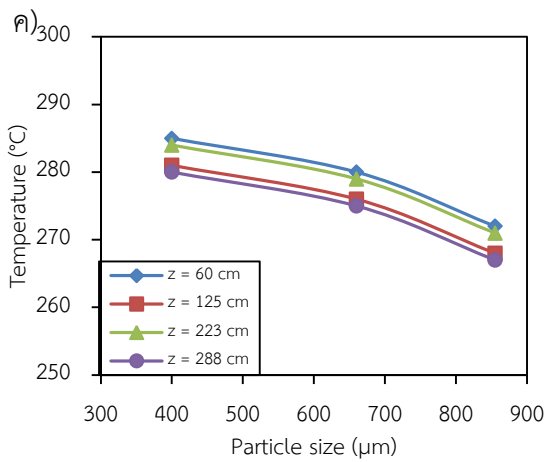
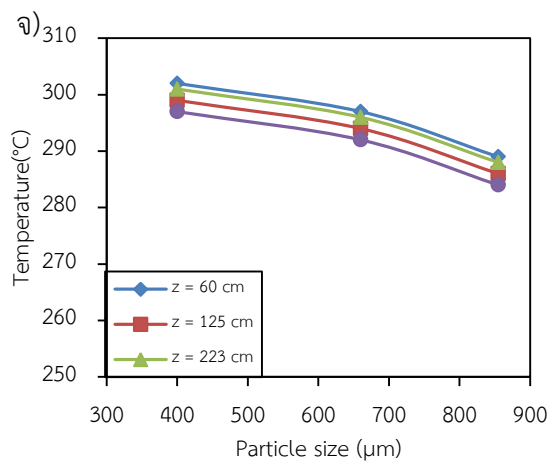
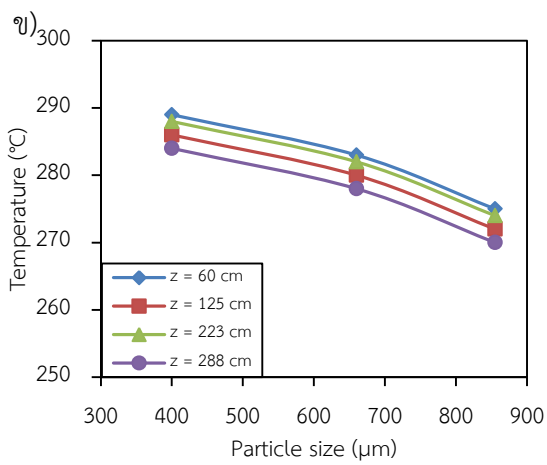
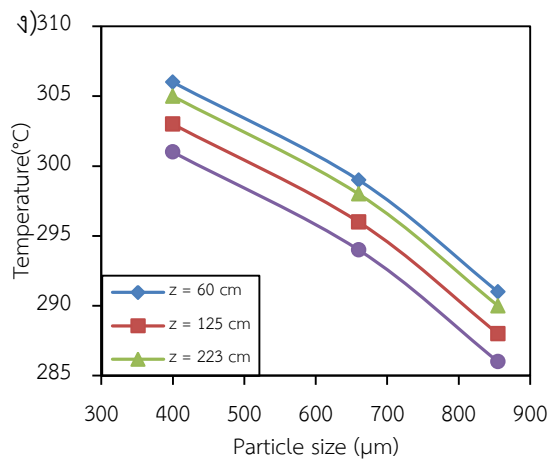
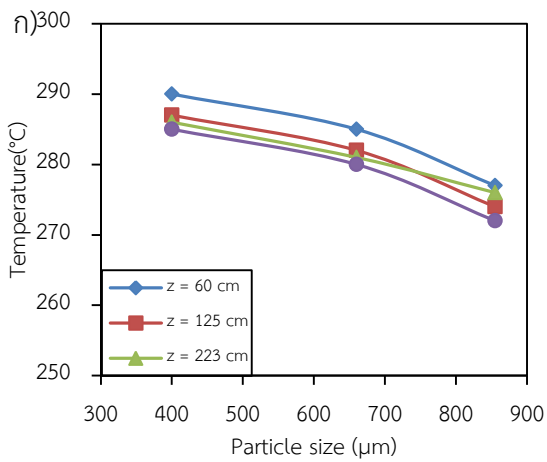
รูปที่ ค.4 กราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคมีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยภายในเตา สำหรับความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $1.5U_{mf}$ โดย $[(Q_S+Q_T)/Q_P]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.76 และ $[(Q_S+Q_T)/Q_P]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.98



รูปที่ ค.5 กราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคมีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยภายในเตา สำหรับความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $2U_{mf}$ โดย $[(Q_S+Q_T)/Q_P]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.76 และ $[(Q_S+Q_T)/Q_P]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.98



รูปที่ ค.6 กราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคมีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยภายในเตา สำหรับความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $2.5U_{mf}$ โดย $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.76 และ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.98



รูปที่ ค.7 กราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคมีต่อค่าอุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยภายในเตา สำหรับความเร็วอากาศปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $3U_{mf}$ โดย $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.76 และ $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ S_w เท่ากับ 2.98



ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $S_w = 2.76$

r/R	T _b (°C)	d _p (μm)	U _{mf} (m/s)	U _p (m/s)	Z/Z _r	(Q _s +Q _T)/Q _P	h _{local} (W/m ² K)	h _r (W/m ² K)
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0	344.01	0.11
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0	303.06	0.12
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0	314.52	0.11
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0	352.20	0.10
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0	317.80	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0	298.14	0.12
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0	335.82	0.10
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0	332.34	0.11
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0	296.70	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0	308.94	0.12
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0	328.76	0.11
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0	303.12	0.12
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0	291.06	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0	322.25	0.12
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0	329.76	0.11
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0	298.93	0.12
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0	303.67	0.11
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0	328.75	0.10
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0	305.61	0.11
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0	295.82	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0	326.77	0.11
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0	330.36	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0	283.40	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0	289.95	0.09
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0	317.80	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0	289.95	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0	280.12	0.10

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0	307.43	0.09
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.3	335.26	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.3	297.65	0.13
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.3	311.23	0.12
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.3	342.85	0.11
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.3	310.40	0.12
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.3	291.44	0.13
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.3	324.59	0.11
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.3	327.46	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.3	287.88	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.3	296.71	0.10
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.3	318.91	0.10
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.3	295.02	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.3	284.31	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.3	312.90	0.10
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.3	318.70	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.3	284.88	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.3	295.23	0.10
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.3	323.34	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.3	291.07	0.11
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.3	288.45	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.3	318.62	0.10
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.3	318.35	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.3	269.20	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.3	281.76	0.09
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.3	305.79	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.3	281.76	0.10

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.3	270.84	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.3	298.14	0.10
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.5	324.87	0.11
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.5	286.54	0.13
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.5	303.12	0.12
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.5	330.46	0.11
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.5	306.78	0.11
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.5	285.44	0.12
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.15	0.5	316.81	0.10
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.5	317.60	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.5	275.86	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.5	291.35	0.09
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.5	308.61	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.5	285.04	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.5	276.55	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.38	0.5	301.20	0.11
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.5	313.98	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.5	281.03	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.5	289.44	0.11
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.5	318.75	0.11
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.5	288.02	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.5	280.37	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.65	0.5	310.76	0.10
1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.5	307.97	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.5	263.74	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.5	278.49	0.09
0	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.5	298.14	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.5	276.85	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.5	265.38	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	0.68	0.88	0.5	288.31	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0	385.60	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0	336.76	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0	352.39	0.10
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0	386.54	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0	348.97	0.11
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0	333.21	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0	376.58	0.10
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0	375.61	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0	320.87	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0	330.01	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0	364.98	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0	327.80	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0	320.55	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0	362.83	0.08
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0	368.02	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0	327.68	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0	331.15	0.11
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0	368.79	0.10
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0	339.07	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0	329.75	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0	362.03	0.10
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0	374.58	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0	325.05	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0	320.11	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0	362.87	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0	319.23	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0	323.77	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0	355.73	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.3	367.33	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.3	328.06	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.3	342.64	0.11
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.3	374.07	0.10
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.3	340.03	0.11
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.3	325.43	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.3	364.97	0.10
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.3	358.60	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.3	311.26	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.3	324.45	0.10
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.3	353.81	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.3	322.46	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.3	313.88	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.3	351.05	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.3	359.86	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.3	318.65	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.3	322.46	0.11
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.3	361.29	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.3	327.56	0.11
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.3	324.33	0.12
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.3	356.98	0.10
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.3	358.45	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.3	312.58	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.3	315.94	0.10
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.3	351.08	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.3	314.67	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.3	309.81	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.3	342.32	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.5	356.87	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.5	319.08	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.5	336.54	0.10
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.5	368.72	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.5	337.61	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.5	317.05	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.15	0.5	355.44	0.10
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.5	350.65	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.5	304.52	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.5	317.60	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.5	349.06	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.5	318.82	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.5	310.32	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.38	0.5	344.91	0.08
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.5	351.22	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.5	312.08	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.5	319.93	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.5	357.27	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.5	320.05	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.5	316.78	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.65	0.5	347.65	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.5	351.44	0.07

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.5	303.45	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.5	308.53	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.5	347.56	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.5	309.76	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.5	301.98	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.03	0.88	0.5	333.26	0.08
1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0	435.60	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0	386.54	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0	394.66	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0	431.29	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0	392.11	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0	377.65	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0	428.76	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0	423.06	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0	362.19	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0	370.87	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0	413.36	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0	375.65	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0	369.80	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0	418.96	0.08
1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0	423.45	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0	372.56	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0	369.02	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0	418.78	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0	377.64	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0	370.51	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0	418.84	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.60	300–500	0.68	1.37	0.88	0	427.95	0.07
2/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.88	0	366.72	0.08
1/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.88	0	361.02	0.07
0	345.60	300–500	0.68	1.37	0.88	0	388.79	0.07
-1/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.88	0	364.50	0.07
-2/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.88	0	367.91	0.08
-1	345.60	300–500	0.68	1.37	0.88	0	400.34	0.07
1	345.60	300–500	0.68	1.37	0.15	0.3	413.43	0.08
2/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.15	0.3	372.85	0.09
1/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.15	0.3	381.22	0.09
0	345.60	300–500	0.68	1.37	0.15	0.3	420.08	0.08
-1/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.15	0.3	385.46	0.09
-2/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.15	0.3	366.75	0.10
-1	345.60	300–500	0.68	1.37	0.15	0.3	413.84	0.09
1	345.60	300–500	0.68	1.37	0.38	0.3	411.98	0.08
2/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.38	0.3	356.67	0.08
1/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.38	0.3	364.91	0.08
0	345.60	300–500	0.68	1.37	0.38	0.3	400.03	0.07
-1/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.38	0.3	366.75	0.09
-2/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.38	0.3	358.77	0.09
-1	345.60	300–500	0.68	1.37	0.38	0.3	402.34	0.07
1	345.60	300–500	0.68	1.37	0.65	0.3	408.55	0.08
2/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.65	0.3	362.38	0.10
1/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.65	0.3	360.76	0.10
0	345.60	300–500	0.68	1.37	0.65	0.3	409.31	0.08
-1/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.65	0.3	365.45	0.09
-2/3	345.60	300–500	0.68	1.37	0.65	0.3	361.98	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0.3	402.53	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.3	406.75	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.3	351.28	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.3	358.65	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.3	379.04	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.3	365.48	0.07
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.3	354.87	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.3	388.45	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0.5	403.20	0.10
2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0.5	357.61	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0.5	373.90	0.10
0	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0.5	415.16	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0.5	377.04	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0.5	356.63	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.15	0.5	401.27	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0.5	391.45	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0.5	342.97	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0.5	354.99	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0.5	391.65	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0.5	358.60	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0.5	349.43	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.38	0.5	393.88	0.08
1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0.5	394.35	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0.5	347.66	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0.5	352.19	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0.5	399.08	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0.5	357.69	0.10

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0.5	353.87	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.65	0.5	395.34	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.5	397.55	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.5	341.27	0.07
1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.5	346.93	0.07
0	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.5	371.87	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.5	352.95	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.5	342.18	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.37	0.88	0.5	376.51	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0	469.86	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0	412.54	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0	421.38	0.10
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0	463.92	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0	423.19	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0	409.75	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0	466.54	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0	453.28	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0	392.59	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0	401.25	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0	438.74	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0	405.69	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0	399.54	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0	446.38	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0	457.68	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0	403.45	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0	418.03	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0	454.91	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0	404.52	0.07
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0	400.65	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0	451.23	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0	463.45	0.06
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0	401.27	0.07
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0	406.84	0.07
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0	432.19	0.06
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0	403.21	0.07
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0	398.01	0.07
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0	436.58	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.3	458.77	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.3	407.65	0.10
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.3	417.03	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.3	458.60	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.3	419.45	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.3	401.83	0.10
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.3	455.93	0.08
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.3	439.85	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.3	377.67	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.3	392.16	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.3	423.32	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.3	395.47	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.3	382.58	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.3	428.97	0.08
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.3	446.12	0.06
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.3	398.55	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.3	405.76	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.3	445.38	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.3	397.29	0.07
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.3	392.48	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.3	440.05	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.3	452.98	0.06
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.3	384.76	0.07
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.3	388.12	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.3	425.66	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.3	387.51	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.3	380.38	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.3	426.87	0.06
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.5	443.51	0.09
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.5	395.73	0.11
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.5	403.48	0.09
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.5	452.65	0.09
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.5	410.94	0.10
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.5	391.27	0.11
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.15	0.5	446.23	0.09
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.5	433.21	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.5	379.45	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.5	386.57	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.5	432.98	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.5	385.46	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.5	378.28	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.38	0.5	426.45	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.5	439.75	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.5	398.70	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.5	397.54	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.5	440.35	0.06
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.5	395.44	0.07
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.5	390.78	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.65	0.5	438.99	0.07
1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.5	437.64	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.5	379.81	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.5	381.57	0.08
0	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.5	409.81	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.5	388.17	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.5	377.56	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	1.71	0.88	0.5	415.69	0.06
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0	483.46	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0	426.45	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0	438.91	0.09
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0	487.23	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0	446.34	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0	424.87	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0	481.22	0.08
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0	472.48	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0	416.53	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0	421.98	0.08
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0	467.59	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0	428.67	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0	414.30	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0	467.28	0.07
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0	476.35	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0	420.11	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0	433.28	0.08
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0	474.98	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0	426.54	0.09
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0	420.68	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0	473.20	0.08
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0	480.32	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0	413.76	0.07
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0	417.45	0.07
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0	446.39	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0	419.70	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0	412.09	0.07
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0	466.58	0.07
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.3	475.58	0.08
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.3	418.93	0.09
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.3	439.84	0.08
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.3	480.32	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.3	436.57	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.3	419.26	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.3	477.63	0.07
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.3	469.24	0.06
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.3	410.23	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.3	418.56	0.08
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.3	462.66	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.3	422.07	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.3	411.25	0.07
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.3	462.38	0.07

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.3	468.70	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.3	415.25	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.3	429.88	0.07
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.3	469.03	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.3	420.23	0.07
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.3	417.99	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.3	467.25	0.07
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.3	475.26	0.06
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.3	409.22	0.07
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.3	413.38	0.07
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.3	441.56	0.06
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.3	417.67	0.07
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.3	409.98	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.3	458.97	0.06
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.5	469.04	0.07
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.5	416.58	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.5	427.69	0.07
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.5	476.55	0.08
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.5	432.97	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.5	412.54	0.09
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.15	0.5	471.87	0.07
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.5	460.52	0.06
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.5	406.55	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.5	414.09	0.07
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.5	457.32	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.5	417.74	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.5	405.57	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.38	0.5	457.12	0.07
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.5	463.48	0.06
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.5	412.35	0.08
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.5	424.91	0.07
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.5	462.31	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.5	415.66	0.08
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.5	411.08	0.08
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.65	0.5	463.27	0.07
1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.5	467.93	0.06
2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.5	404.35	0.07
1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.5	412.87	0.07
0	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.5	436.77	0.07
-1/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.5	413.82	0.07
-2/3	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.5	405.38	0.07
-1	345.60	300-500	0.68	2.05	0.88	0.5	448.26	0.07
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0	333.63	0.13
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0	294.32	0.14
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0	309.06	0.14
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0	349.70	0.13
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0	310.70	0.14
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0	293.78	0.14
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0	329.82	0.13
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0	324.90	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0	287.22	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0	295.96	0.12
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0	319.44	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0	298.14	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0	287.22	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0	317.80	0.11
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0	326.54	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0	290.50	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0	294.32	0.12
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0	327.08	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0	299.78	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0	291.04	0.13
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0	321.08	0.11
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0	330.36	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0	283.40	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0	289.95	0.12
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0	317.80	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0	289.95	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0	280.12	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0	307.43	0.11
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.3	321.08	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.3	286.13	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.3	306.33	0.13
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.3	327.63	0.13
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.3	305.79	0.13
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.3	286.68	0.13
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.3	319.99	0.12
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.3	313.43	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.3	274.66	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.3	288.86	0.12
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.3	310.16	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.3	290.50	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.3	280.67	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.3	306.33	0.11
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.3	311.25	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.3	278.49	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.3	288.86	0.13
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.3	318.89	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.3	288.31	0.13
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.3	283.40	0.13
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.3	318.35	0.12
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.3	318.35	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.3	269.20	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.3	281.76	0.12
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.3	305.79	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.3	281.76	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.3	270.84	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.3	298.14	0.12
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.5	311.25	0.14
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.5	280.12	0.16
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.5	301.42	0.16
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.5	321.08	0.15
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.5	301.42	0.16
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.5	281.76	0.16
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.15	0.5	311.25	0.15
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.5	304.70	0.14
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.5	267.02	0.15
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.5	283.40	0.15

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.5	301.97	0.14
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.5	280.12	0.15
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.5	273.57	0.15
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.38	0.5	298.14	0.14
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.5	311.25	0.14
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.5	271.93	0.15
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.5	285.04	0.15
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.5	311.25	0.14
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.5	286.68	0.15
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.5	276.85	0.16
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.65	0.5	304.15	0.14
1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.5	307.97	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.5	263.74	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.5	278.49	0.12
0	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.5	298.14	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.5	276.85	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.5	265.38	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	0.98	0.88	0.5	288.31	0.12
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0	370.22	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0	327.57	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0	344.01	0.09
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0	376.77	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0	344.01	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0	329.27	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0	365.31	0.09
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0	362.03	0.08
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0	315.62	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0	324.35	0.09
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0	355.48	0.08
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0	324.35	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0	323.26	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0	353.84	0.08
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0	363.67	0.08
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0	322.72	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0	325.99	0.09
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0	364.22	0.08
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0	335.27	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0	325.44	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0	359.30	0.08
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0	366.95	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0	316.16	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0	317.80	0.09
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0	353.84	0.08
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0	317.80	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0	313.43	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0	343.46	0.08
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.3	360.39	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.3	321.62	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.3	335.82	0.13
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.3	368.58	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.3	337.46	0.13
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.3	319.44	0.13
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.3	357.12	0.12
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.3	353.84	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.3	304.70	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.3	316.16	0.09
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.3	347.29	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.3	319.44	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.3	306.33	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.3	344.56	0.09
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.3	355.48	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.3	314.52	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.3	319.44	0.10
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.3	359.84	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.3	322.72	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.3	318.34	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.3	348.93	0.10
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.3	353.84	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.3	305.79	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.3	311.25	0.09
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.3	344.01	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.3	309.61	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.3	301.42	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.3	330.91	0.09
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.5	353.84	0.08
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.5	315.07	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.5	333.09	0.09
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.5	365.31	0.08
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.5	334.73	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.5	314.52	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.15	0.5	350.56	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.5	345.65	0.07
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.5	301.42	0.07
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.5	312.89	0.07
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.5	347.29	0.07
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.5	314.52	0.06
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.5	307.97	0.07
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.38	0.5	337.46	0.06
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.5	347.29	0.07
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.5	307.97	0.08
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.5	317.80	0.08
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.5	355.48	0.07
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.5	319.44	0.08
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.5	311.25	0.08
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.65	0.5	342.37	0.08
1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.5	348.93	0.08
2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.5	298.69	0.08
1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.5	303.06	0.08
0	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.5	344.01	0.08
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.5	305.24	0.08
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.5	297.05	0.08
-1	345.60	600-710	0.98	1.47	0.88	0.5	324.35	0.08
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0	422.64	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0	375.14	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0	383.33	0.13
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0	425.92	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0	386.60	0.13
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0	371.86	0.13

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0	422.64	0.12
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0	416.09	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0	355.48	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0	366.95	0.12
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0	404.62	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0	371.86	0.13
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0	362.03	0.13
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0	409.54	0.12
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0	417.73	0.13
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0	368.58	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0	365.31	0.13
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0	412.81	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0	370.22	0.13
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0	368.58	0.14
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0	414.45	0.13
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0	419.37	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0	360.39	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0	357.12	0.12
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0	381.69	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0	362.03	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0	355.48	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0	398.07	0.12
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.3	407.90	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.3	362.03	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.3	375.14	0.13
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.3	417.73	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.3	378.41	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.3	362.58	0.13
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.3	406.26	0.12
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.3	401.35	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.3	347.29	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.3	358.75	0.11
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.3	396.43	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.3	362.03	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.3	353.84	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.3	393.16	0.11
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.3	401.34	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.3	355.48	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.3	357.12	0.11
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.3	404.62	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.3	362.03	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.3	358.75	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.3	398.07	0.11
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.3	404.62	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.3	347.29	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.3	351.11	0.11
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.3	374.05	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.3	354.39	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.3	346.20	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.3	382.24	0.10
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.5	396.43	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.5	350.56	0.13
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.5	365.31	0.12
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.5	407.90	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.5	371.86	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.5	353.84	0.13
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.15	0.5	396.43	0.12
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.5	388.24	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.5	337.46	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.5	347.29	0.12
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.5	388.24	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.5	355.48	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.5	345.65	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.38	0.5	381.69	0.11
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.5	389.88	0.12
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.5	344.01	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.5	348.93	0.12
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.5	396.43	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.5	353.84	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.5	348.93	0.13
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.65	0.5	386.60	0.12
1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.5	393.16	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.5	337.46	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.5	340.73	0.10
0	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.5	365.31	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.5	347.29	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.5	337.46	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	1.97	0.88	0.5	371.86	0.11
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0	456.50	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0	402.44	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0	416.64	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0	452.68	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0	411.30	0.12
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0	403.53	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0	462.50	0.11
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0	447.76	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0	389.88	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0	397.53	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0	434.11	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0	403.53	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0	393.70	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0	442.85	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0	452.13	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0	400.80	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0	413.36	0.11
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0	448.31	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0	401.35	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0	398.07	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0	449.94	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0	454.86	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0	396.43	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0	402.98	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0	421.55	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0	401.89	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0	396.43	0.10
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0	431.38	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.3	454.31	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.3	402.44	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.3	412.81	0.11
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.3	461.96	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.3	416.09	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.3	394.79	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.3	451.03	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.3	435.20	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.3	373.50	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.3	381.69	0.11
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.3	419.91	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.3	389.33	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.3	379.50	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.3	424.83	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.3	442.30	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.3	393.16	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.3	397.52	0.11
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.3	440.66	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.3	407.90	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.3	388.24	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.3	437.93	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.3	447.21	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.3	381.14	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.3	383.87	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.3	418.27	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.3	384.42	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.3	375.68	0.10
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.3	421.55	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.5	439.02	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.5	386.60	0.12
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.5	398.62	0.11
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.5	448.85	0.12
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.5	405.71	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.5	387.69	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.15	0.5	438.48	0.11
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.5	429.74	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.5	374.05	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.5	382.78	0.12
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.5	428.65	0.11
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.5	381.14	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.5	376.77	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.38	0.5	425.37	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.5	435.75	0.11
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.5	382.78	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.5	384.42	0.11
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.5	438.48	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.5	393.16	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.5	388.79	0.12
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.65	0.5	437.01	0.11
1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.5	430.29	0.08
2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.5	373.50	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.5	376.77	0.09
0	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.5	404.62	0.08
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.5	382.24	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.5	371.86	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	2.46	0.88	0.5	410.08	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0	477.79	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0	420.46	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0	435.20	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0	482.71	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0	440.12	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0	420.46	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0	478.34	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0	468.51	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0	411.18	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0	417.73	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0	460.32	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0	422.64	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0	409.54	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0	465.23	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0	470.15	0.10
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0	417.73	0.11
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0	429.19	0.11
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0	468.51	0.10
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0	421.00	0.11
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0	417.73	0.11
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0	445.58	0.10
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0	475.06	0.08
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0	407.90	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0	411.18	0.09
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0	440.66	0.08
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0	416.09	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0	407.90	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0	457.04	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.3	471.79	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.3	413.90	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.3	432.47	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.3	478.34	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.3	432.47	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.3	417.73	0.10
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.3	475.06	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.3	466.32	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.3	407.35	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.3	417.18	0.09
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.3	459.77	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.3	419.37	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.3	407.35	0.10
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.3	461.41	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.3	465.23	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.3	412.81	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.3	427.56	0.09
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.3	465.23	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.3	417.73	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.3	414.45	0.10
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.3	465.23	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.3	471.79	0.08
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.3	406.26	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.3	417.73	0.09
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.3	439.02	0.08
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.3	416.09	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.3	409.54	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.3	453.22	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.5	465.23	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.5	411.18	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.5	425.92	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.5	472.33	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.5	429.19	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.5	409.54	0.10
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.15	0.5	467.96	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.5	458.68	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.5	402.98	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.5	409.54	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.5	452.13	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.5	414.45	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.5	401.34	0.10
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.38	0.5	453.77	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.5	458.68	0.09
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.5	407.90	0.10
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.5	421.00	0.10
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.5	460.32	0.09
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.5	412.81	0.10
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.5	408.45	0.10
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.65	0.5	460.32	0.09
1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.5	465.23	0.08
2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.5	402.98	0.09
1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.5	411.18	0.09
0	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.5	432.47	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.5	411.18	0.09
-2/3	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.5	402.98	0.09
-1	345.60	600-710	0.98	2.95	0.88	0.5	443.94	0.09
1	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.15	0	164.36	0.20
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.15	0	144.16	0.21
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.15	0	136.51	0.20
0	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.15	0	159.99	0.20
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.15	0	145.25	0.21
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.15	0	139.79	0.21
-1	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.15	0	167.09	0.20
1	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.38	0	167.64	0.18
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.38	0	139.24	0.18
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.38	0	148.52	0.18
0	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.38	0	153.99	0.18
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.38	0	146.89	0.18
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.38	0	139.24	0.18
-1	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.38	0	166.54	0.18
1	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.65	0	164.9	0.18
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.65	0	138.7	0.18
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.65	0	145.25	0.19
0	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.65	0	157.81	0.18
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.65	0	142.52	0.19
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.65	0	141.97	0.18
-1	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.65	0	168.73	0.18
1	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.88	0	150.16	0.17
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.88	0	135.42	0.17
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	1.57	0.88	0	140.33	0.17

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0	149.62	0.17
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0	138.69	0.17
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0	133.78	0.16
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0	149.62	0.17
1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.3	164.91	0.15
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.3	145.25	0.14
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.3	144.7	0.14
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.3	168.18	0.15
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.3	143.07	0.14
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.3	139.79	0.14
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.3	164.9	0.15
1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.3	159.45	0.15
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.3	135.97	0.14
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.3	141.97	0.14
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.3	147.98	0.15
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.3	143.07	0.14
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.3	135.97	0.14
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.3	159.99	0.14
1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.3	155.62	0.17
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.3	134.33	0.18
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.3	140.88	0.16
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.3	153.44	0.17
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.3	139.24	0.16
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.3	133.78	0.18
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.3	155.08	0.17
1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.3	138.69	0.14
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.3	133.24	0.15

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.3	137.06	0.16
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.3	146.34	0.14
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.3	136.51	0.16
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.3	132.69	0.15
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.3	143.61	0.14
1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.5	155.62	0.18
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.5	133.78	0.19
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.5	135.42	0.19
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.5	157.26	0.19
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.5	133.78	0.19
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.5	128.87	0.19
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.15	0.5	154.53	0.18
1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.5	153.44	0.17
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.5	128.87	0.16
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.5	137.6	0.17
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.5	141.43	0.17
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.5	134.33	0.17
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.5	128.87	0.17
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.38	0.5	151.26	0.17
1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.5	150.71	0.17
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.5	133.24	0.17
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.5	134.87	0.18
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.5	150.16	0.18
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.5	131.6	0.18
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.5	125.59	0.17
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.65	0.5	150.71	0.18
1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.5	129.96	0.15

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.5	123.41	0.16
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.5	130.5	0.14
0	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.5	139.24	0.14
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.5	123.95	0.15
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.5	119.58	0.16
-1	345.60	710 – 1000	1.57	1.57	0.88	0.5	137.06	0.14
1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0	217.08	0.14
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0	193.85	0.14
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0	214.6	0.14
0	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0	223.33	0.14
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0	213.51	0.14
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0	199.85	0.14
-1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0	220.6	0.14
1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0	211.87	0.18
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0	195.49	0.18
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0	193.85	0.18
0	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0	205.86	0.17
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0	197.13	0.18
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0	186.2	0.18
-1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0	213.51	0.18
1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0	209.13	0.19
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0	190.03	0.20
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0	193.85	0.20
0	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0	209.13	0.18
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0	191.66	0.20
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0	185.66	0.20
-1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0	209.68	0.19

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.88	0	192.75	0.16
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.88	0	183.47	0.16
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.88	0	186.2	0.15
0	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.88	0	199.31	0.15
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.88	0	186.2	0.15
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.88	0	186.75	0.16
-1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.88	0	196.58	0.16
1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0.3	209.14	0.19
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0.3	190.02	0.19
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0.3	196.58	0.20
0	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0.3	216.23	0.18
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0.3	194.39	0.20
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0.3	188.93	0.20
-1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.15	0.3	208.04	0.19
1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0.3	208.04	0.15
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0.3	180.74	0.16
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0.3	188.39	0.16
0	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0.3	198.21	0.16
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0.3	189.48	0.16
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0.3	181.83	0.16
-1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.38	0.3	208.04	0.15
1	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0.3	204.22	0.15
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0.3	183.47	0.17
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0.3	190.03	0.16
0	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0.3	204.23	0.15
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0.3	183.47	0.16
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	2.36	0.65	0.3	182.93	0.17

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.65	0.3	203.13	0.15
1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.3	180.19	0.14
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.3	175.83	0.14
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.3	181.83	0.14
0	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.3	187.3	0.13
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.3	180.74	0.14
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.3	175.83	0.14
-1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.3	185.66	0.14
1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.15	0.5	197.13	0.18
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.15	0.5	179.65	0.18
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.15	0.5	185.11	0.17
0	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.15	0.5	206.95	0.17
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.15	0.5	179.63	0.17
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.15	0.5	174.73	0.18
-1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.15	0.5	198.22	0.17
1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.38	0.5	204.22	0.15
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.38	0.5	176.92	0.16
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.38	0.5	189.47	0.17
0	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.38	0.5	192.76	0.16
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.38	0.5	180.2	0.16
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.38	0.5	174.73	0.16
-1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.38	0.5	204.22	0.15
1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.65	0.5	185.66	0.15
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.65	0.5	173.64	0.16
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.65	0.5	180.74	0.15
0	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.65	0.5	191.66	0.15
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.65	0.5	173.64	0.16

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.65	0.5	168.18	0.16
-1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.65	0.5	187.3	0.15
1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.5	174.19	0.16
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.5	168.18	0.16
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.5	173.1	0.14
0	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.5	184.56	0.15
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.5	168.18	0.15
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.5	166	0.15
-1	345.60	710 - 1000	1.57	2.36	0.88	0.5	178.01	0.15
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0	270.66	0.15
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0	259.43	0.16
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0	265.45	0.16
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0	277.4	0.14
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0	265.93	0.15
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0	251.19	0.16
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0	280.67	0.15
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0	264.29	0.14
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0	238.62	0.15
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0	253.37	0.15
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0	260.47	0.14
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0	250.1	0.15
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0	244.63	0.15
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0	263.74	0.14
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0	262.1	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0	240.26	0.13
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0	246.05	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0	264.29	0.10

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0	244.08	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0	239.17	0.14
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0	259.92	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0	263.74	0.13
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0	239.72	0.13
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0	244.08	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0	262.1	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0	242.99	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0	239.72	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0	256.65	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0.3	257.19	0.15
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0.3	237.53	0.17
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0.3	254.46	0.15
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0.3	268.11	0.14
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0.3	254.46	0.16
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0.3	238.08	0.17
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.15	0.3	257.19	0.15
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0.3	252.82	0.13
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0.3	224.43	0.14
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0.3	238.62	0.13
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0.3	252.27	0.13
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0.3	239.72	0.13
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0.3	226.61	0.14
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.38	0.3	253.37	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0.3	251.73	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0.3	224.97	0.13
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.65	0.3	236.99	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.3	253.91	0.10
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.3	237.53	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.3	226.06	0.13
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.3	251.73	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.3	231.53	0.14
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.3	223.88	0.15
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.3	231.53	0.15
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.3	247.91	0.14
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.3	231.53	0.15
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.3	222.79	0.15
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.3	236.45	0.14
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.15	0.5	240.81	0.15
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.15	0.5	225.52	0.16
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.15	0.5	244.63	0.16
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.15	0.5	260.47	0.15
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.15	0.5	245.72	0.16
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.15	0.5	224.43	0.17
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.15	0.5	241.9	0.15
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.38	0.5	238.62	0.14
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.38	0.5	214.05	0.14
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.38	0.5	227.7	0.14
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.38	0.5	240.26	0.14
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.38	0.5	229.89	0.14
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.38	0.5	213.51	0.15
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.38	0.5	237.53	0.14
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.5	233.17	0.13
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.5	216.77	0.13

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.5	226.61	0.13
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.5	247.36	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.5	223.34	0.13
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.5	211.87	0.14
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.65	0.5	233.17	0.13
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	215.68	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	211.32	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	217.82	0.13
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	237.53	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	221.15	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	211.32	0.13
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	219.51	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	304.7	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	278.48	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	297.05	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	313.98	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	298.17	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	279.03	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	303.06	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	303.6	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	269.75	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	285.04	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	301.42	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	286.68	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	270.29	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	303.6	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	298.69	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	270.29	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	283.4	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	301.97	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	282.86	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	269.2	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	300.87	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	303.6	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	265.93	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	275.21	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	293.23	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	274.12	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	265.38	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	285.04	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	300.87	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	276.3	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	295.41	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	311.8	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	294.87	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	275.42	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	299.78	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	295.41	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	264.83	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	279.03	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	294.32	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	281.21	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	263.95	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	295.41	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	292.68	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	267.02	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	276.3	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	300.33	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	274.12	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	263.95	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	290.5	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	297.05	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	262.1	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	271.39	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	289.4	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	271.38	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	261.22	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	278.49	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	287.77	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	265.38	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	287.83	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	304.69	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	288.86	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	267.02	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	288.86	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	285.04	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	255	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	271.38	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	287.77	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	274.12	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	255.55	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	283.95	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	281.21	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	257.19	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	272.48	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	292.72	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	265.93	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	255	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	280.12	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	285.59	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	255	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	262.65	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	283.95	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	265.38	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	251.73	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	263.74	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	339.1	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	303.06	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	328.18	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	343.46	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	325.99	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	306.33	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	336.91	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	333.63	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	292.68	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	311.8	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	329.82	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	313.98	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	301.97	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	326	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	331.45	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	295.41	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	309.61	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	333.63	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	306.33	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	301.42	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	328.73	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	334.18	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	288.86	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	303.06	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	323.26	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	302.51	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	288.86	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	311.25	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	329.27	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	298.14	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	321.63	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	340.19	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	322.72	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	297.59	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	327.63	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	323.81	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	283.95	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	305.24	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	322.17	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	307.42	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	293.23	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	316.71	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	322.72	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	287.22	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	301.97	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	325.99	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	298.14	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	292.14	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	318.35	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	324.9	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	284.61	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	296.5	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	315.62	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	296.5	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	282.31	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	302.51	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	321.63	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	291.59	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	316.71	0.12
0	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	335.27	0.12
-1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	316.71	0.12
-2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	292.14	0.12
-1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	321.63	0.12
1	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	317.25	0.12
2/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	281.76	0.12
1/3	345.60	710 - 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	300.87	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.76$ (ต่อ)

r/R	T_b (°C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_p (m/s)	Z/Z_r	$(Q_s+Q_T)/Q_p$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	319.44	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	302.51	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	288.31	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	317.25	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	313.43	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	283.4	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	297.05	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	323.26	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	294.87	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	287.22	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	311.25	0.12
1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	318.35	0.12
2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	277.94	0.12
1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	293.23	0.12
0	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	313.43	0.12
-1/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	292.14	0.12
-2/3	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	277.94	0.12
-1	345.60	710 – 1000	1.57	3.93	0.88	0.5	299.23	0.12

ตาราง ง.2 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $S_w = 2.98$

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0	279.51	0.21
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0	236.78	0.21
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0	252.11	0.22
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0	275.49	0.22
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0	246.64	0.22
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0	227.32	0.20
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0	267.80	0.22
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0	263.21	0.11
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0	228.65	0.12
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0	237.03	0.11
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0	252.87	0.10
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0	233.19	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0	225.82	0.12
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0	247.55	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0	274.37	0.11
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0	228.93	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0	231.67	0.12
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0	258.90	0.11
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0	229.04	0.12
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0	225.15	0.11
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0	252.39	0.12
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0	263.56	0.11
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0	225.87	0.12
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0	227.03	0.11
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0	256.70	0.10
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0	224.21	0.11
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0	223.12	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0	241.74	0.11
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.3	258.63	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.3	225.06	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.3	239.61	0.09
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.3	263.70	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.3	238.66	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.3	223.45	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.3	250.26	0.09
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.3	247.43	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.3	219.08	0.13
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.3	226.47	0.12
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.3	244.39	0.11
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.3	228.77	0.12
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.3	219.83	0.13
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.3	241.32	0.11
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.3	252.06	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.3	217.65	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.3	228.11	0.10
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.3	249.01	0.10
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.3	221.56	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.3	218.88	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.3	244.68	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.3	252.46	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.3	215.53	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.3	223.87	0.10
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.3	243.80	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.3	221.62	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.3	217.08	0.11
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.3	236.75	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.5	244.17	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.5	218.95	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.5	234.89	0.09
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.5	251.37	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.5	233.06	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.5	217.44	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.15	0.5	244.58	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.5	240.16	0.11
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.5	211.98	0.13
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.5	223.61	0.12
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.5	238.09	0.11
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.5	225.45	0.11
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.5	214.43	0.12
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.38	0.5	236.73	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.5	243.28	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.5	216.75	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.5	221.55	0.09
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.5	241.09	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.5	218.42	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.5	213.44	0.11
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.65	0.5	238.71	0.11
1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.5	243.58	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.5	212.39	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.5	218.77	0.11
0	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.5	238.54	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.5	217.66	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.5	209.13	0.11
-1	345.6	300-500	0.63	0.63	0.88	0.5	214.16	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0	294.55	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0	259.85	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0	266.31	0.09
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0	295.34	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0	269.04	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0	261.77	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0	287.01	0.09
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0	287.25	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0	252.19	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0	258.71	0.10
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0	284.65	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0	260.18	0.11
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0	255.60	0.11
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0	278.91	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0	284.56	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0	253.87	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0	259.01	0.09
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0	285.11	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0	255.63	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0	251.85	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0	280.95	0.08
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0	291.03	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0	256.73	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0	250.46	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0	283.21	0.10
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0	255.67	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0	246.75	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0	269.82	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.3	280.65	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.3	251.33	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.3	264.58	0.09
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.3	286.42	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.3	263.22	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.3	247.68	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.3	278.94	0.09
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.3	276.98	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.3	241.37	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.3	250.81	0.11
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.3	274.33	0.10
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.3	253.87	0.11
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.3	246.72	0.11
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.3	271.23	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.3	277.64	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.3	246.58	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.3	251.38	0.10
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.3	279.43	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.3	248.99	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.3	244.37	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.3	272.18	0.09
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.3	284.20	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.3	244.35	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.3	246.72	0.11
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.3	274.98	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.3	247.64	0.11
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.3	238.05	0.12
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.3	262.31	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.5	276.09	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.5	244.56	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.5	257.88	0.10
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.5	283.45	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.5	258.43	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.5	242.03	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.15	0.5	273.11	0.09
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.5	272.43	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.5	238.64	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.5	249.97	0.10
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.5	272.34	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.5	247.66	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.5	241.24	0.11
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.38	0.5	264.34	0.10
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.5	271.83	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.5	243.11	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.5	242.87	0.09
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.5	275.64	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.5	244.08	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.5	239.65	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.65	0.5	266.74	0.08
1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.5	272.35	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.5	238.73	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.5	241.87	0.09
0	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.5	270.04	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.5	241.11	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.5	237.55	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	0.945	0.88	0.5	257.65	0.09
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0	331.56	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0	294.43	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0	297.86	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0	335.67	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0	302.18	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0	292.34	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0	327.85	0.08
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0	328.73	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0	284.58	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0	292.13	0.09
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0	318.77	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0	289.34	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0	284.59	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0	319.68	0.09
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0	324.65	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0	287.55	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0	284.35	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0	322.96	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0	286.57	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0	284.98	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0	320.13	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0	329.83	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0	284.35	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0	281.22	0.09
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0	301.76	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0	286.50	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0	280.06	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0	312.55	0.08
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.3	318.45	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.3	280.13	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.3	291.11	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.3	322.87	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.3	294.56	0.07
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.3	283.27	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.3	316.55	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.3	316.80	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.3	274.17	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.3	280.66	0.09
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.3	314.50	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.3	286.97	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.3	279.08	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.3	307.86	0.09
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.3	314.75	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.3	277.64	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.3	279.86	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.3	318.61	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.3	282.35	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.3	278.44	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.3	311.18	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.3	317.90	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.3	274.45	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.3	278.98	0.10
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.3	291.68	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.3	277.61	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.3	270.90	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.3	299.85	0.09
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.5	311.20	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.5	274.33	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.5	286.48	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.5	316.54	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.5	289.70	0.07
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.5	275.41	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.15	0.5	307.36	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.5	304.58	0.10
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.5	267.81	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.5	273.99	0.10
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.5	302.44	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.5	281.58	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.5	275.62	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.38	0.5	300.05	0.09
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.5	304.23	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.5	269.07	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.5	273.83	0.09
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.5	308.60	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.5	275.61	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.5	273.12	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.65	0.5	302.31	0.08
1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.5	309.82	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.5	265.54	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.5	269.87	0.09
0	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.5	286.62	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.5	274.13	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.5	266.37	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	1.26	0.88	0.5	300.01	0.09
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0	358.76	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0	316.53	0.07
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0	327.12	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0	358.79	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0	326.01	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0	312.35	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0	355.90	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0	355.47	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0	309.11	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0	317.63	0.10
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0	344.86	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0	314.89	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0	305.53	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0	346.08	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0	350.12	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0	312.55	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0	318.90	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0	347.86	0.07

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0	311.96	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0	308.71	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0	348.26	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0	357.82	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0	311.46	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0	315.37	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0	328.09	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0	316.78	0.07
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0	307.77	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0	339.01	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.3	347.85	0.06
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.3	308.91	0.07
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.3	316.79	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.3	353.29	0.06
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.3	321.76	0.07
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.3	305.42	0.07
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.3	347.82	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.3	346.57	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.3	298.71	0.10
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.3	306.62	0.09
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.3	338.49	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.3	310.21	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.3	299.46	0.10
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.3	339.14	0.08
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.3	345.78	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.3	304.97	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.3	309.26	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.3	345.65	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.3	306.77	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.3	302.43	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.3	346.09	0.08
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.3	348.83	0.06
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.3	298.04	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.3	303.54	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.3	326.55	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.3	302.94	0.07
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.3	295.49	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.3	330.26	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.5	339.24	0.06
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.5	302.18	0.07
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.5	310.78	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.5	348.79	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.5	317.33	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.5	300.85	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.15	0.5	341.59	0.06
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.5	336.26	0.09
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.5	291.58	0.11
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.5	301.55	0.09
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.5	333.28	0.09
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.5	304.50	0.10
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.5	295.54	0.11
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.38	0.5	333.22	0.09
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.5	333.55	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.5	295.18	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.5	297.54	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.5	338.74	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.5	302.56	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.5	298.14	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.65	0.5	337.60	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.5	338.07	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.5	292.56	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.5	297.84	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.5	317.66	0.06
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.5	298.45	0.07
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.5	291.30	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.575	0.88	0.5	325.65	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0	370.34	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0	326.57	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0	338.94	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0	375.60	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0	339.02	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0	327.65	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0	371.20	0.06
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0	366.89	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0	323.65	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0	326.75	0.09
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0	361.28	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0	329.05	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0	320.11	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0	364.30	0.08
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0	366.59	0.07

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0	325.41	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0	336.54	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0	363.87	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0	325.61	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0	324.30	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0	364.41	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0	371.30	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0	322.76	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0	327.65	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0	345.66	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0	328.90	0.09
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0	322.19	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0	357.48	0.08
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.3	366.87	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.3	321.45	0.07
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.3	334.55	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.3	369.06	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.3	337.28	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.3	324.96	0.07
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.3	367.12	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.3	363.56	0.08
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.3	318.29	0.09
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.3	324.55	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.3	358.70	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.3	326.50	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.3	319.58	0.09
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.3	358.99	0.07

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.3	361.53	0.06
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.3	322.17	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.3	332.57	0.08
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.3	360.21	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.3	322.70	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.3	319.87	0.07
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.3	362.34	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.3	369.82	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.3	318.76	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.3	327.68	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.3	343.51	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.3	327.60	0.07
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.3	320.87	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.3	354.65	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.5	361.28	0.06
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.5	318.75	0.07
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.5	330.23	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.5	365.18	0.06
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.5	332.90	0.07
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.5	319.83	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.15	0.5	364.08	0.06
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.5	357.27	0.07
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.5	316.45	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.5	321.66	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.5	356.45	0.08
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.5	322.19	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.5	314.90	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.38	0.5	355.46	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.5	355.79	0.06
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.5	316.50	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.5	327.83	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.5	355.41	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.5	320.09	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.5	316.72	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.65	0.5	356.10	0.07
1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.5	364.30	0.06
2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.5	313.24	0.08
1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.5	322.98	0.07
0	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.5	338.79	0.07
-1/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.5	320.97	0.08
-2/3	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.5	315.46	0.08
-1	345.6	300-500	0.63	1.89	0.88	0.5	345.61	0.07
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0	254.45	0.06
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0	227.14	0.07
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0	241.35	0.07
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0	259.37	0.07
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0	239.71	0.07
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0	218.41	0.07
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0	254.45	0.07
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0	250.98	0.13
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0	221.69	0.14
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0	227.70	0.14
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0	247.90	0.13
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0	229.88	0.14

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0	222.78	0.14
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0	243.26	0.13
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0	262.09	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0	221.69	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0	224.97	0.12
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0	251.18	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0	223.33	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0	223.33	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0	247.90	0.11
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0	254.45	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0	218.41	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0	223.33	0.12
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0	247.36	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0	222.78	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0	216.23	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0	236.43	0.11
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.3	246.81	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.3	219.99	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.3	235.34	0.12
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.3	252.82	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.3	235.34	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.3	219.51	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.3	245.72	0.11
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.3	244.08	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.3	212.41	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.3	222.24	0.13
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.3	241.89	0.13

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.3	225.51	0.13
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.3	217.32	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.3	238.62	0.12
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.3	241.89	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.3	215.68	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.3	222.27	0.12
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.3	244.63	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.3	219.51	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.3	217.32	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.3	239.16	0.11
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.3	245.17	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.3	210.22	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.3	218.41	0.13
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.3	239.71	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.3	218.96	0.13
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.3	211.86	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.3	231.52	0.12
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.5	240.80	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.5	216.23	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.5	232.06	0.12
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.5	247.36	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.5	231.52	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.5	215.68	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.15	0.5	236.92	0.12
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.5	236.98	0.14
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.5	206.95	0.16
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.5	219.93	0.16

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.5	235.34	0.15
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.5	222.24	0.16
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.5	211.32	0.16
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.38	0.5	231.52	0.15
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.5	235.34	0.14
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.5	209.13	0.15
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.5	218.41	0.15
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.5	238.07	0.14
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.5	216.78	0.15
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.5	211.32	0.15
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.65	0.5	233.70	0.14
1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.5	238.62	0.14
2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.5	205.31	0.15
1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.5	215.14	0.15
0	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.5	232.27	0.14
-1/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.5	215.68	0.15
-2/3	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.5	204.76	0.16
-1	345.6	600-710	0.78	0.78	0.88	0.5	217.87	0.14
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0	284.49	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0	252.82	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0	263.20	0.12
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0	288.85	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0	265.37	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0	252.82	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0	282.30	0.12
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0	281.21	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0	245.17	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0	251.72	0.09
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0	276.29	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0	256.64	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0	250.08	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0	274.66	0.09
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0	279.03	0.08
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0	247.90	0.09
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0	249.54	0.09
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0	279.03	0.08
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0	251.18	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0	248.99	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0	275.75	0.08
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0	285.03	0.08
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0	245.17	0.09
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0	247.36	0.09
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0	274.66	0.08
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0	249.54	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0	243.53	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0	265.92	0.08
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.3	277.39	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.3	246.81	0.09
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.3	258.27	0.09
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.3	282.30	0.08
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.3	258.82	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.3	244.63	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.3	275.21	0.08
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.3	274.66	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.3	238.62	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.3	246.26	0.13
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.3	270.84	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.3	249.54	0.13
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.3	241.35	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.3	267.01	0.12
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.3	273.02	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.3	241.35	0.10
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.3	244.63	0.09
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.3	274.66	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.3	244.63	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.3	241.89	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.3	268.10	0.09
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.3	277.93	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.3	238.62	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.3	241.89	0.10
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.3	269.74	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.3	243.53	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.3	235.34	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.3	258.27	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.5	271.36	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.5	241.35	0.09
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.5	254.46	0.09
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.5	281.21	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.5	256.09	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.5	241.35	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.15	0.5	269.70	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.5	268.10	0.08
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.5	233.72	0.09
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.5	243.53	0.09
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.5	271.35	0.08
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.5	246.26	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.5	238.62	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.38	0.5	261.55	0.08
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.5	266.47	0.07
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.5	236.44	0.07
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.5	241.35	0.07
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.5	273.02	0.07
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.5	241.35	0.06
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.5	237.53	0.07
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.65	0.5	263.19	0.06
1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.5	270.84	0.07
2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.5	233.16	0.08
1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.5	238.62	0.08
0	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.5	268.10	0.07
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.5	239.71	0.08
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.5	236.98	0.08
-1	345.6	600-710	0.78	1.17	0.88	0.5	253.37	0.08
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0	325.41	0.08
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0	287.22	0.08
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0	293.77	0.08
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0	326.53	0.08
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0	297.73	0.08
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0	285.58	0.08

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0	325.44	0.08
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0	322.16	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0	279.03	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0	284.49	0.13
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0	313.43	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0	287.22	0.13
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0	280.67	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0	316.70	0.12
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0	319.98	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0	282.85	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0	281.21	0.12
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0	317.25	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0	283.94	0.13
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0	282.30	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0	318.89	0.12
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0	324.90	0.13
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0	279.03	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0	277.39	0.13
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0	295.95	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0	281.21	0.13
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0	276.29	0.14
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0	308.51	0.13
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.3	313.43	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.3	277.93	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.3	287.22	0.12
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.3	319.98	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.3	288.85	0.12

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.3	277.39	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.3	312.33	0.12
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.3	310.15	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.3	269.20	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.3	277.39	0.13
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.3	307.42	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.3	281.21	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.3	273.57	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.3	303.60	0.12
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.3	308.51	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.3	272.47	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.3	274.66	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.3	310.15	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.3	277.39	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.3	276.84	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.3	305.24	0.11
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.3	313.97	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.3	269.74	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.3	270.83	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.3	289.40	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.3	274.66	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.3	268.10	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.3	296.50	0.11
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.5	304.14	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.5	269.74	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.5	281.21	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.5	313.43	0.10

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.5	285.58	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.5	270.84	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.15	0.5	303.60	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.5	299.78	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.5	261.01	0.13
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.5	269.20	0.12
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.5	300.87	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.5	276.29	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.5	268.10	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.38	0.5	295.95	0.12
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.5	299.23	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.5	264.83	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.5	268.10	0.12
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.5	303.60	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.5	270.84	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.5	268.10	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.65	0.5	298.14	0.11
1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.5	304.14	0.12
2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.5	261.01	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.5	264.83	0.12
0	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.5	282.85	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.5	269.20	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.5	261.55	0.13
-1	345.6	600-710	0.78	1.56	0.88	0.5	287.76	0.12
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0	352.74	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0	310.15	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0	320.52	0.10

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0	352.74	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0	322.16	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0	309.06	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0	351.68	0.11
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0	350.01	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0	305.24	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0	310.15	0.12
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0	339.64	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0	312.33	0.12
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0	303.60	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0	342.92	0.11
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0	347.83	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0	309.06	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0	317.25	0.10
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0	342.92	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0	308.51	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0	306.88	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0	344.55	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0	352.74	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0	307.42	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0	312.33	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0	325.99	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0	310.15	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0	305.78	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0	335.27	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.3	345.10	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.3	304.14	0.10

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.3	313.97	0.10
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.3	350.01	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.3	317.25	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.3	301.96	0.10
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.3	345.64	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.3	341.82	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.3	295.41	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.3	303.05	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.3	335.82	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.3	307.97	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.3	297.59	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.3	336.36	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.3	340.17	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.3	299.78	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.3	300.87	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.3	340.18	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.3	303.60	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.3	300.87	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.3	340.18	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.3	345.10	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.3	295.95	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.3	297.59	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.3	321.62	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.3	300.87	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.3	291.59	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.3	328.72	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.5	336.36	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.5	297.59	0.10
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.5	307.42	0.10
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.5	345.65	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.5	312.33	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.5	297.59	0.10
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.15	0.5	338.54	0.09
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.5	333.63	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.5	288.31	0.12
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.5	297.59	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.5	331.99	0.12
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.5	302.50	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.5	292.13	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.38	0.5	330.90	0.11
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.5	331.45	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.5	292.68	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.5	293.77	0.12
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.5	334.71	0.11
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.5	298.69	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.5	294.95	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.65	0.5	331.45	0.10
1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.5	336.91	0.11
2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.5	289.40	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.5	291.04	0.11
0	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.5	313.43	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.5	295.41	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.5	287.22	0.12
-1	345.6	600-710	0.78	1.95	0.88	0.5	322.16	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0	366.39	0.08
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0	322.16	0.09
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0	333.63	0.09
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0	369.13	0.08
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0	336.91	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0	321.62	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0	368.03	0.09
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0	363.12	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0	318.89	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0	323.80	0.10
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0	356.02	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0	326.53	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0	317.25	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0	359.29	0.10
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0	361.48	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0	320.52	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0	330.35	0.10
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0	359.30	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0	323.80	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0	319.98	0.11
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0	361.48	0.10
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0	368.10	0.10
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0	318.34	0.11
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0	324.90	0.11
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0	341.82	0.10
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0	325.44	0.11
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0	318.89	0.11

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0	354.38	0.10
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.3	363.12	0.08
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.3	318.89	0.09
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.3	331.45	0.09
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.3	367.49	0.08
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.3	333.63	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.3	320.52	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.3	364.75	0.09
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.3	359.29	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.3	315.61	0.10
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.3	321.62	0.10
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.3	354.38	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.3	323.80	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.3	315.07	0.10
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.3	356.56	0.09
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.3	357.66	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.3	317.25	0.10
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.3	329.26	0.09
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.3	357.66	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.3	320.50	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.3	318.89	0.10
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.3	358.20	0.09
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.3	365.30	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.3	316.16	0.10
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.3	323.26	0.09
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.3	339.64	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.3	322.16	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.3	317.25	0.10
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.3	351.65	0.09
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.5	357.66	0.08
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.5	315.61	0.09
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.5	327.08	0.09
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.5	363.21	0.08
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.5	330.90	0.09
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.5	315.61	0.09
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.15	0.5	359.30	0.09
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.5	354.93	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.5	312.35	0.10
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.5	317.25	0.10
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.5	350.01	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.5	320.52	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.5	310.70	0.10
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.38	0.5	351.65	0.09
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.5	352.74	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.5	313.97	0.10
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.5	323.80	0.10
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.5	352.74	0.09
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.5	317.25	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.5	313.97	0.10
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.65	0.5	352.74	0.09
1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.5	359.30	0.09
2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.5	311.79	0.10
1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.5	318.34	0.10
0	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.5	335.34	0.09

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.5	318.89	0.10
-2/3	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.5	312.33	0.10
-1	345.6	600-710	0.78	2.34	0.88	0.5	342.88	0.09
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0	113.03	0.08
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0	98.28	0.09
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0	100.47	0.09
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0	114.12	0.08
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0	98.28	0.09
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0	96.65	0.09
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0	114.67	0.09
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0	111.39	0.20
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0	92.82	0.21
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0	99.37	0.20
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0	103.20	0.20
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0	98.83	0.21
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0	93.37	0.21
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0	110.84	0.20
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0	108.11	0.18
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0	94.46	0.18
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0	96.65	0.18
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0	105.93	0.18
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0	95.56	0.18
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0	91.18	0.18
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0	108.11	0.18
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0	96.65	0.18
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0	91.18	0.18
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0	93.92	0.19

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0	99.92	0.18
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0	93.92	0.19
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0	91.73	0.18
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0	99.92	0.18
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0.3	108.66	0.17
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0.3	95.01	0.17
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0.3	96.65	0.17
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0.3	109.96	0.17
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0.3	95.01	0.17
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0.3	93.37	0.16
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.15	0.3	109.20	0.17
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0.3	106.35	0.15
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0.3	90.09	0.14
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0.3	95.01	0.14
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0.3	98.83	0.15
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0.3	95.56	0.14
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0.3	90.64	0.14
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.38	0.3	105.93	0.15
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0.3	103.20	0.15
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0.3	91.18	0.14
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0.3	93.92	0.14
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0.3	101.56	0.15
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0.3	92.28	0.14
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0.3	88.45	0.14
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.65	0.3	103.75	0.14
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0.3	92.28	0.17
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.27	0.88	0.3	88.45	0.18

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.3	90.64	0.16
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.3	96.65	0.17
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.3	90.10	0.16
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.3	86.82	0.18
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.3	95.53	0.17
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.15	0.5	104.29	0.14
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.15	0.5	91.73	0.15
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.15	0.5	93.92	0.16
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.15	0.5	107.57	0.14
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.15	0.5	92.28	0.16
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.15	0.5	89.00	0.15
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.15	0.5	107.02	0.14
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.38	0.5	102.65	0.18
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.38	0.5	86.82	0.19
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.38	0.5	92.28	0.19
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.38	0.5	96.09	0.19
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.38	0.5	90.64	0.19
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.38	0.5	86.82	0.19
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.38	0.5	102.53	0.18
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.65	0.5	100.47	0.17
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.65	0.5	88.45	0.16
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.65	0.5	90.09	0.17
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.65	0.5	99.92	0.17
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.65	0.5	87.91	0.17
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.65	0.5	83.54	0.17
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.65	0.5	99.92	0.17
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.5	88.45	0.17

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.5	84.63	0.17
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.5	87.36	0.18
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.5	95.01	0.18
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.5	84.06	0.18
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.5	81.90	0.17
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.27	0.88	0.5	92.28	0.18
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0	145.79	0.15
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0	134.32	0.16
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0	143.06	0.14
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0	149.61	0.14
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0	142.51	0.15
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0	133.78	0.16
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0	147.43	0.14
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0	143.61	0.14
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0	125.59	0.14
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0	131.05	0.14
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0	138.15	0.14
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0	133.23	0.14
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0	126.13	0.14
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0	144.15	0.14
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0	140.88	0.18
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0	127.77	0.18
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0	129.96	0.18
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0	141.42	0.17
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0	128.32	0.18
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0	125.59	0.18
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0	140.88	0.18

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.88	0	129.96	0.19
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.88	0	123.95	0.20
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.88	0	126.13	0.20
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.88	0	137.32	0.18
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.88	0	126.13	0.20
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.88	0	125.04	0.20
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.88	0	132.68	0.19
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0.3	137.60	0.16
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0.3	122.31	0.16
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0.3	125.04	0.15
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0.3	140.33	0.15
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0.3	122.86	0.15
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0.3	120.67	0.16
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.15	0.3	139.24	0.16
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0.3	137.16	0.19
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0.3	117.94	0.19
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0.3	122.86	0.20
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0.3	129.96	0.18
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0.3	122.86	0.20
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0.3	118.49	0.20
-1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.38	0.3	135.96	0.19
1	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0.3	132.68	0.15
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0.3	120.13	0.16
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0.3	124.49	0.16
0	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0.3	132.68	0.16
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0.3	120.13	0.16
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	1.905	0.65	0.3	116.31	0.16

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.65	0.3	132.68	0.15
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.3	121.22	0.15
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.3	117.94	0.17
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.3	121.77	0.16
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.3	126.13	0.15
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.3	121.22	0.16
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.3	117.95	0.17
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.3	124.51	0.15
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.15	0.5	131.05	0.14
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.15	0.5	119.58	0.14
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.15	0.5	122.86	0.14
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.15	0.5	138.16	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.15	0.5	119.58	0.14
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.15	0.5	116.30	0.14
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.15	0.5	133.23	0.14
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.38	0.5	129.96	0.18
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.38	0.5	116.85	0.18
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.38	0.5	122.26	0.17
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.38	0.5	126.13	0.17
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.38	0.5	122.31	0.17
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.38	0.5	117.39	0.18
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.38	0.5	129.41	0.17
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.65	0.5	125.59	0.15
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.65	0.5	116.31	0.16
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.65	0.5	121.22	0.17
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.65	0.5	129.42	0.16
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.65	0.5	116.85	0.16

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.65	0.5	111.39	0.16
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.65	0.5	126.68	0.15
1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.5	115.12	0.15
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.5	111.39	0.16
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.5	115.21	0.15
0	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.5	122.86	0.15
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.5	111.93	0.16
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.5	109.20	0.16
-1	345.6	710 - 1000	1.27	1.905	0.88	0.5	117.95	0.15
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0	186.20	0.16
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0	174.19	0.16
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0	183.47	0.14
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0	191.09	0.15
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0	183.47	0.15
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0	173.09	0.15
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0	187.28	0.15
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0	183.47	0.15
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0	165.45	0.16
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0	172.00	0.16
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0	180.74	0.14
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0	173.64	0.15
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0	166.00	0.16
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0	183.47	0.15
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0	182.38	0.14
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0	166.54	0.15
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0	169.81	0.15
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0	183.47	0.14

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0	168.72	0.15
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0	164.90	0.15
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0	180.19	0.14
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0	184.47	0.12
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0	164.13	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0	172.42	0.12
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0	176.91	0.10
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0	167.63	0.12
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0	163.81	0.14
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0	172.58	0.12
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0.3	176.91	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0.3	164.36	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0.3	175.27	0.12
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0.3	185.12	0.12
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0.3	175.82	0.12
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0.3	164.36	0.12
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.15	0.3	176.37	0.12
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0.3	173.09	0.15
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0.3	155.62	0.17
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0.3	164.36	0.15
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0.3	174.19	0.14
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0.3	165.78	0.16
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0.3	156.17	0.17
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.38	0.3	173.64	0.15
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0.3	172.00	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0.3	157.28	0.14
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.65	0.3	162.17	0.13

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.3	176.91	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.3	160.47	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.3	156.17	0.14
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.3	170.36	0.12
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.3	159.44	0.12
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.3	153.43	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.3	159.44	0.11
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.3	170.91	0.10
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.3	158.90	0.12
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.3	153.98	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.3	161.63	0.12
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.15	0.5	168.18	0.14
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.15	0.5	157.26	0.15
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.15	0.5	170.36	0.15
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.15	0.5	180.77	0.14
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.15	0.5	170.91	0.15
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.15	0.5	156.71	0.15
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.15	0.5	168.72	0.14
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.38	0.5	165.98	0.15
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.38	0.5	149.61	0.16
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.38	0.5	158.63	0.16
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.38	0.5	168.18	0.15
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.38	0.5	160.53	0.16
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.38	0.5	149.07	0.17
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.38	0.5	165.45	0.15
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.5	162.17	0.14
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.5	151.25	0.14

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.5	157.26	0.14
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.5	172.55	0.14
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.5	155.62	0.14
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.5	149.61	0.15
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.65	0.5	161.63	0.14
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	150.16	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	146.88	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	154.53	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	166.00	0.12
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	153.98	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	147.43	0.14
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	153.98	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	211.33	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	192.81	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.95	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	217.87	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.95	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	193.30	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	210.77	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	207.49	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	185.65	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	195.27	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.95	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	196.57	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	184.56	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	208.59	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	203.10	0.13

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	186.74	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	193.84	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	209.13	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	191.66	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	185.65	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	204.76	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	209.13	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	184.02	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	190.02	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	202.58	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	190.57	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	183.47	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	196.57	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.40	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	190.63	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	203.13	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	214.59	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	203.13	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	189.47	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.95	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	202.79	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	181.83	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	192.21	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	202.58	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	193.30	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	182.38	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	202.58	0.13

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	201.49	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	183.47	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	190.57	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	205.86	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	188.38	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	181.83	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	200.40	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	204.76	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	180.74	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	186.74	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	200.31	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	187.29	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	179.64	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	192.21	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	199.30	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	184.56	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	199.85	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	210.77	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	200.39	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	185.11	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	200.39	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	197.18	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	176.91	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	188.38	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	199.85	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	190.02	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	177.46	0.13

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	196.57	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	194.93	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	178.01	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	187.29	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	203.13	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	185.65	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	176.91	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	193.84	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	198.21	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	175.81	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	183.47	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	196.57	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	184.02	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	175.28	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	184.56	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	234.80	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	210.77	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	227.70	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	239.16	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	227.15	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	211.86	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	234.24	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	230.97	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	203.13	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	216.23	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	228.25	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	217.87	0.13

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	208.59	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	225.51	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	229.34	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	204.76	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	215.14	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	230.97	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	212.41	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	208.59	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	227.70	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	232.55	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	201.49	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	211.32	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	224.42	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	210.77	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	201.49	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	217.32	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	228.25	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.40	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	222.78	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	235.89	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	223.33	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.40	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	227.15	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	224.97	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	198.21	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	211.32	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	224.51	0.13

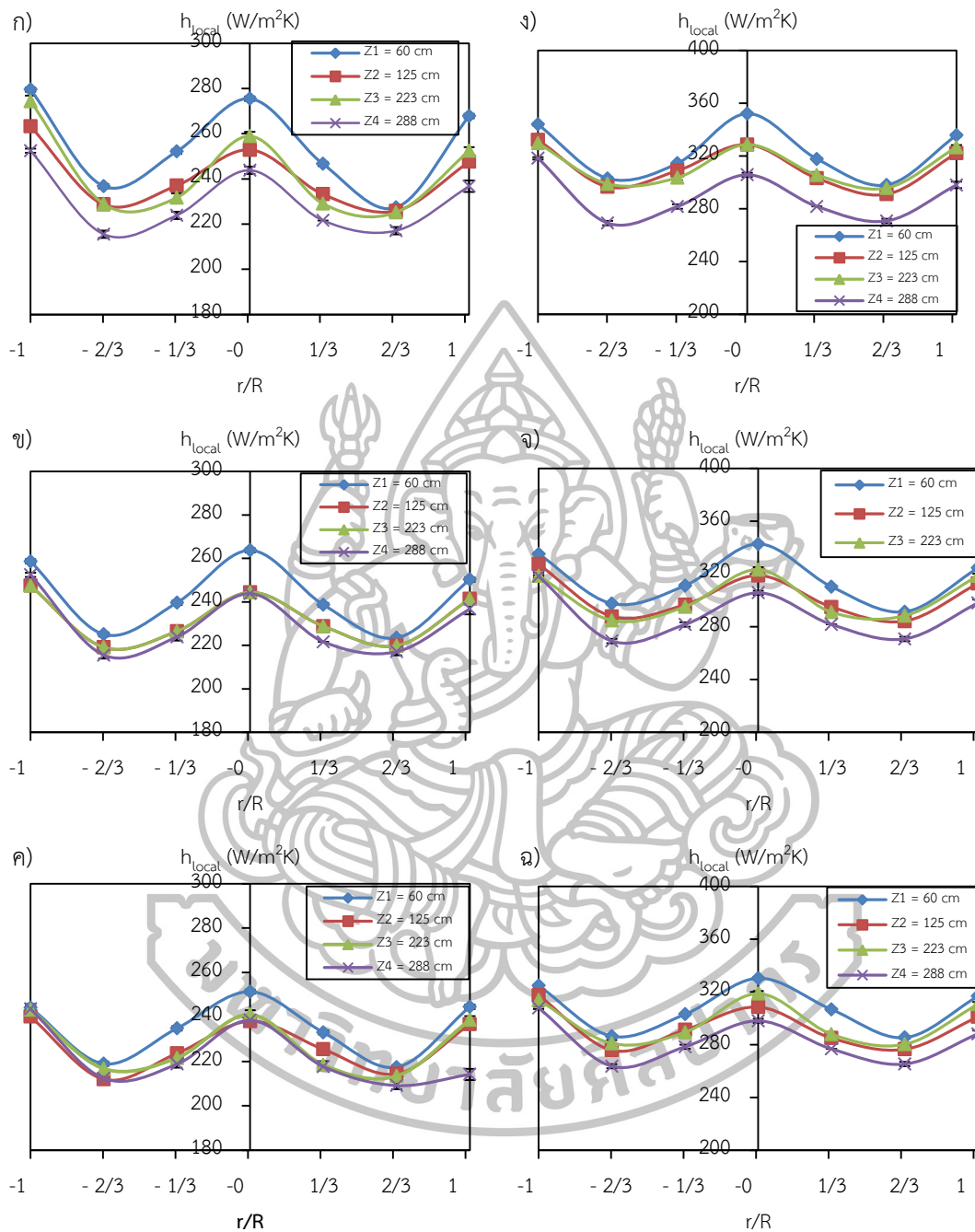
ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	212.95	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	203.67	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	219.62	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	223.36	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	199.85	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	209.68	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	227.15	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	207.49	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	203.13	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	221.14	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	226.06	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	197.12	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.40	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	220.60	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.40	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	196.57	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	210.77	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	221.17	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	201.16	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	218.40	0.13
0	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	230.97	0.13
-1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	218.41	0.13
-2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	201.49	0.13
-1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	220.60	0.13
1	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	217.87	0.13
2/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	193.30	0.13
1/3	345.6	710 - 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.93	0.13

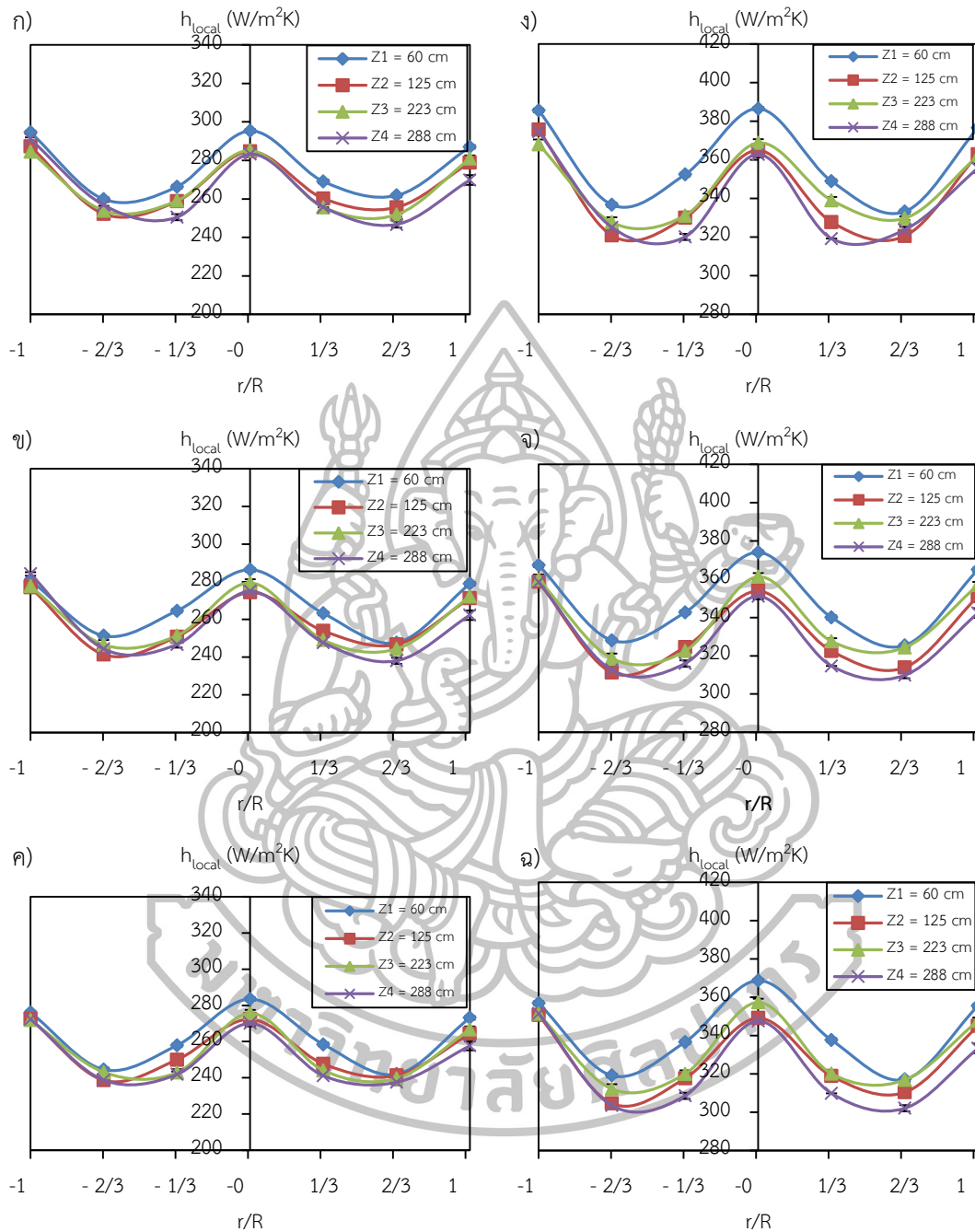
ตารางที่ ง.1 แสดงผลการทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของ $Sw = 2.98$ (ต่อ)

r/R	T_b (C)	d_p (μm)	U_{mf} (m/s)	U_{PA} (m/s)	Z/Z_T	$(Q_S+Q_T)/Q_P$	h_{local} ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	h_r ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	219.51	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	207.49	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	198.76	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	217.90	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	216.23	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	195.48	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	204.22	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	222.78	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	203.13	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	198.67	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	215.14	0.13
1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	219.51	0.13
2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	192.21	0.13
1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	200.94	0.13
0	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	216.24	0.13
-1/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	201.49	0.13
-2/3	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	191.11	0.13
-1	345.6	710 – 1000	1.27	2.54	0.88	0.5	206.40	0.13

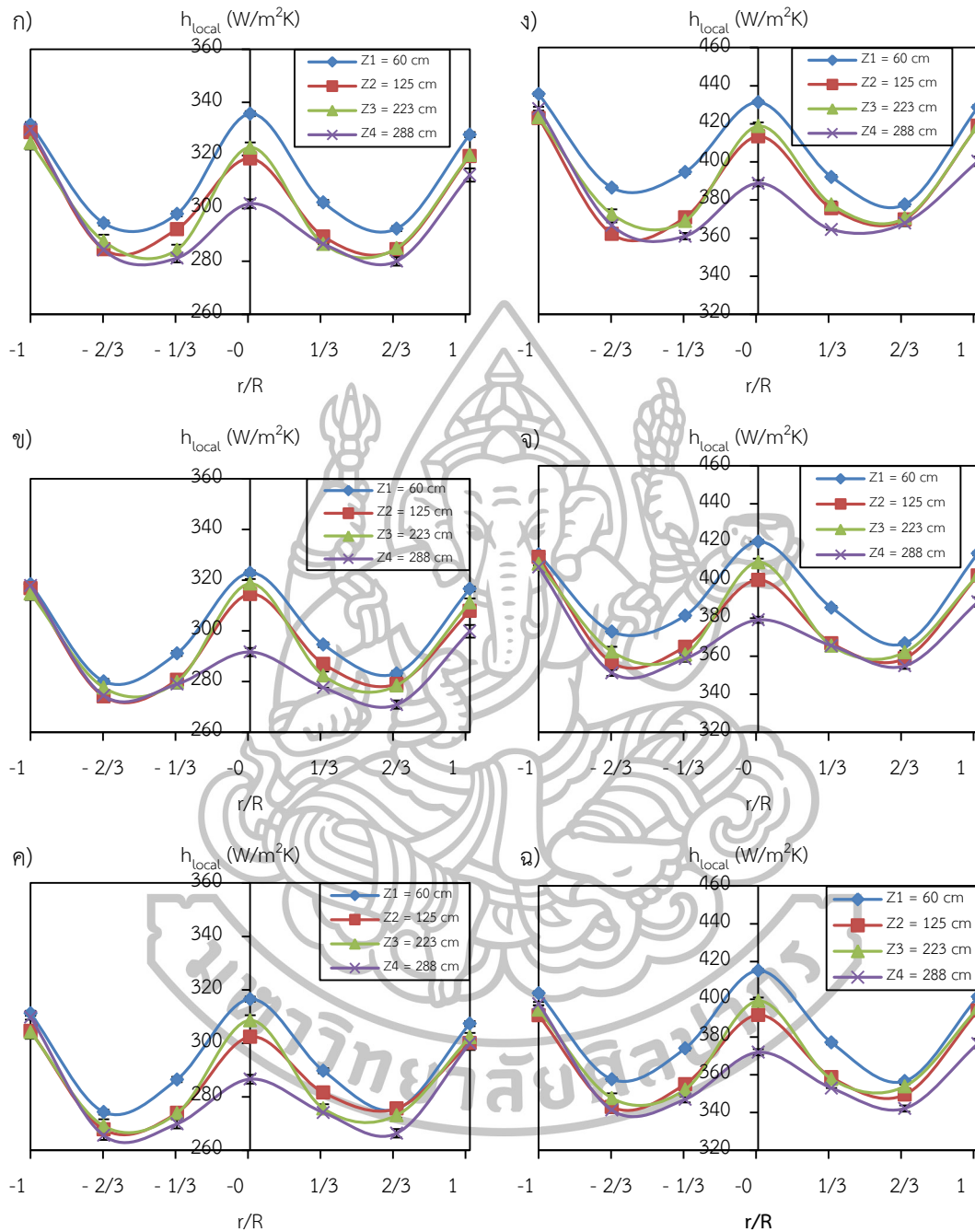




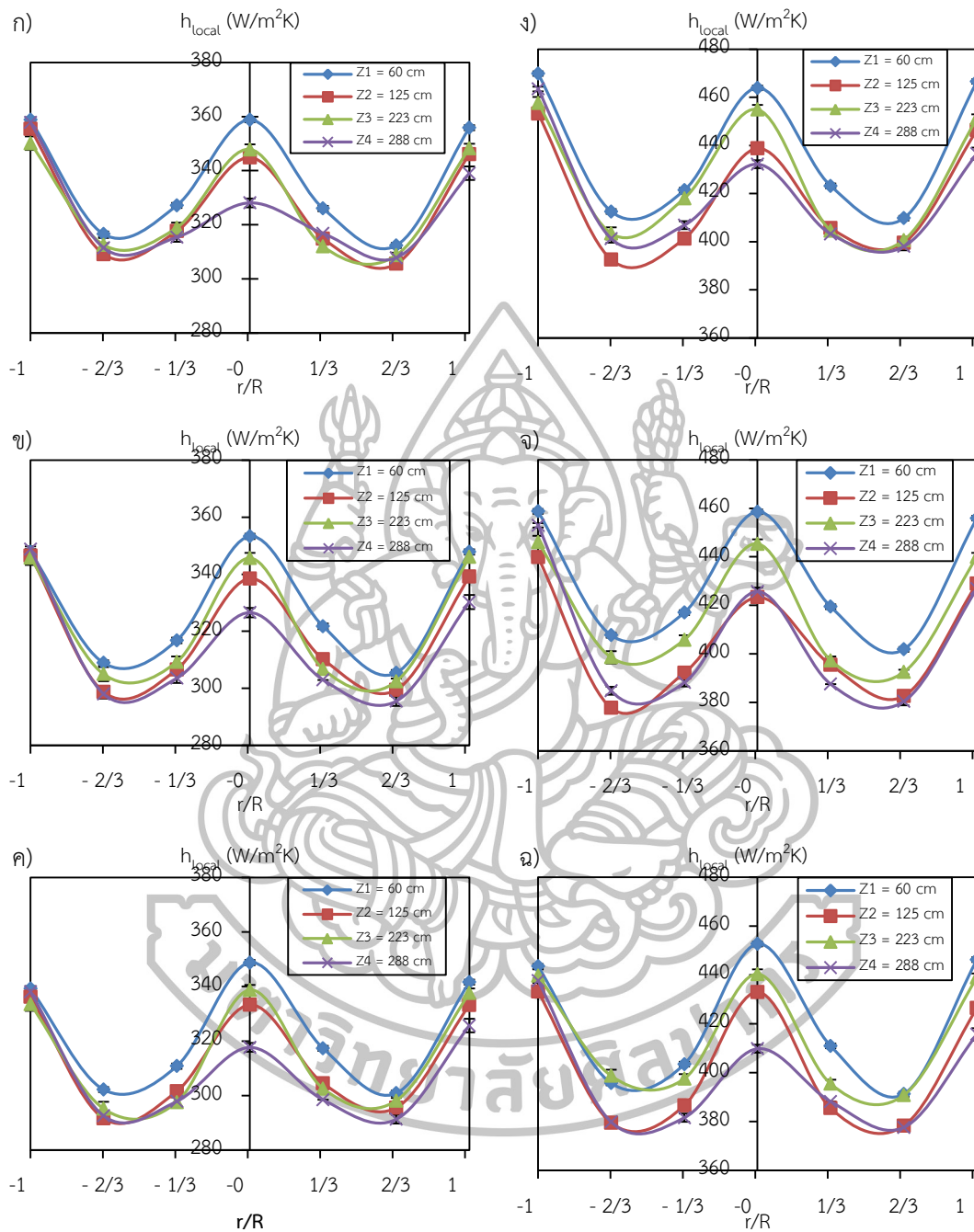
รูปที่ จ.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm $U/U_{mf} = 1$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฏุนภูมิและที่ Swirl number = 2.98 ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



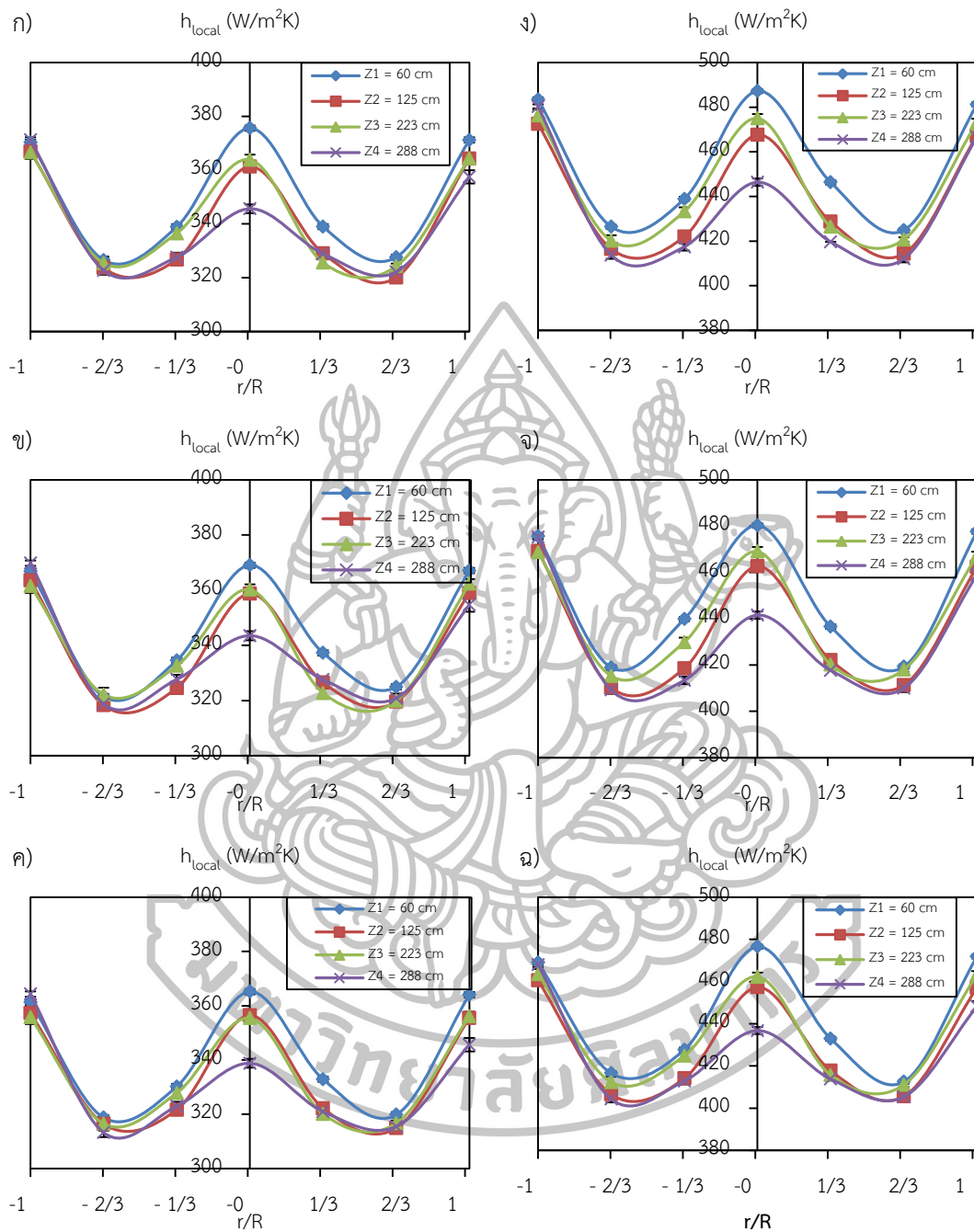
รูปที่ จ.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm สำหรับ $U/U_{mf} = 1.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $\eta[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ Swirl number = 2.98 ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ ฉ) และ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



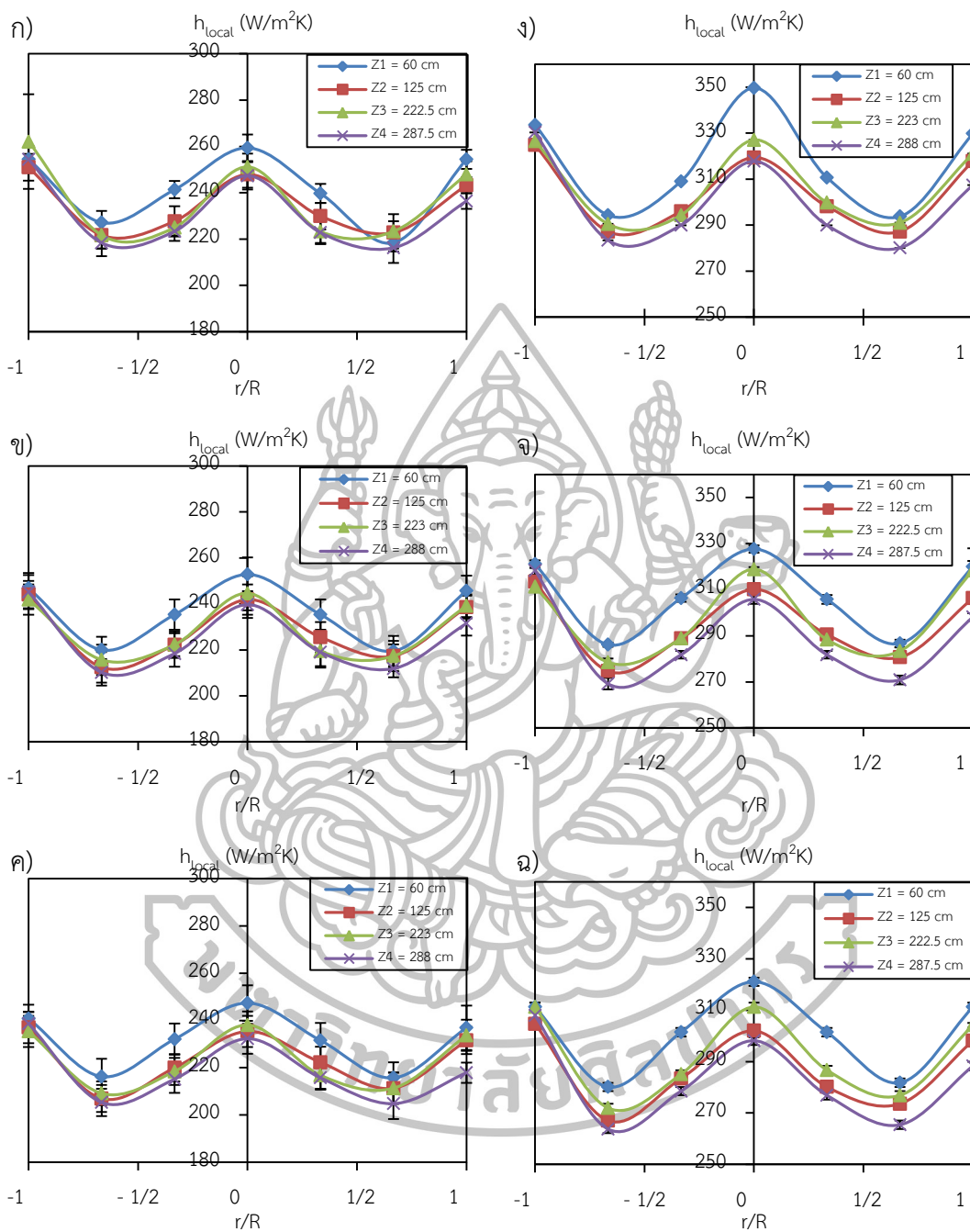
รูปที่ จ.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm สำหรับ $U/U_{mf} = 2$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ Swirl number = 2.98 ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



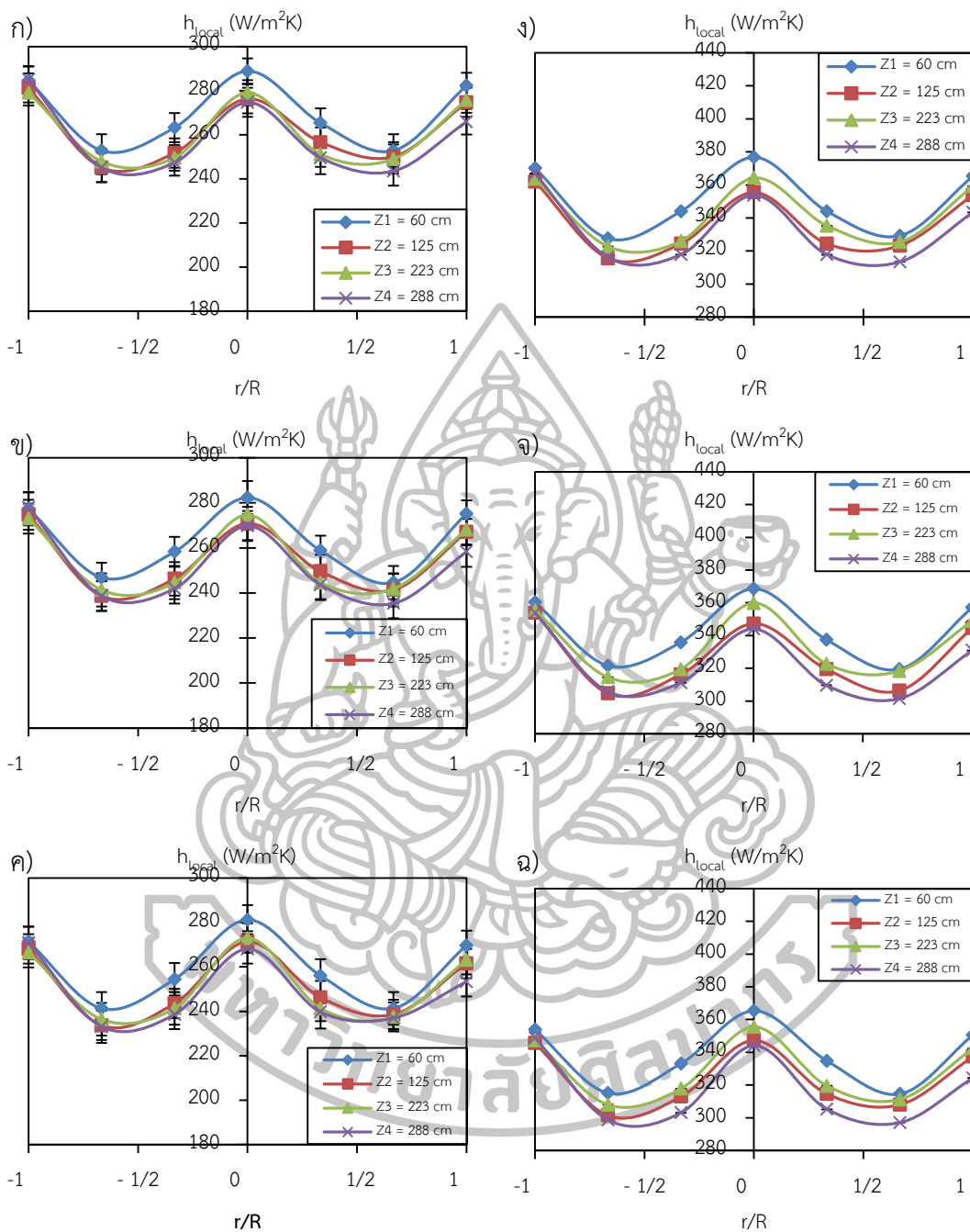
รูปที่ จ.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมนุมุมและที่ Swirl number = 2.98 ง) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



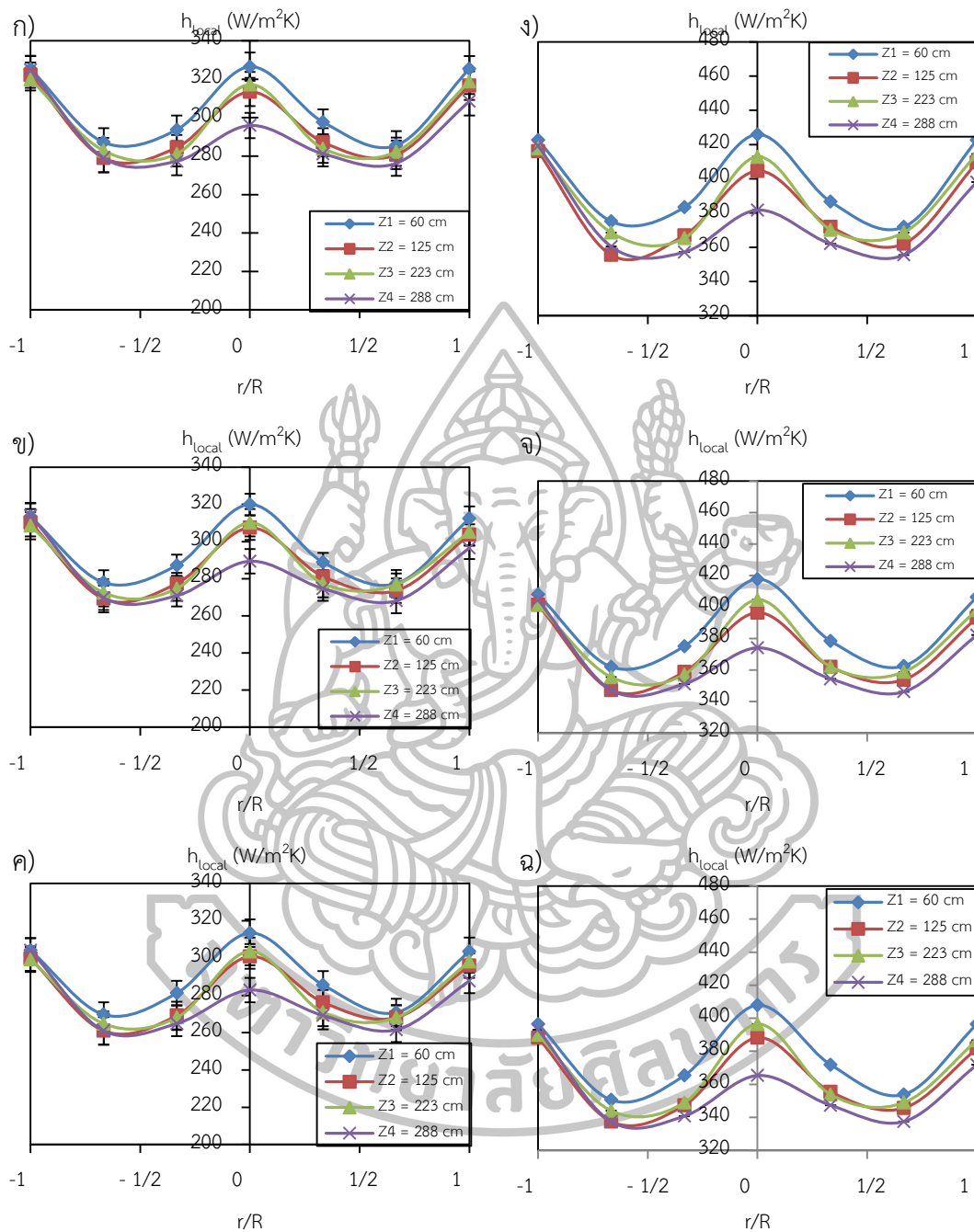
รูปที่ จ.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm สำหรับ $U/U_{mf} = 3$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพ้อนอากาศปฐมภูมิและที่ Swirl number = 2.98 เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



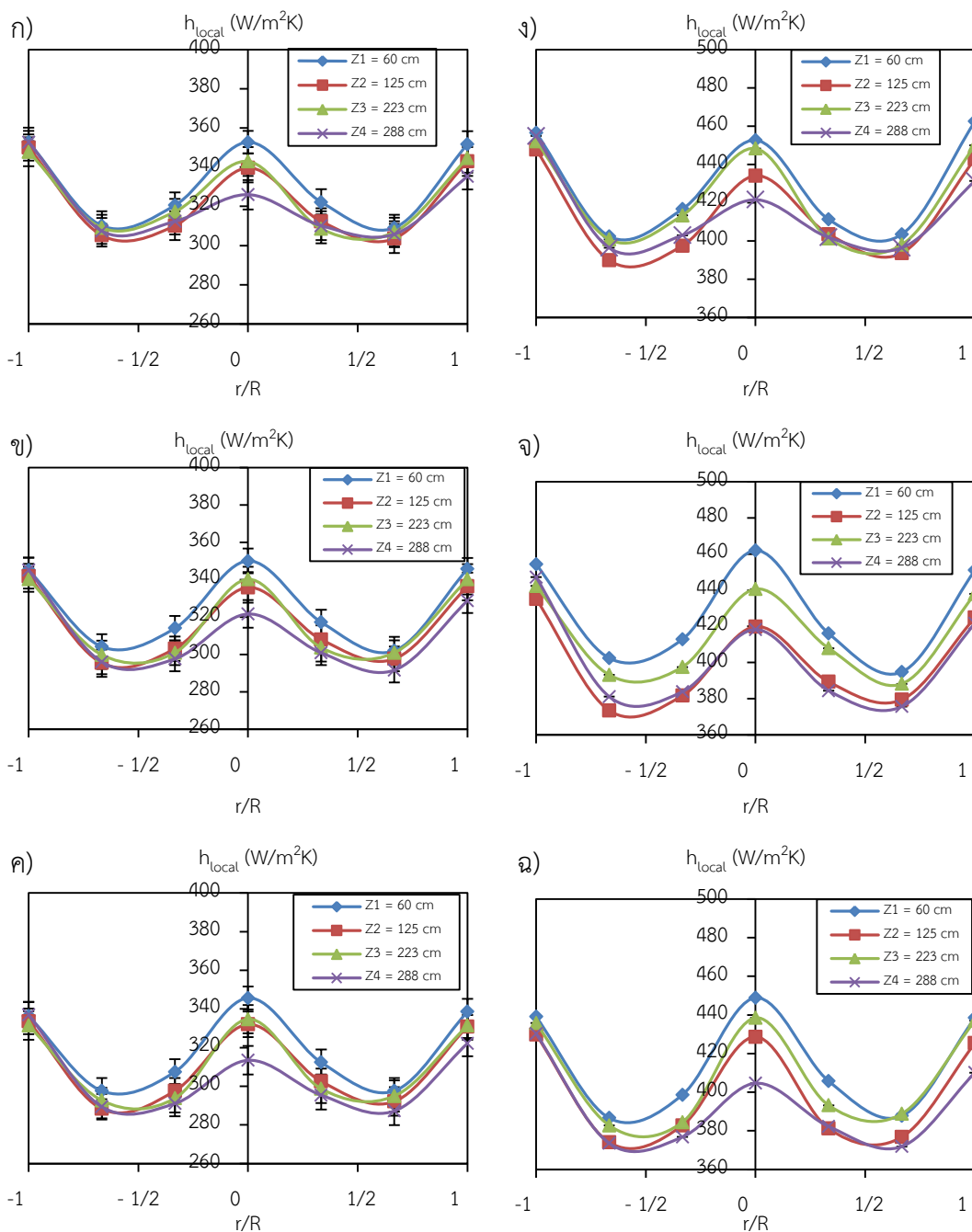
รูปที่ จ.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค $600\text{--}710\ \mu\text{m}$ $U/U_{mf} = 1$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ Swirl number = 2.98 เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



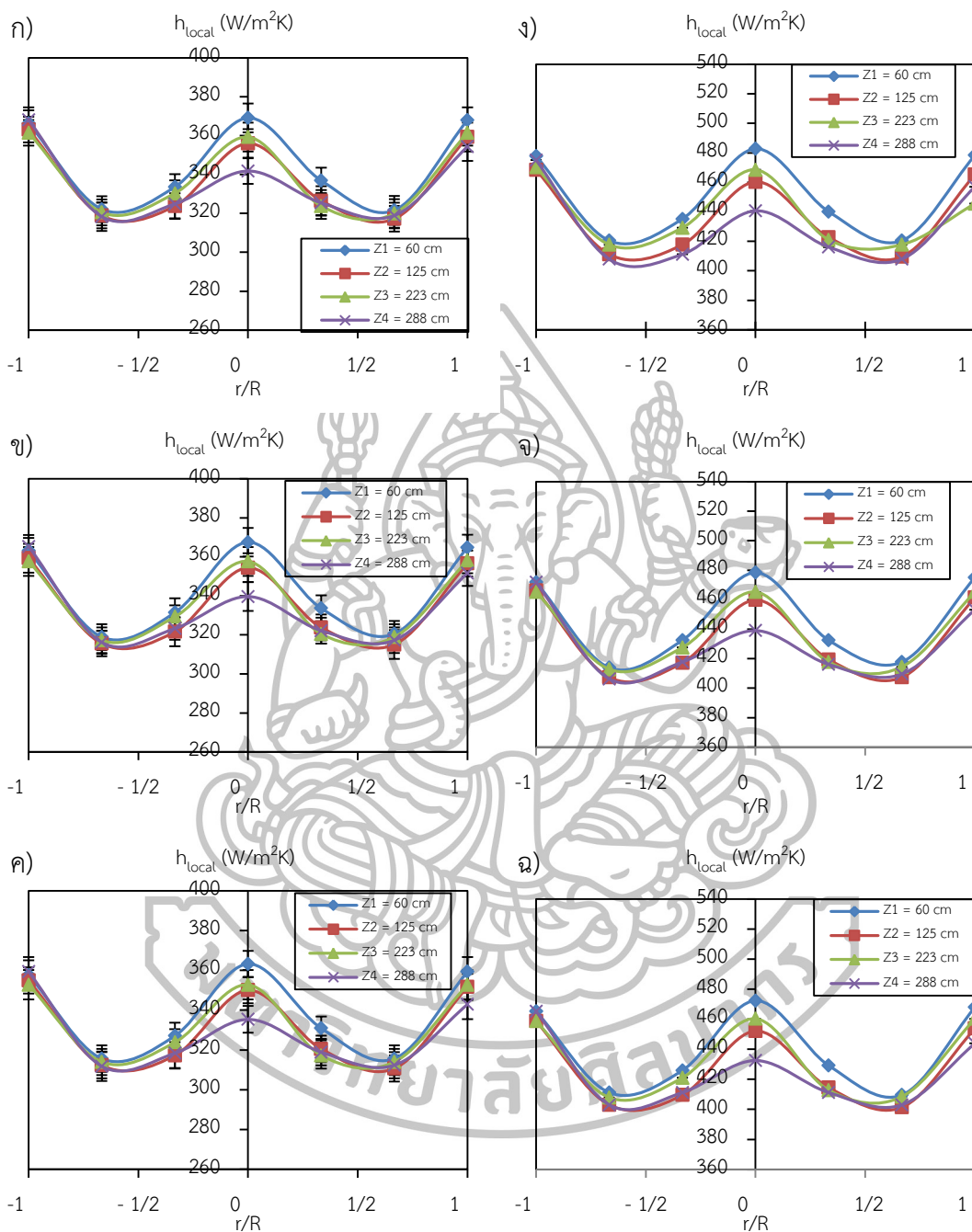
รูปที่ จ.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm $U/U_{mf} = 1.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฏุนุมุมและที่ Swirl number = 2.98 ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



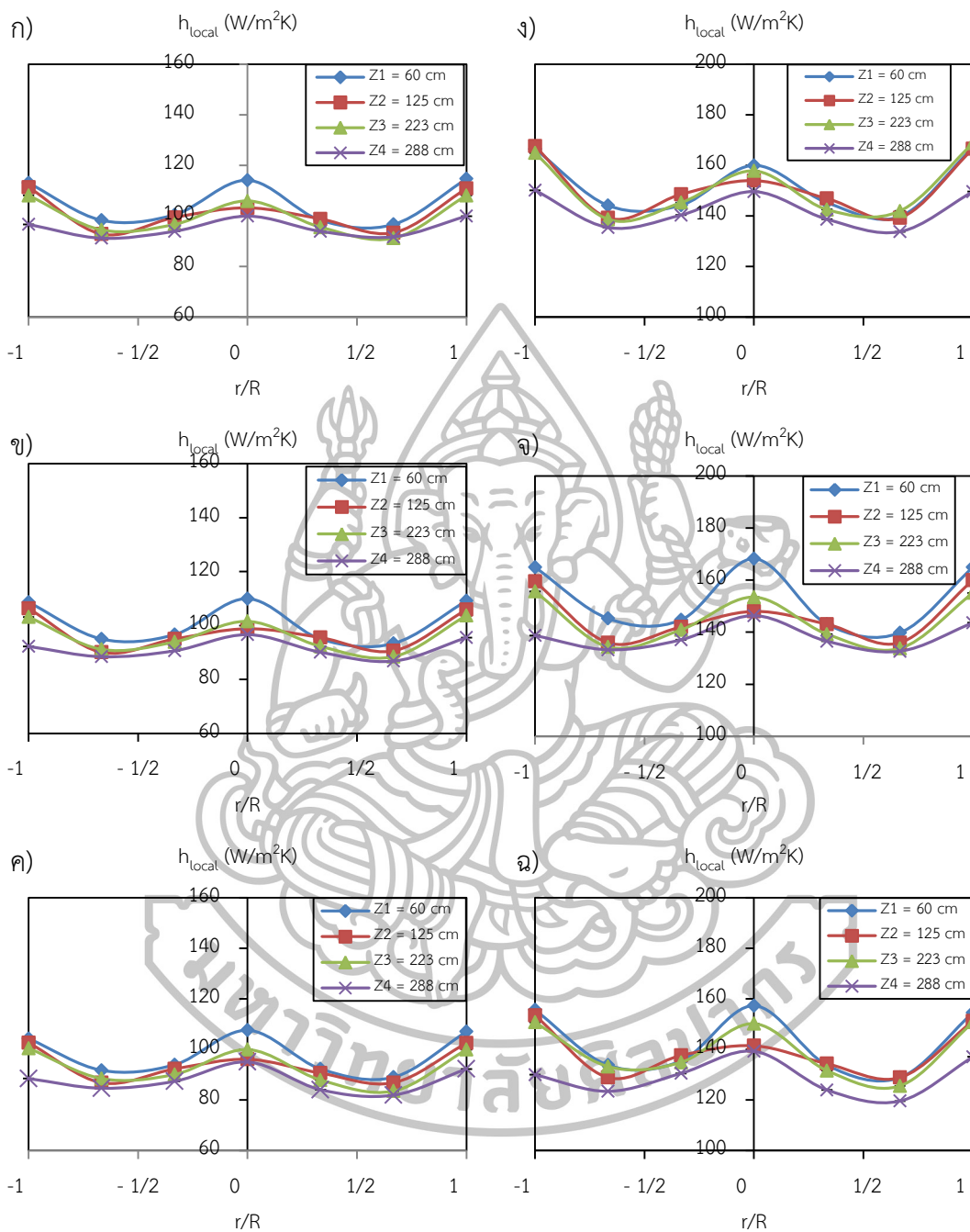
รูปที่ ๘.๘ กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm $U/U_{mf} = 2$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ Swirl number = 2.98 ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



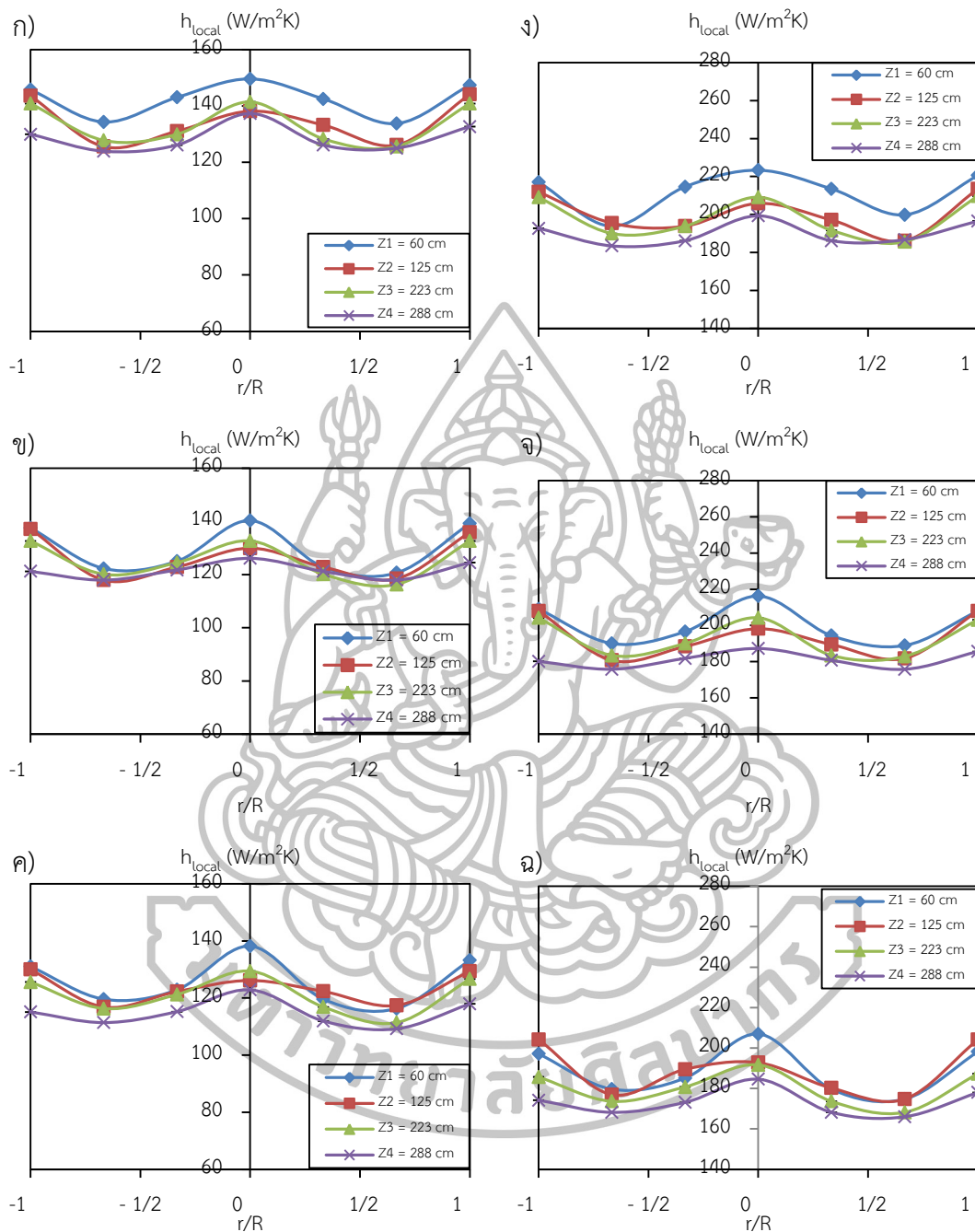
รูปที่ จ.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm ที่ $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



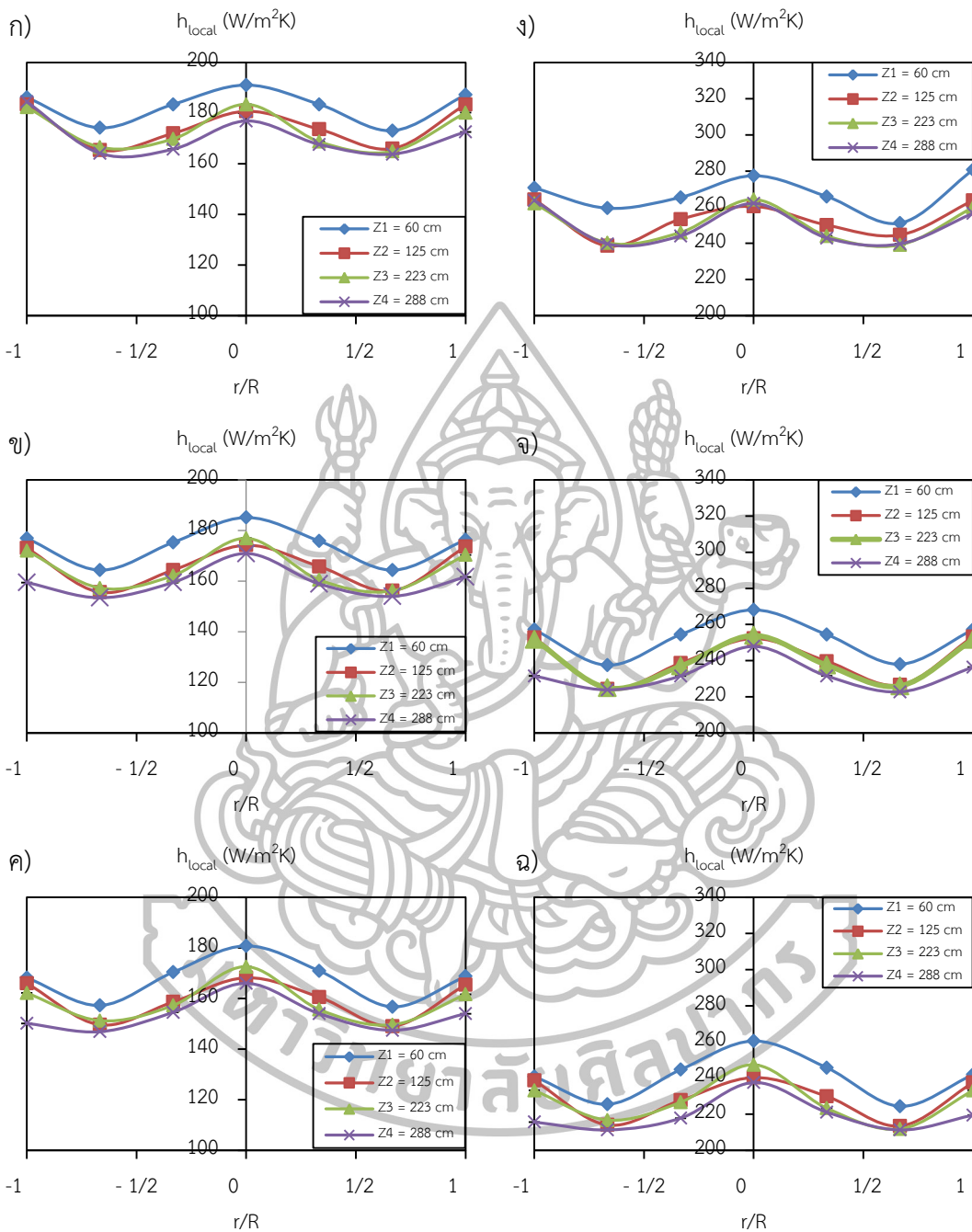
รูปที่ จ.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm $U/U_{mf} = 3$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



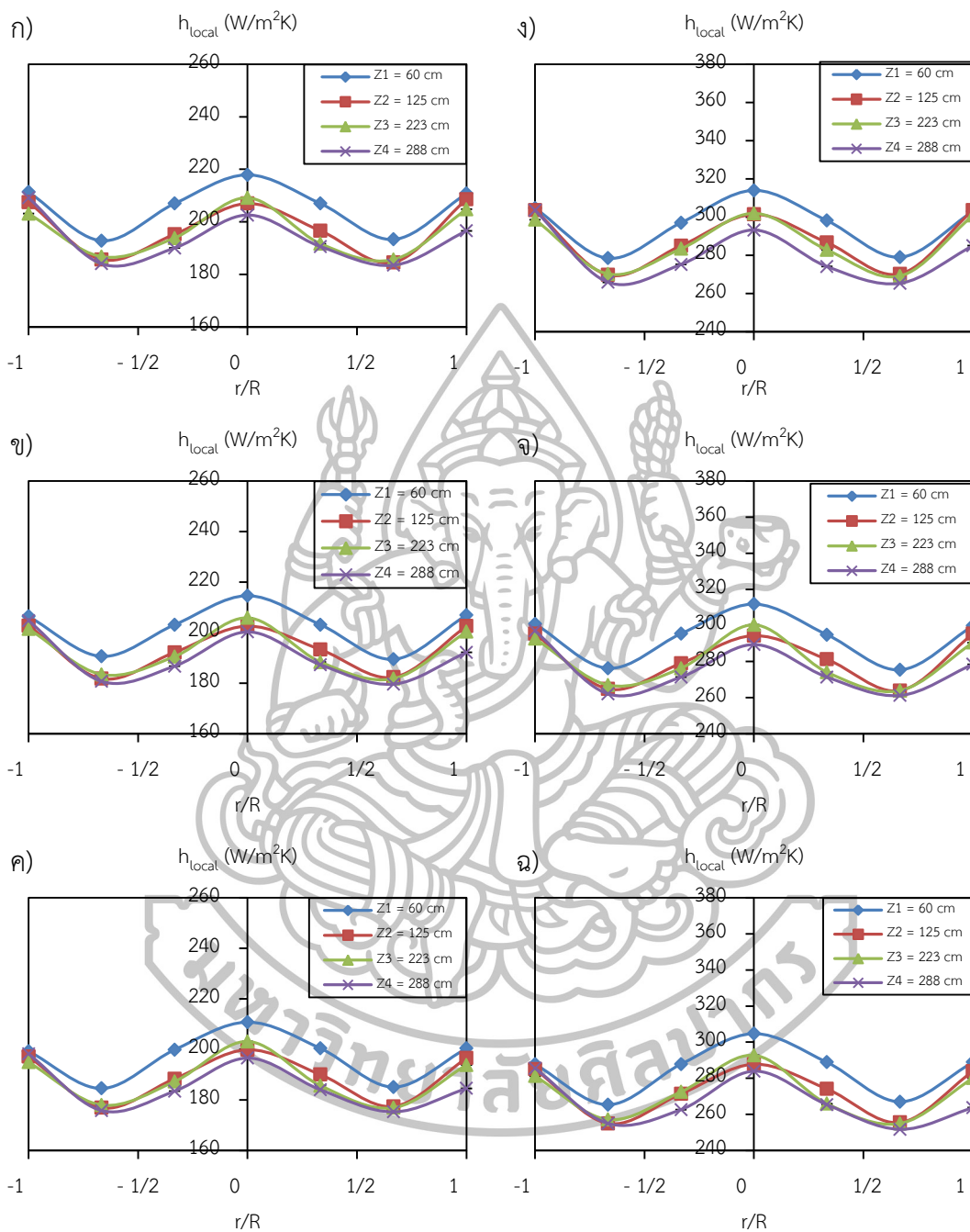
รูปที่ จ.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค $710 - 1000 \mu\text{m}$ สำหรับ $U/U_{mf} = 1$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



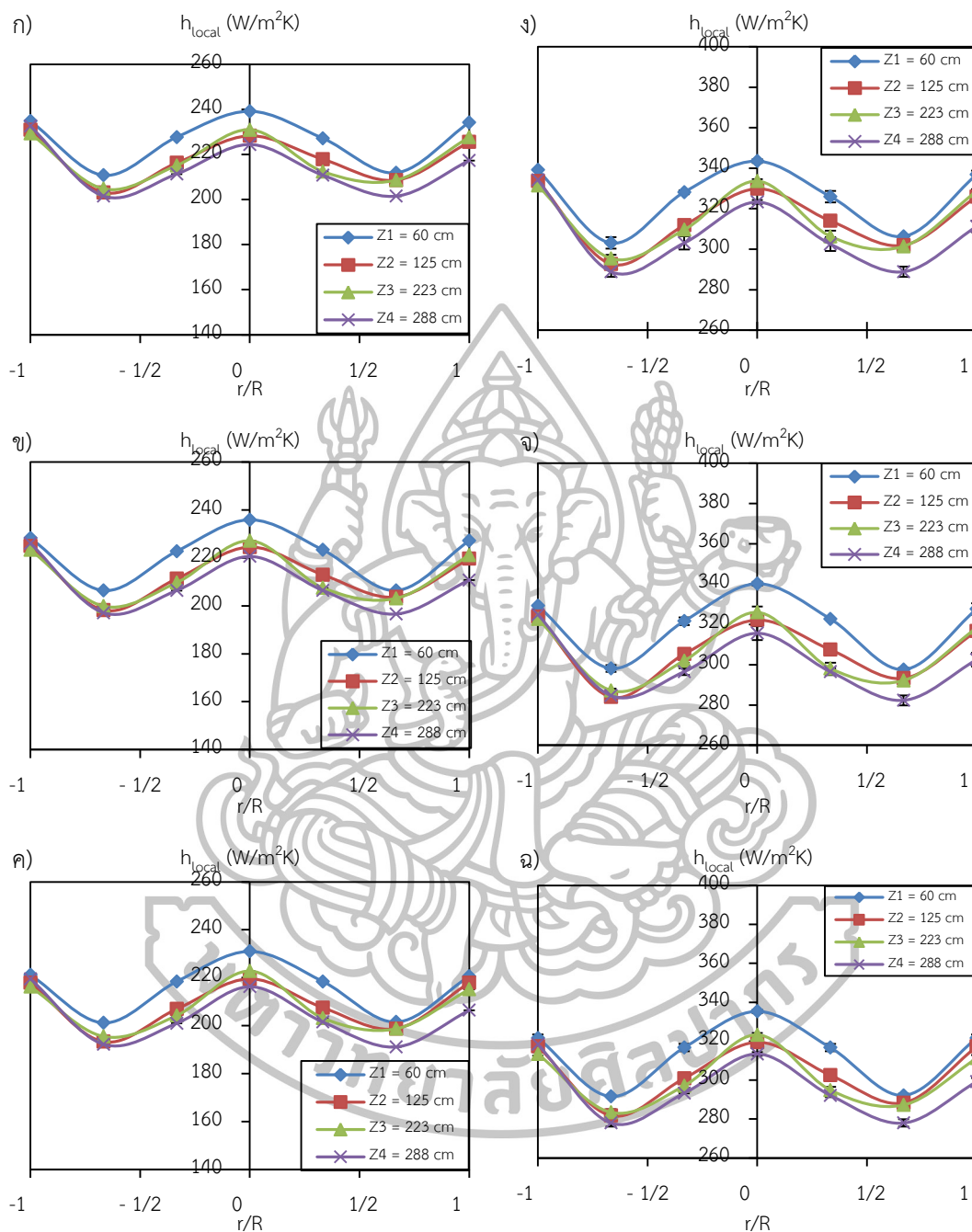
รูปที่ จ.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710–1000 μm $U/U_{mf} = 1.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมนุมิและที่ $S_w = 2.98$ ง) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



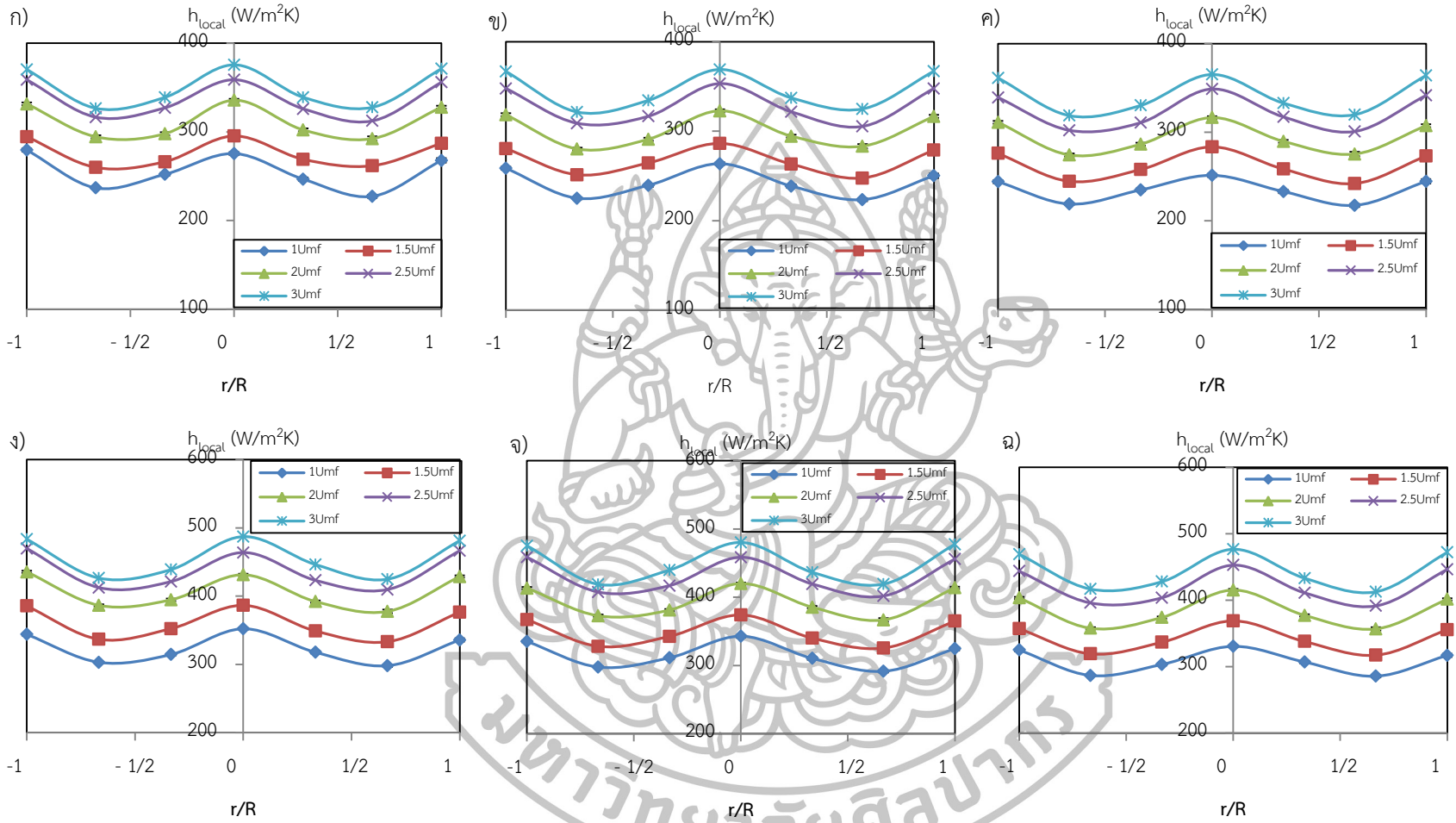
รูปที่ จ.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710–1000 μm สำหรับ $U/U_{mf} = 2$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_t)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



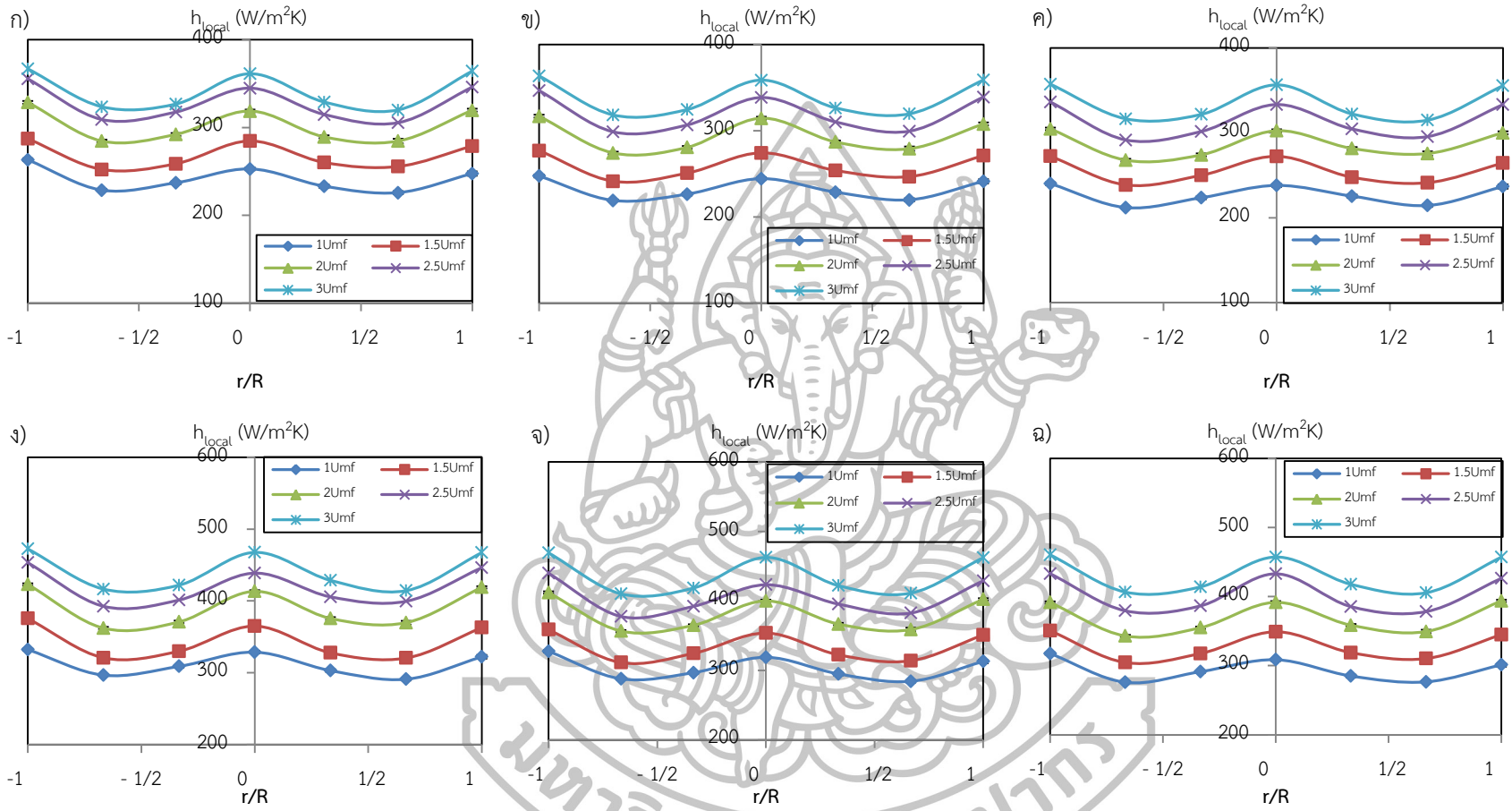
รูปที่ จ.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค $710 - 1000 \mu\text{m}$ สำหรับ $U/U_{mf} = 2.5$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ Swirl number = 2.98 ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



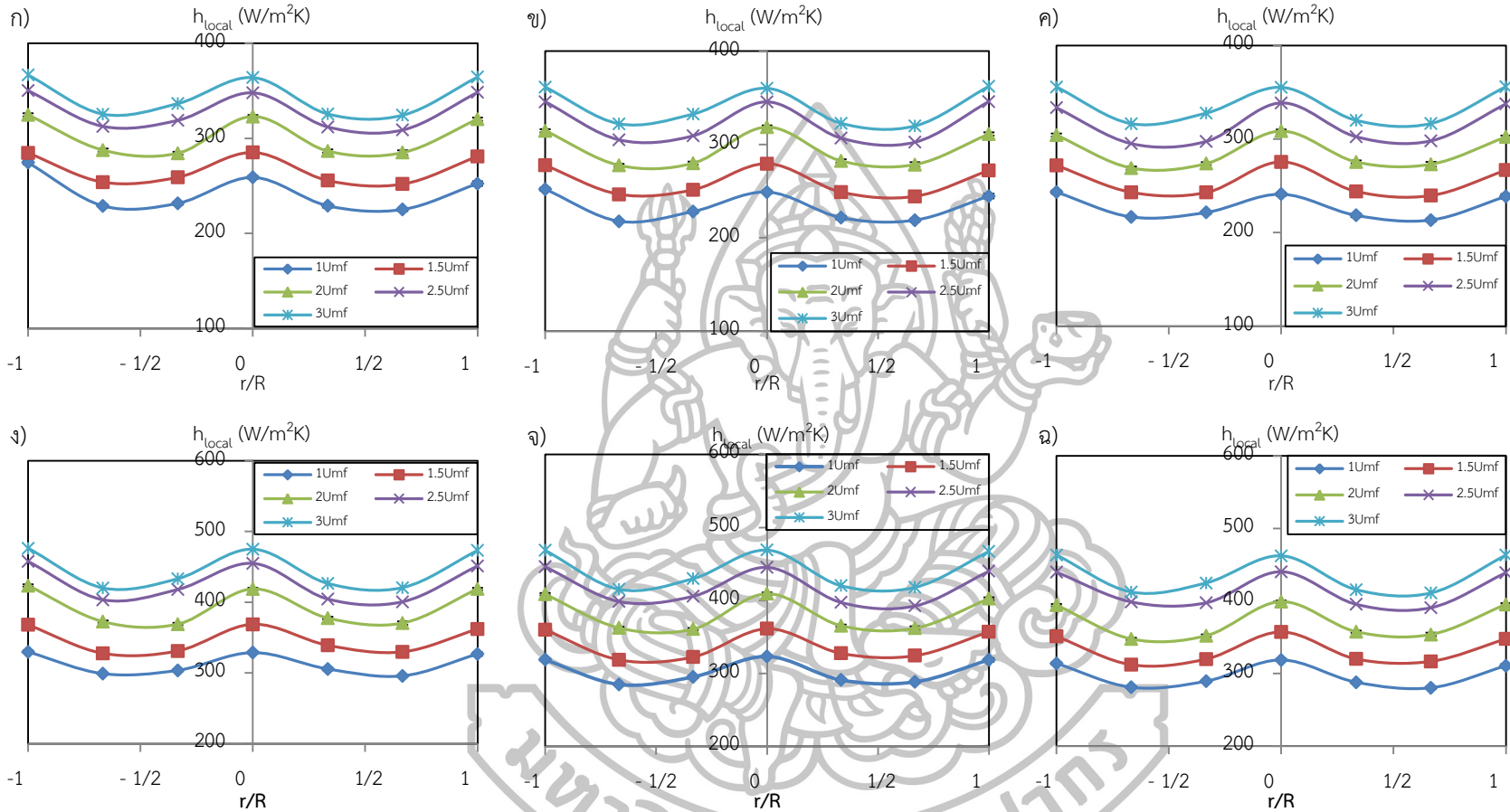
รูปที่ จ.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ r/R และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710–1000 μm $U/U_{mf} = 3$ โดยใบพัด $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ค) ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ Swirl number = 2.98 ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ



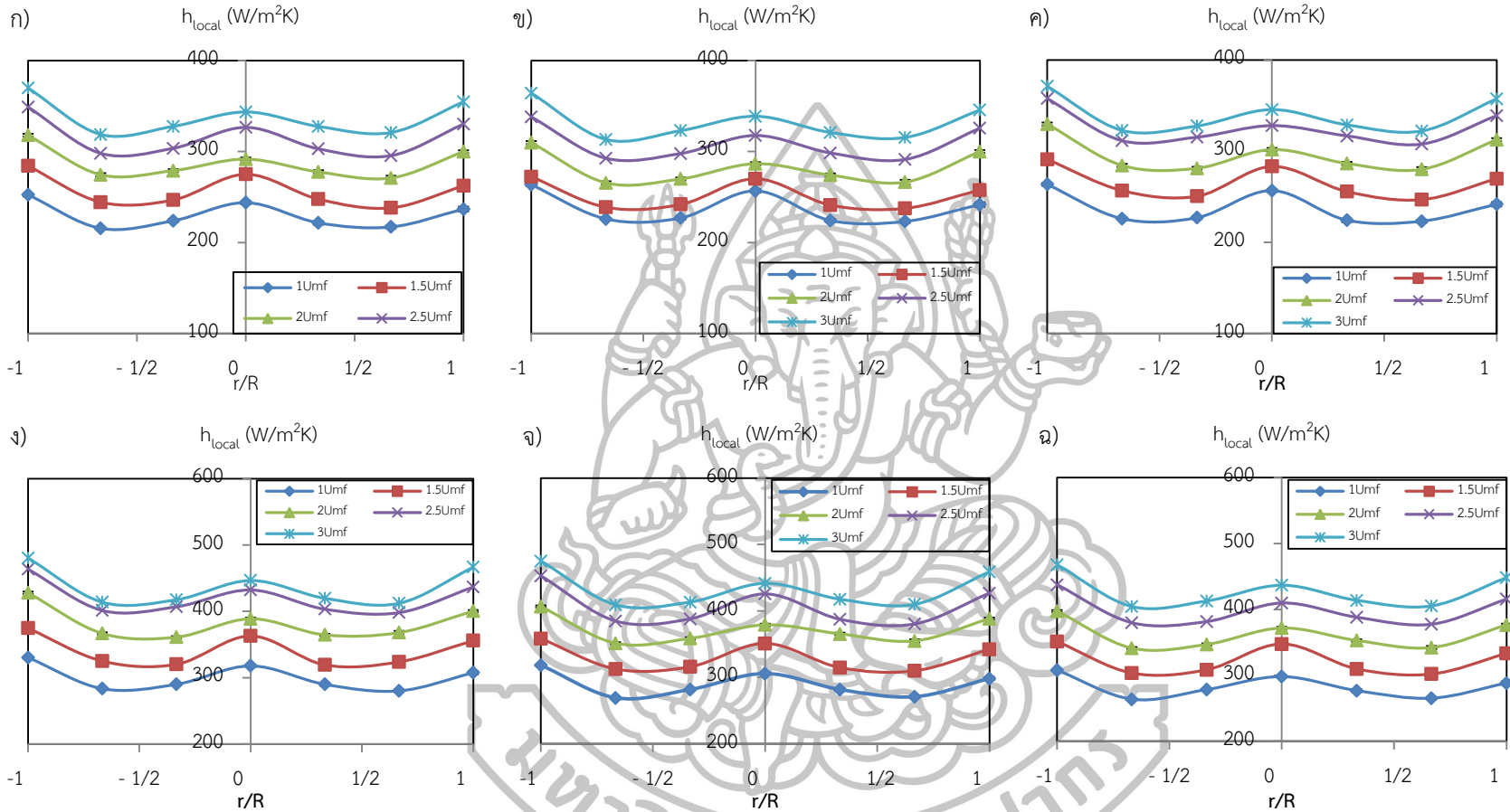
รูปที่ จ.16 แสดงผลของความเร็วมวลอากาศปฐภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$, ข) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$, และ ค) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$, จ) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 60 cm จากหัวกระจายอากาศ



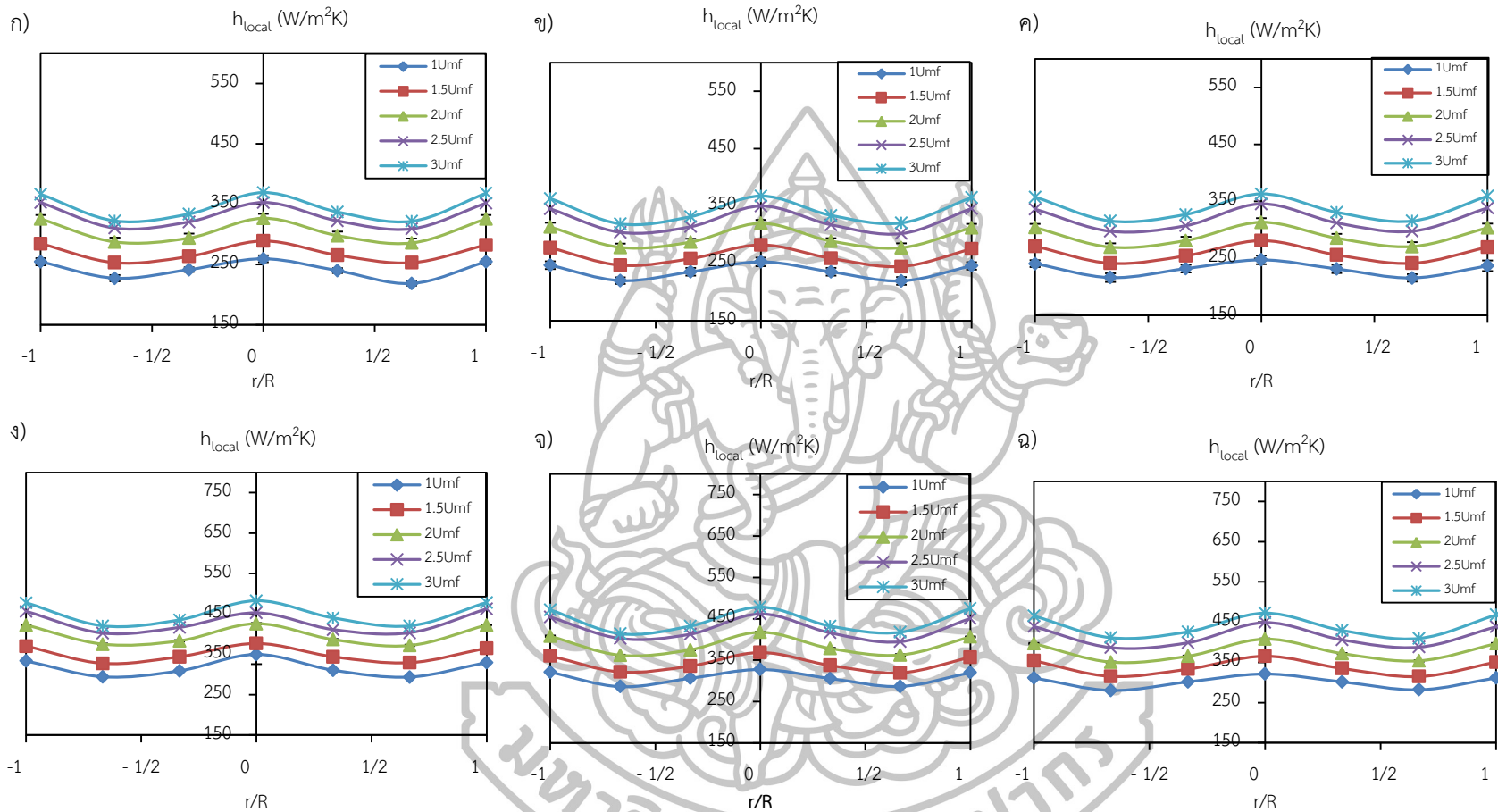
รูปที่ จ.17 แสดงผลของความเร็วอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 125cm จากหัวกระจายอากาศ



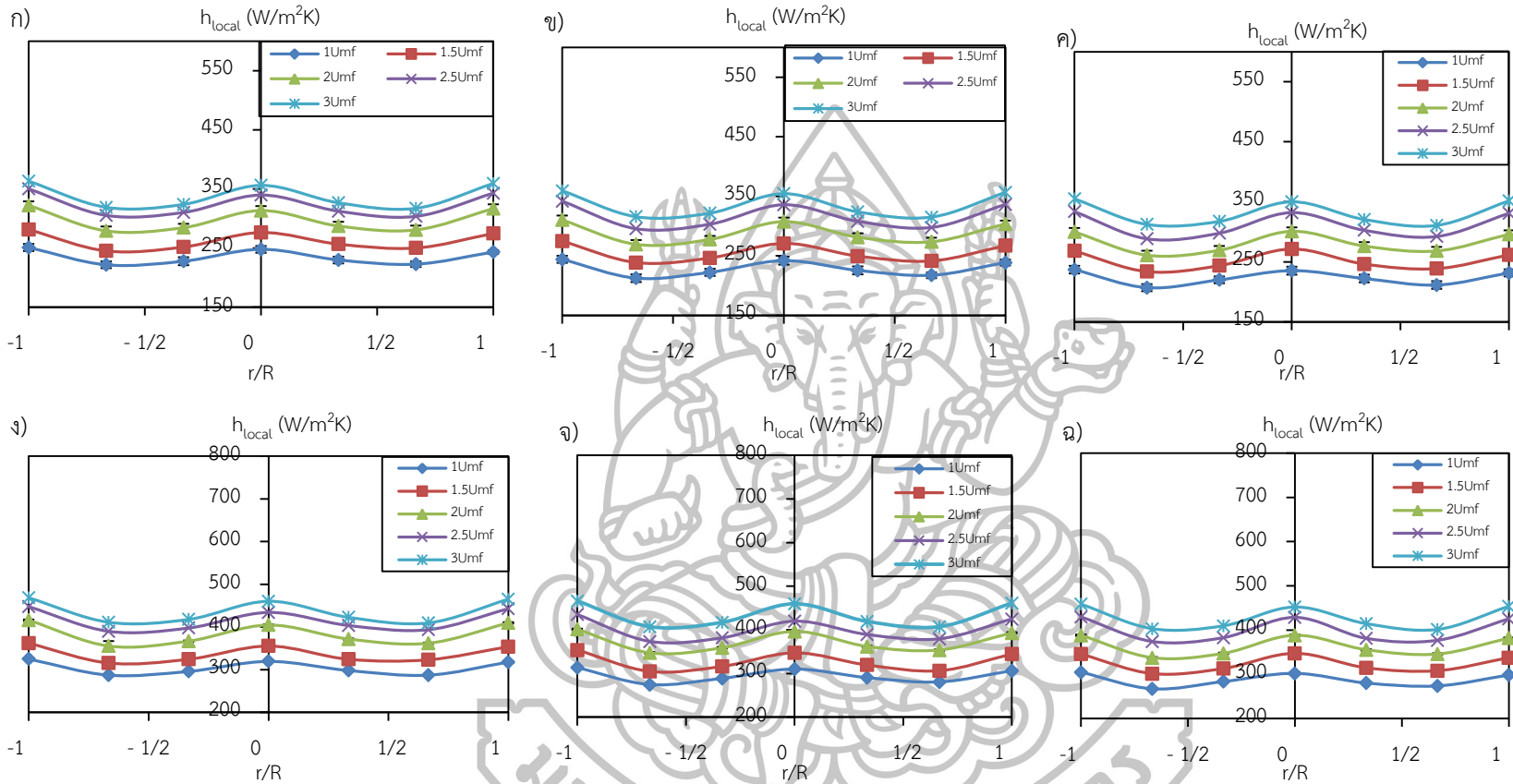
รูปที่ จ.18 แสดงผลของความเร็วอากาศปฐุมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$, ข) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$ และ ค) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพ้อนอากาศปฐุมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$, จ) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 223 cm จากหัวกระจายอากาศ



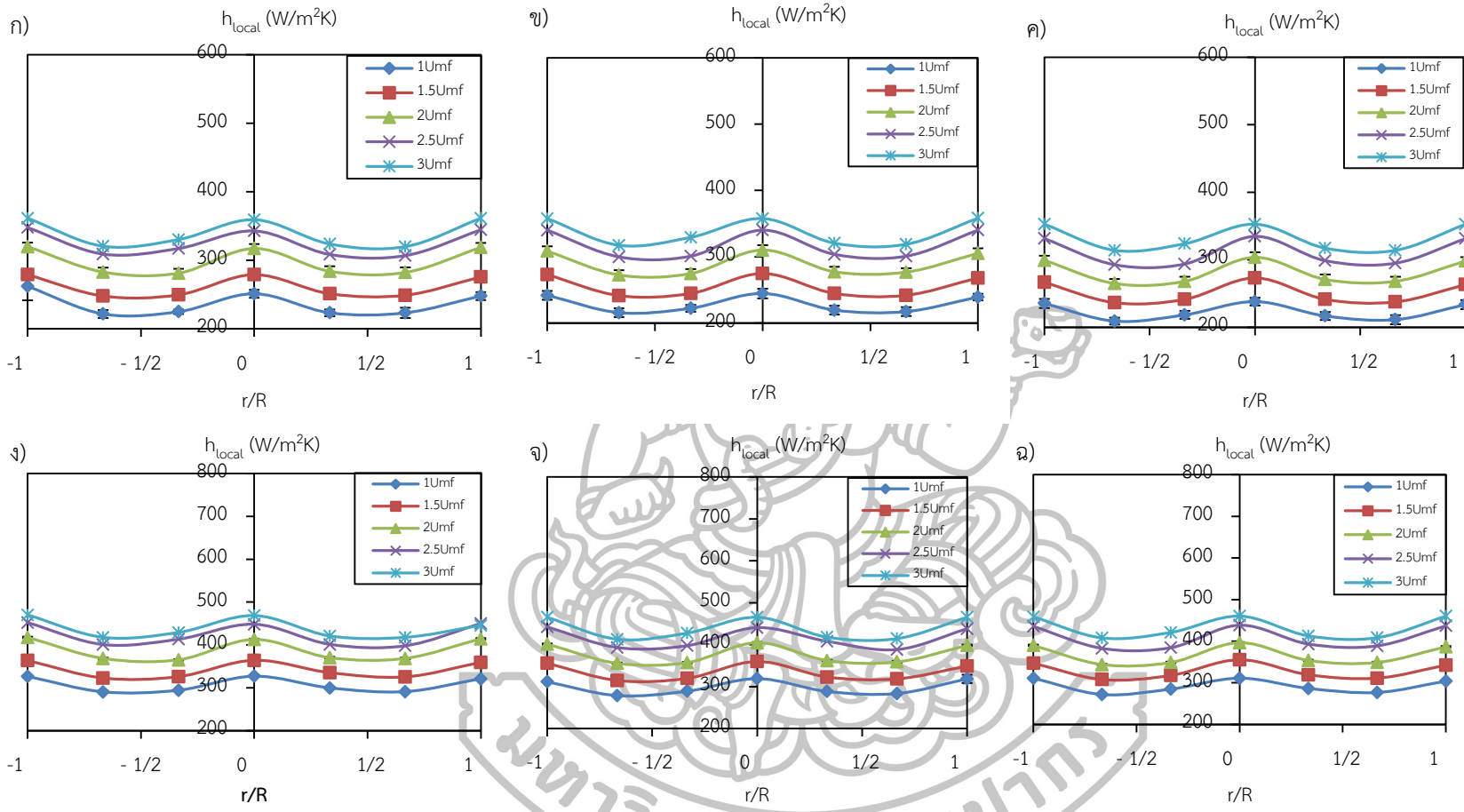
รูปที่ จ.19 แสดงผลของความเร็วจานอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 300–500 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพ้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ จ) และ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ฉ) ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 288 cm จากหัวกระจายอากาศ



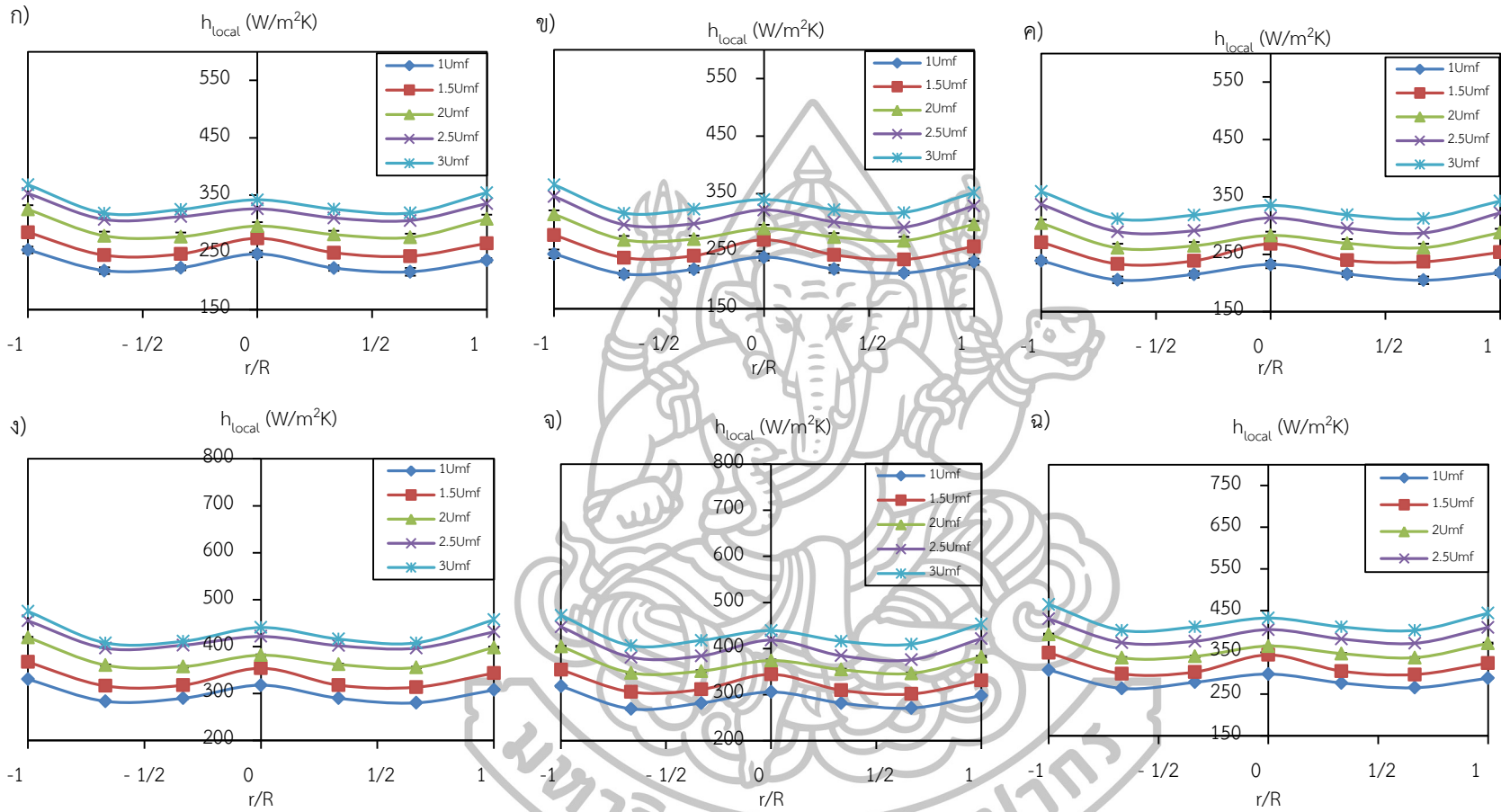
รูปที่ จ.20 แสดงผลของความเร็วยกอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพ้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 60 cm จากหัวกระจายอากาศ



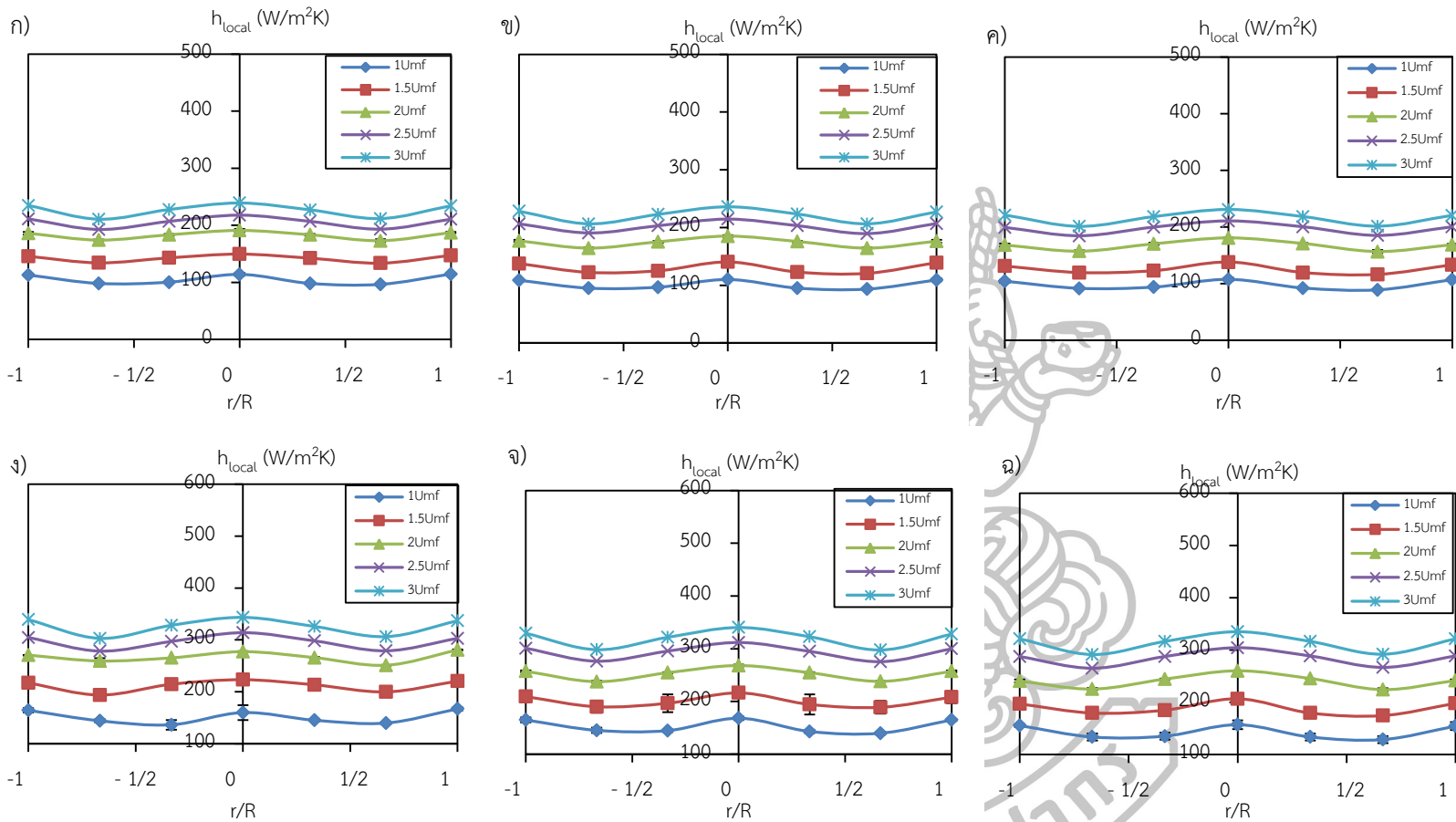
รูปที่ จ.21 แสดงผลของความเร็วจานอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s + Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s + Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s + Q_T)/Q_p] = 0.5$ ค) ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพ้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s + Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s + Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s + Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 125 cm จากหัวกระจายอากาศ



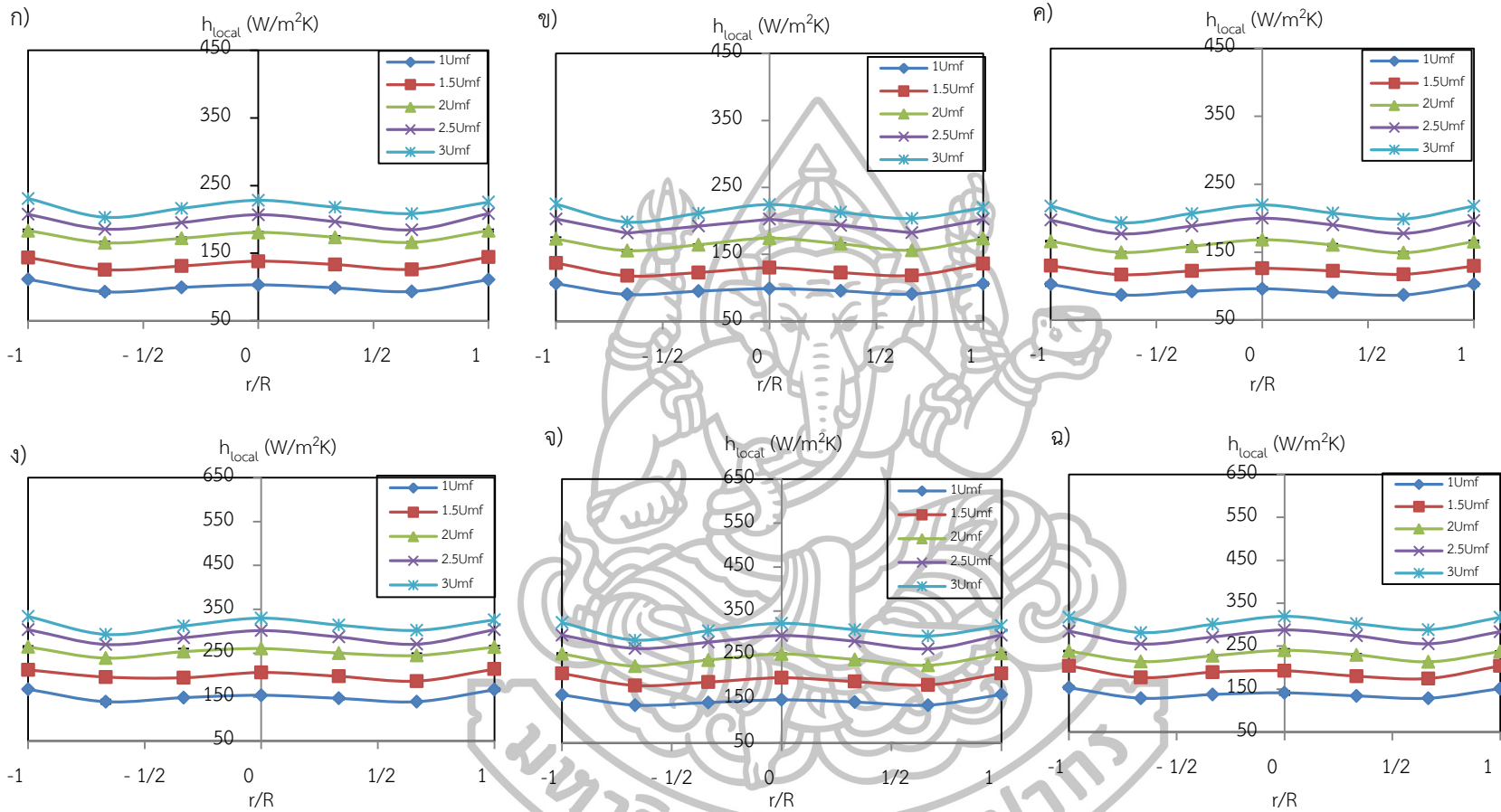
รูปที่ จ.22 แสดงผลของความเร็วยกาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm, $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$ ก), $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ ข), $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ค) ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพิกัดอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 233 cm จากหัวกระจายอากาศ



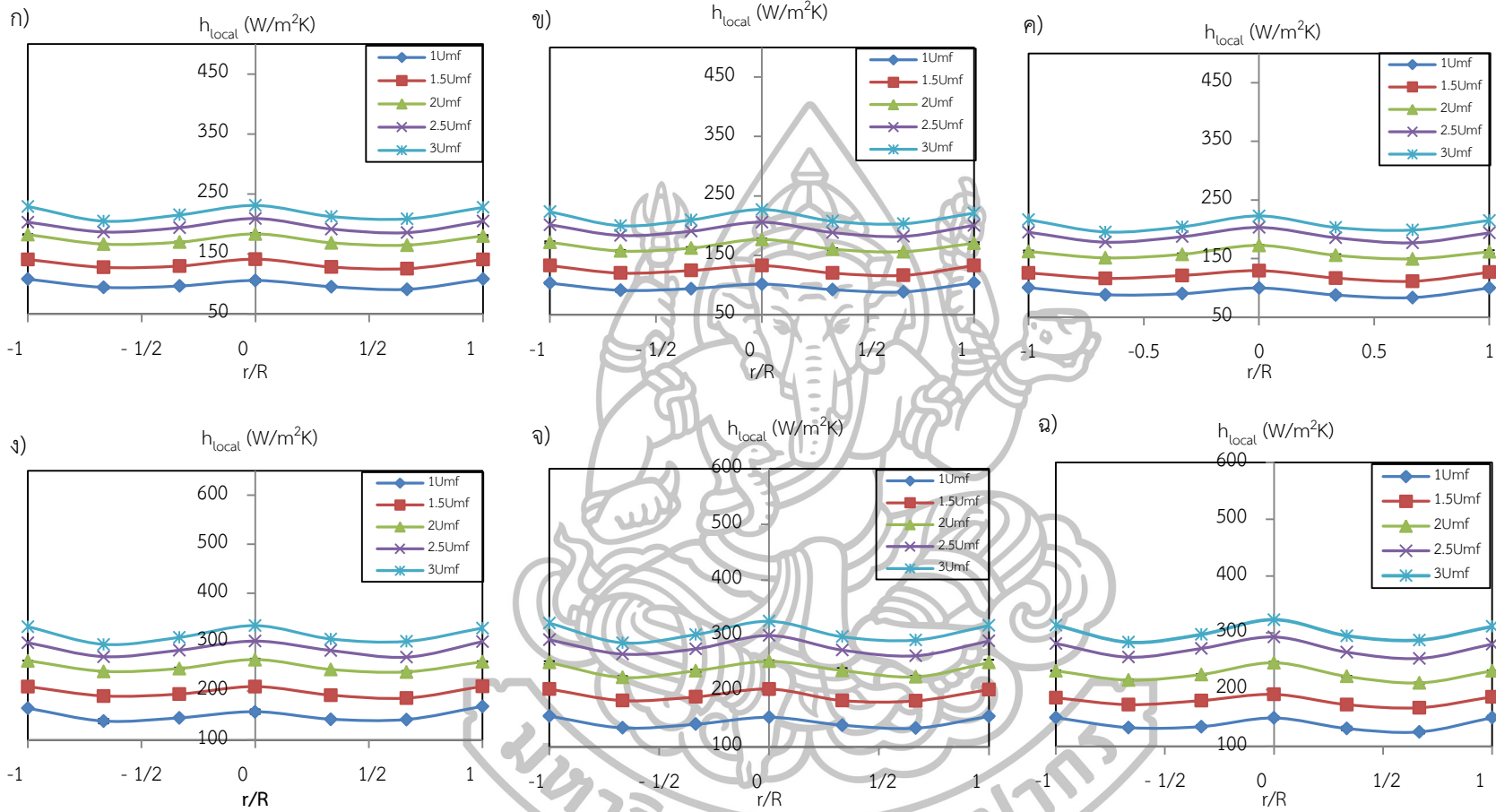
รูปที่ จ.23 แสดงผลของความเร็วมวลอากาศปฐุมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 600–710 μm, $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพ้อนอากาศปฐุมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 288 cm จากหัวกระจายอากาศ



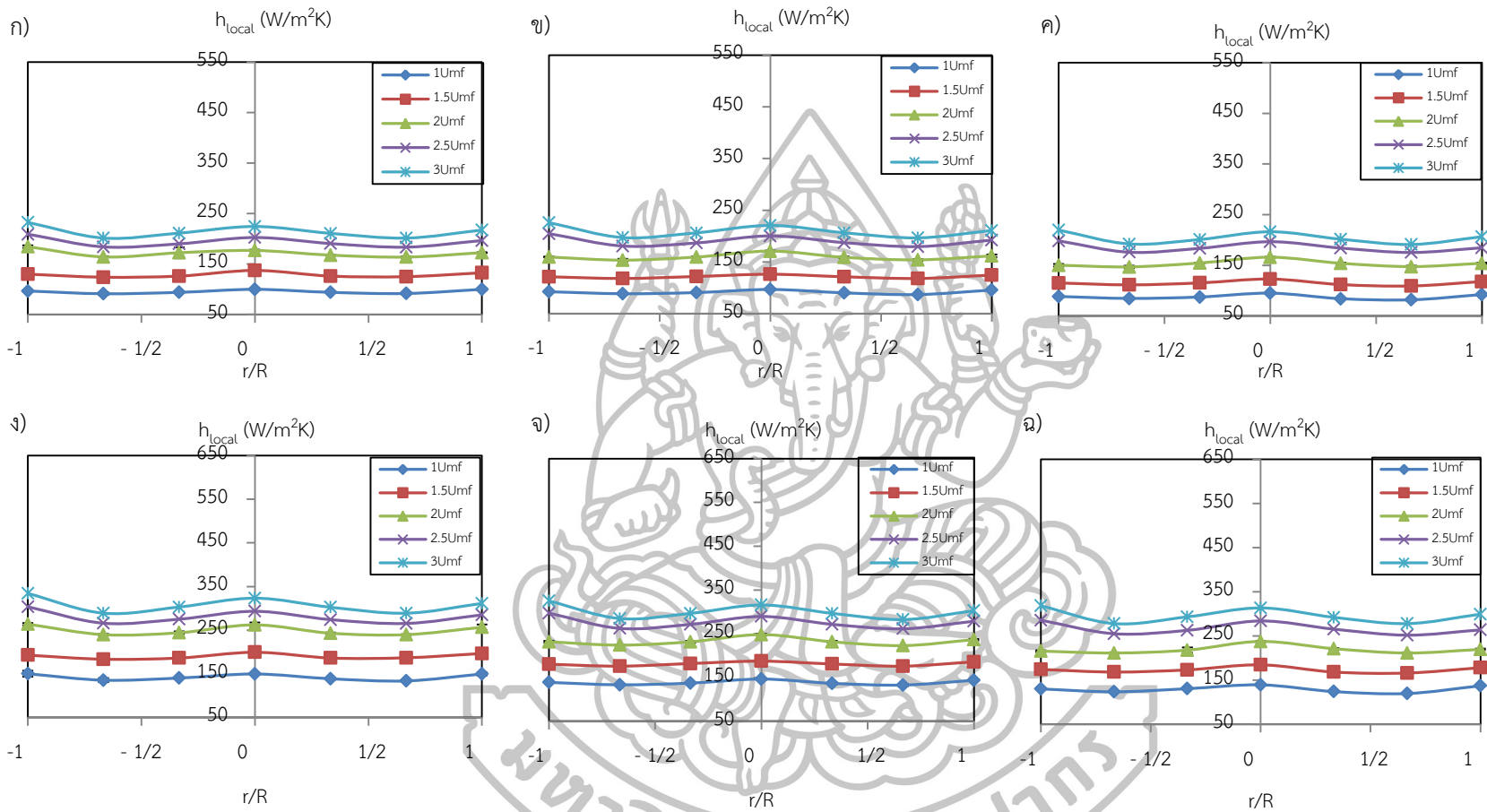
รูปที่ จ.24 แสดงผลของความเร็วดังกล่าวต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710–1000 μ m ความเร็วดังกล่าวมีค่าเท่ากับ U_{mf} , $1.5U_{mf}$, $2U_{mf}$, $2.5U_{mf}$, $3U_{mf}$ ของ $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$ ก), $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$ ข), $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.5$ ค) ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0$, จ) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_S+Q_T)/Q_P] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 60 cm จากหัวกระจายอากาศ



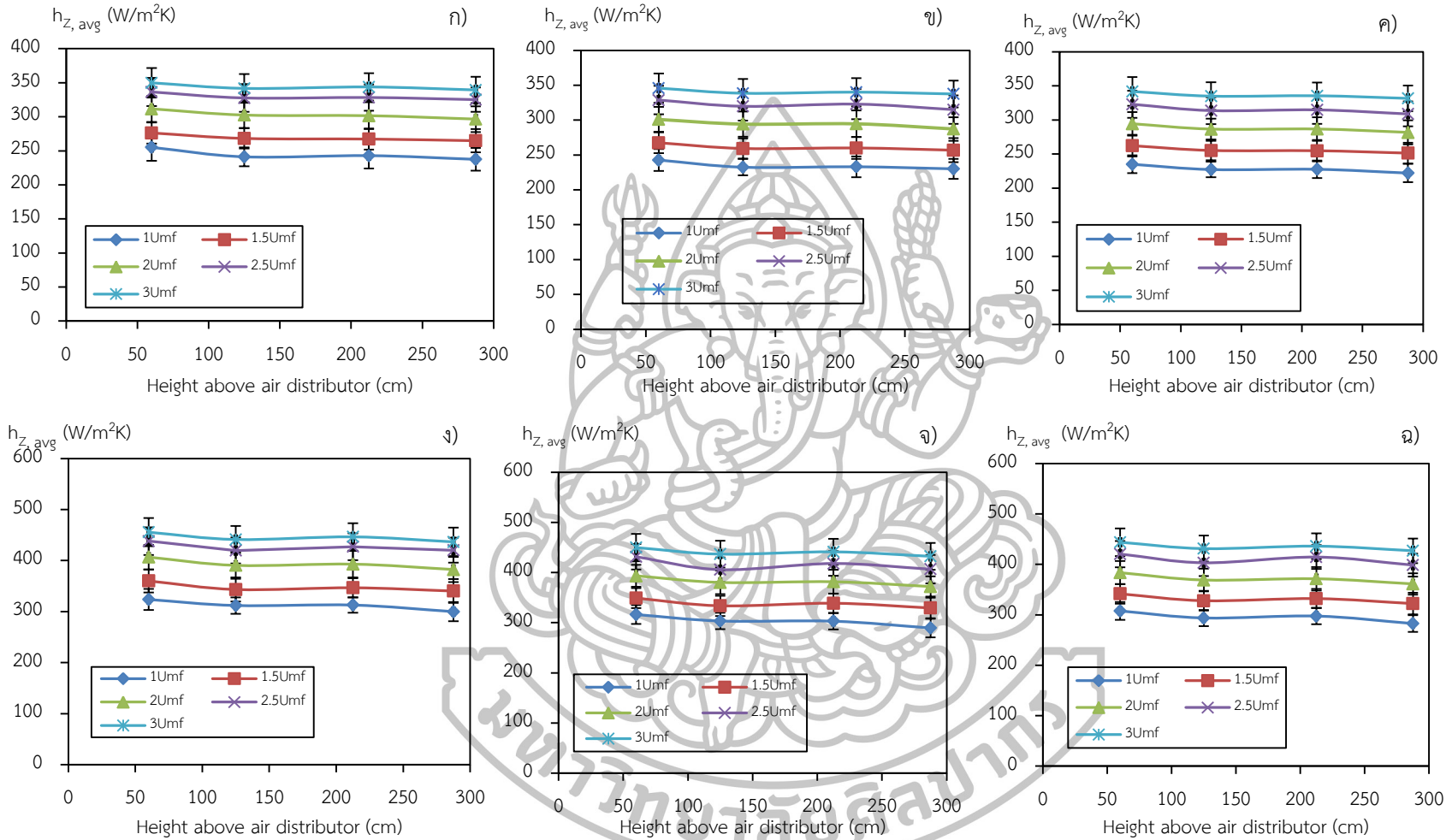
รูปที่ จ.25 แสดงผลของความเร็วอากาศปฐุมุมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710-1000 μm ที่ $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐุมุมิ ที่ $S_w = 2.98$ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 125 cm จากหัวกระจายอากาศ



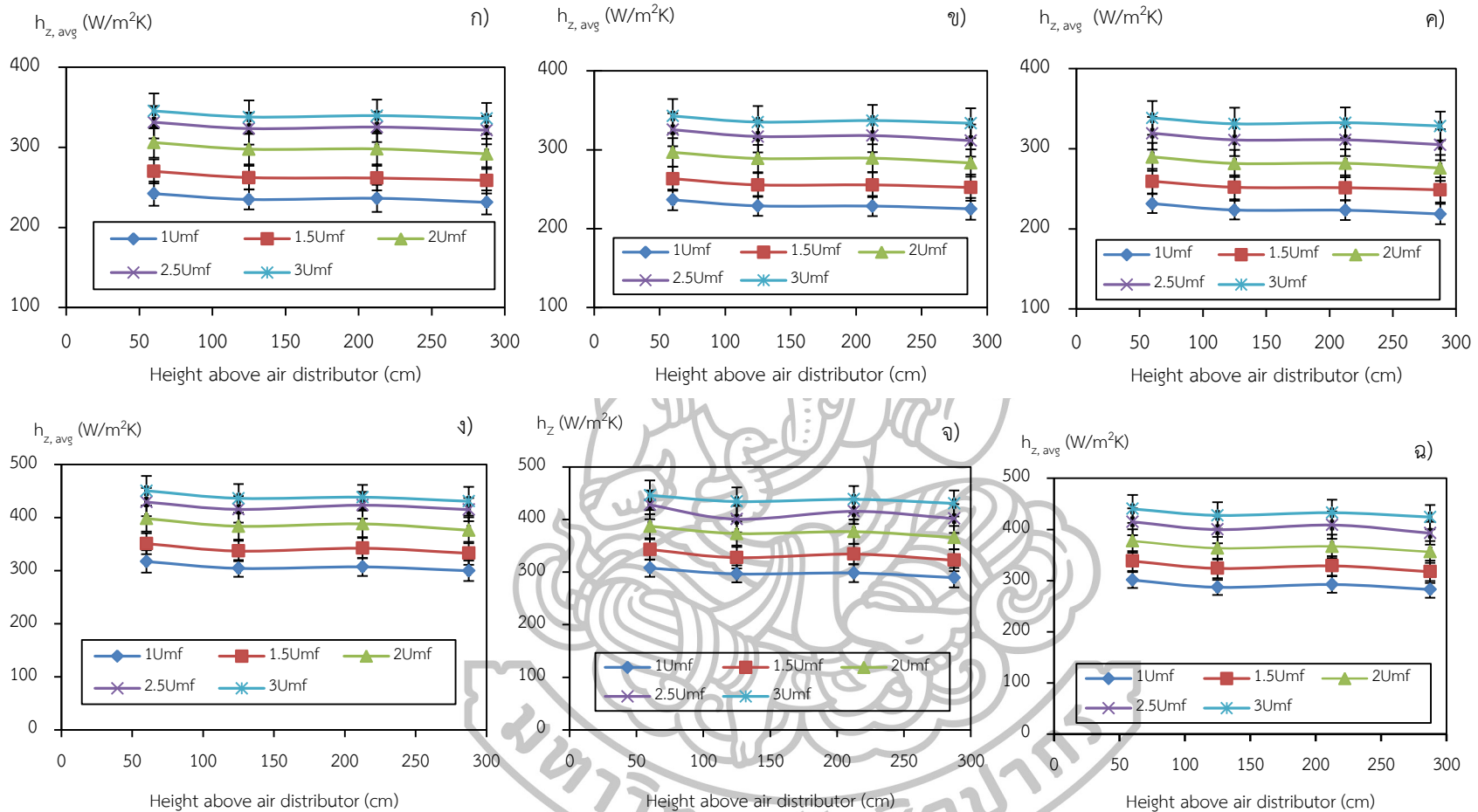
รูปที่ จ.26 แสดงผลของความเร็วอากาศปฐุมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710-1000 μm ที่ $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพ้องอากาศปฐุมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 233 cm จากหัวกระจายอากาศ



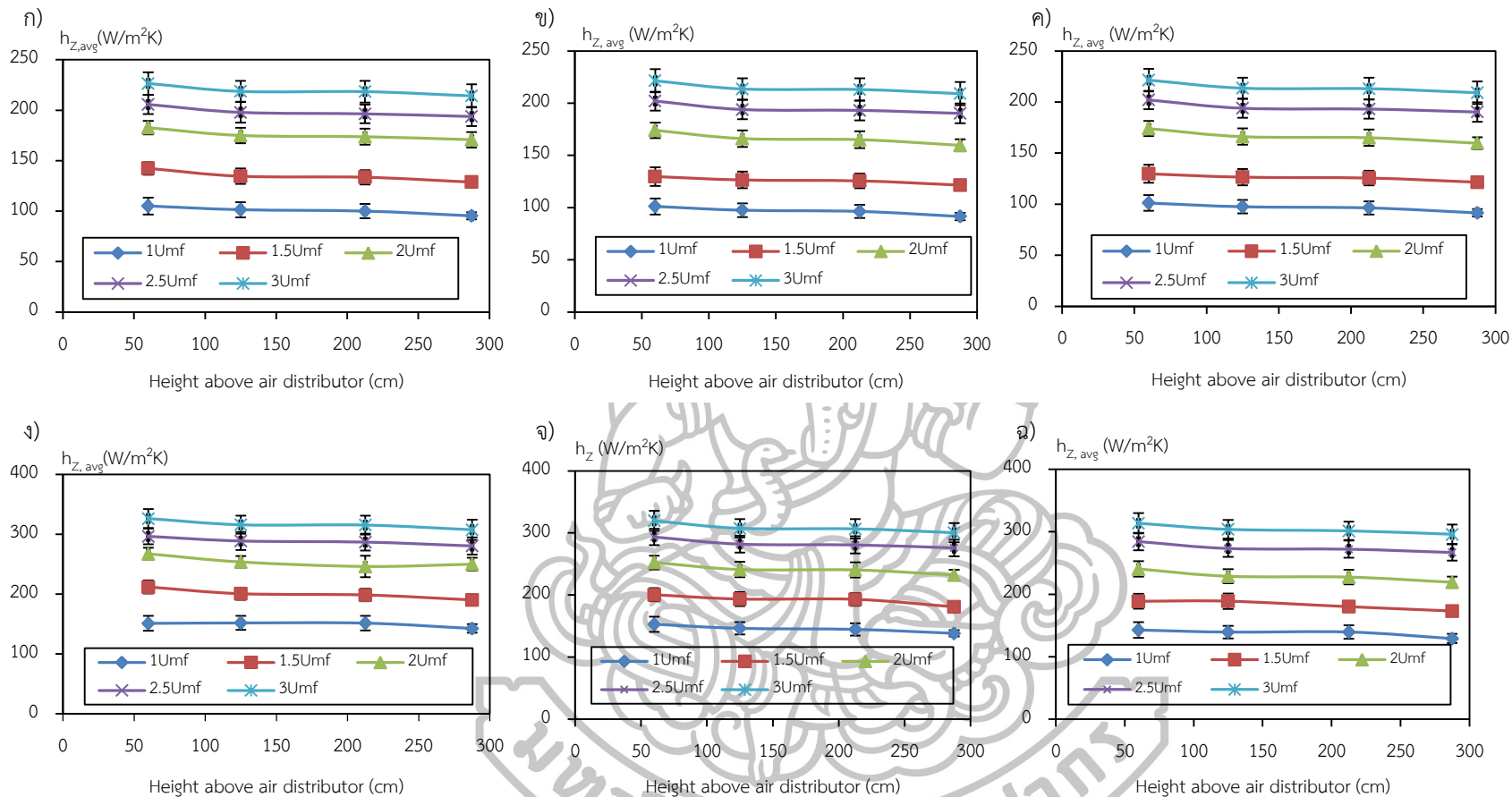
รูปที่ จ.27 แสดงผลของความเร็วอากาศปฐมภูมิต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขนาดอนุภาค 710–1000 μm ที่ $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน ก) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, ข) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$, ค) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบพ้องอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ เท่ากับ ง) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0$, จ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.3$ และ ฉ) $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0.5$ ตามลำดับ ณ ความสูงในการวัด 288 cm จากหัวกระจายอากาศ



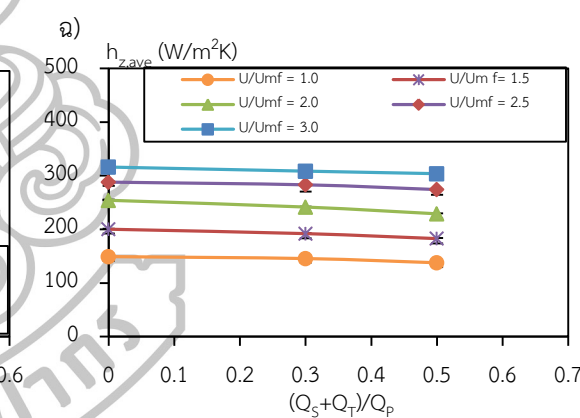
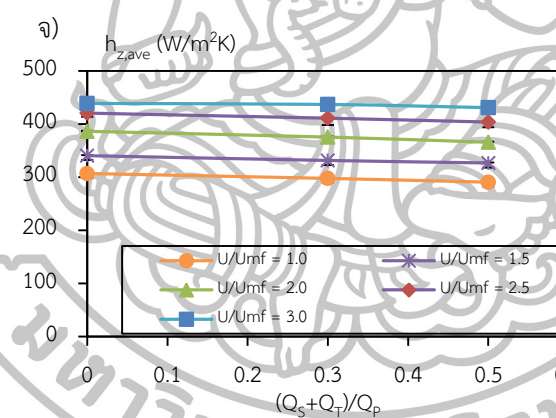
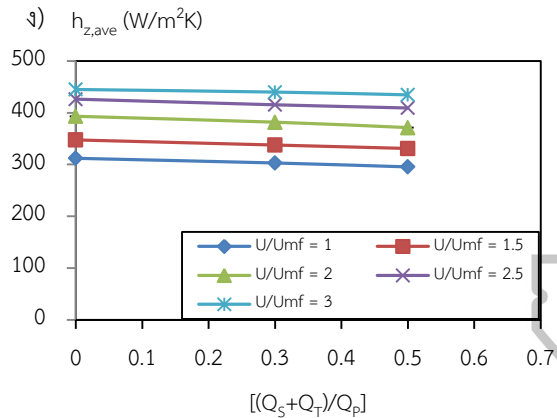
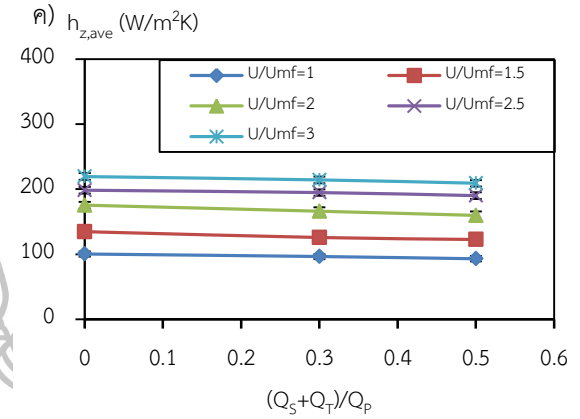
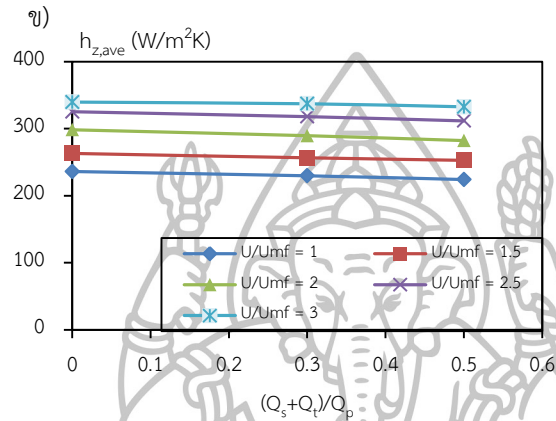
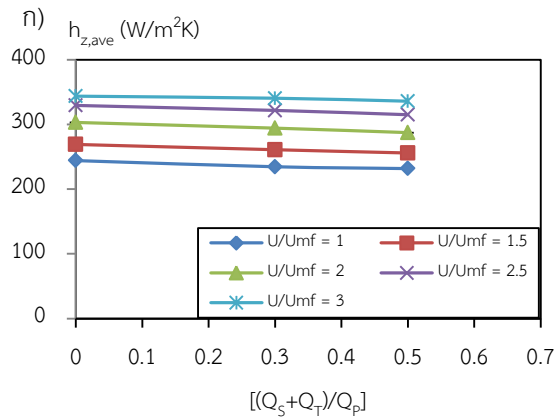
รูปที่ จ.28 กราฟแสดงผลตำแหน่งความสูงโดยวัดจากระบบป้อนอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยขนาดอนุภาค 300–500 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับ



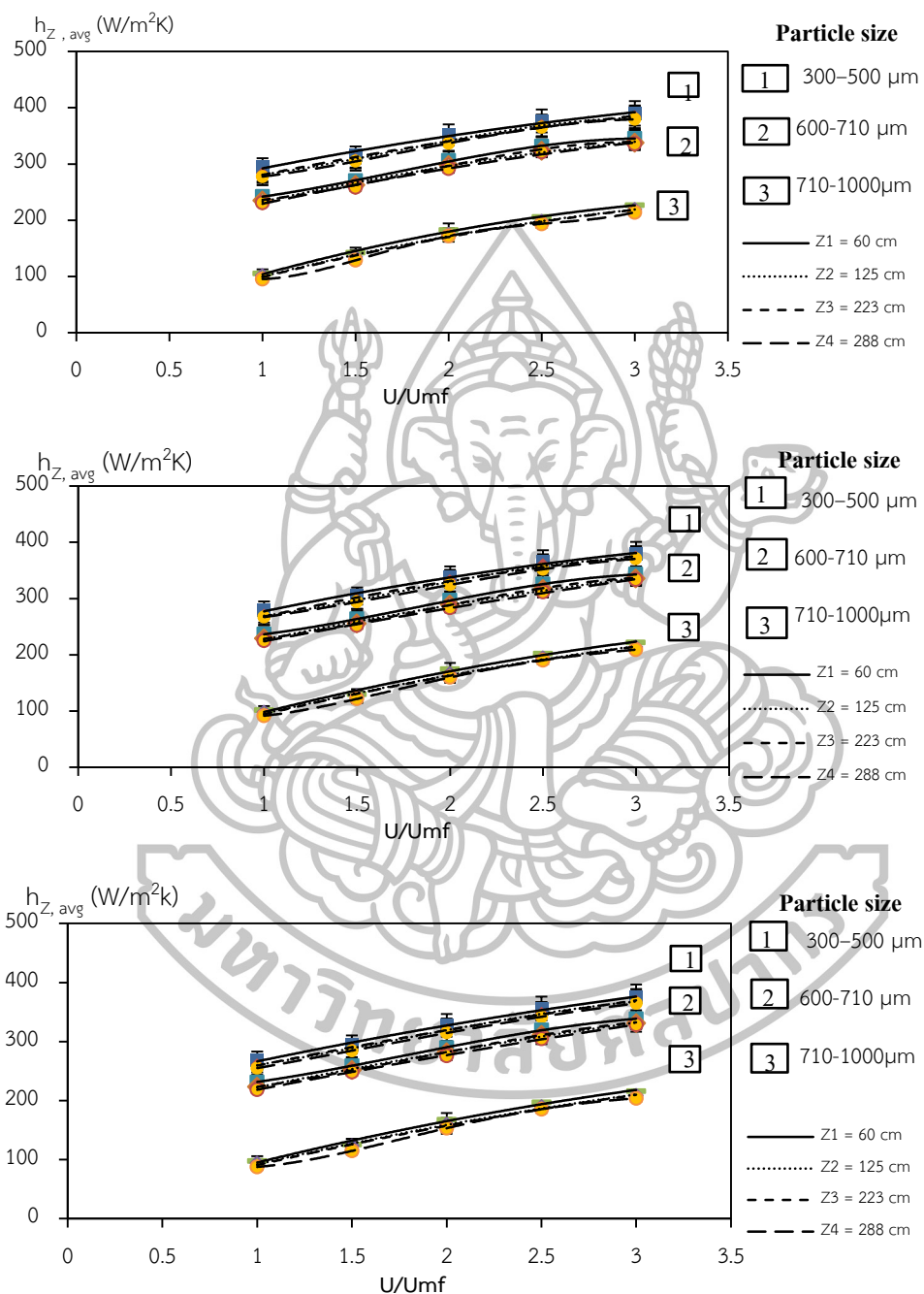
รูปที่ จ.29 กราฟแสดงผลตำแหน่งความสูงโดยวัดจากระบบป้อนอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยขนาดอนุภาค 600–710 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมนิยมและที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับ



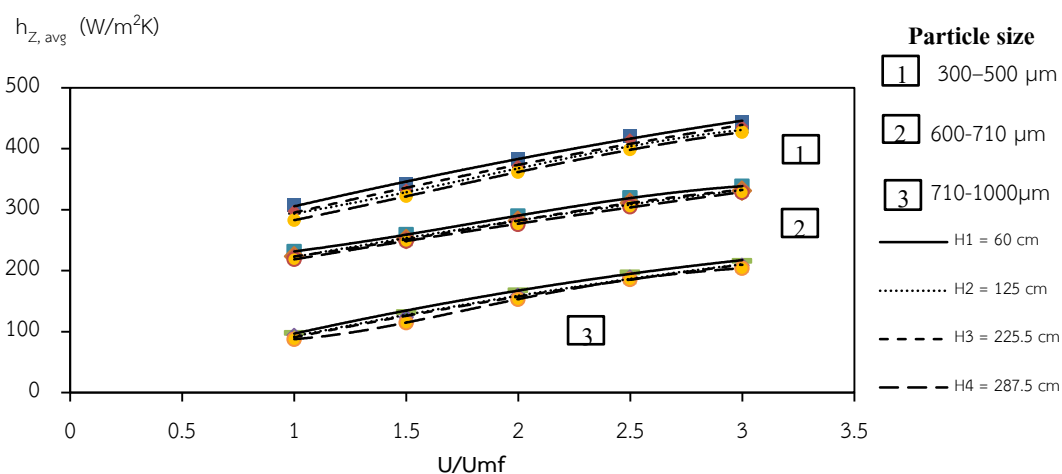
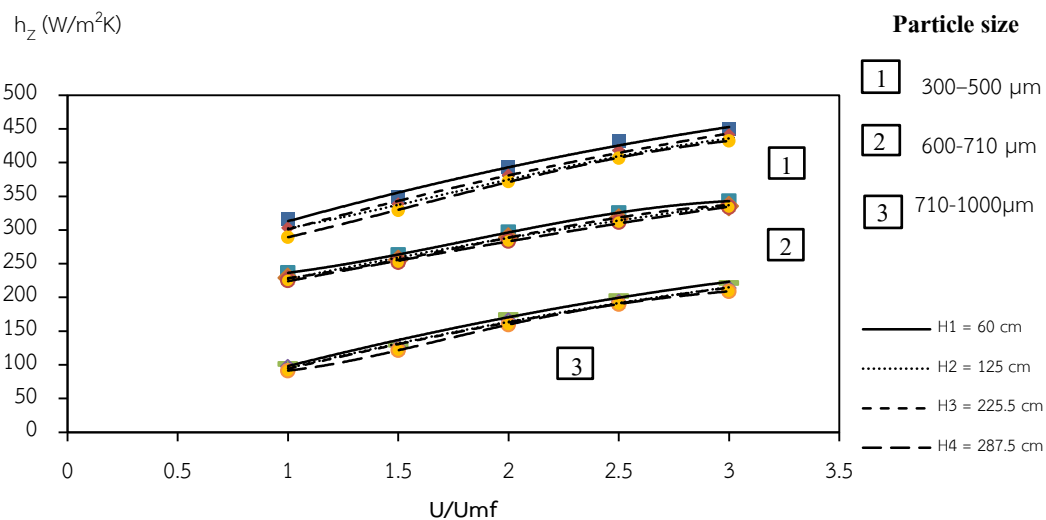
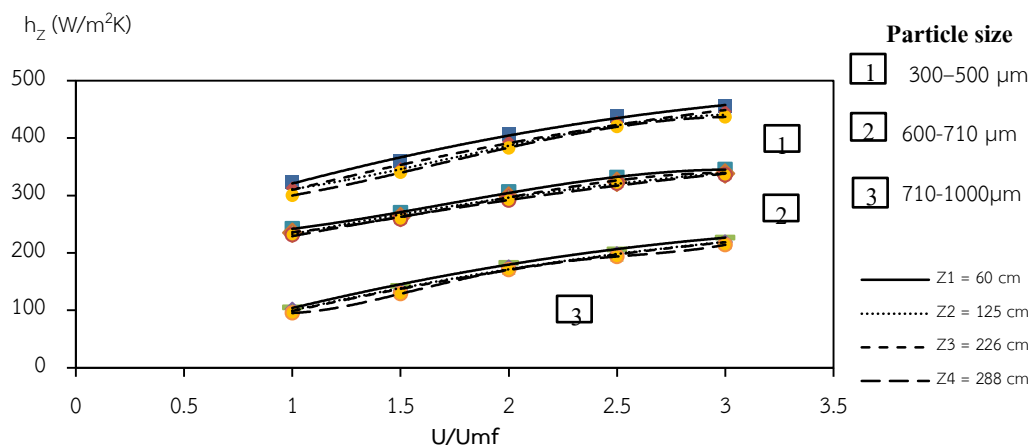
รูปที่ จ.30 กราฟแสดงผลตำแหน่งความสูงโดยวัดจากระบบป้อนอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยขนาดอนุภาค 710 – 1000 μm , $S_w = 2.76$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5 ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ โดยวัดจากระบบป้อนอากาศปฐมภูมิและที่ $S_w = 2.98$ ที่อัตราส่วน $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ง) 0 จ) 0.3 และ ฉ) 0.5 ตามลำดับ



รูปที่ จ.31 กราฟแสดงผลกระทบเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศทุติยภูมิและตติยภูมิที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยตลอดทั้งความสูงเตา และ $S_w = 2.76$ ของ $[(Q_s+Q_T)/Q_p] = 0-0.5$ ณ สำหรับอนุภาคขนาด ก) 300 – 500 μm ข) 600–710 μm และ ค) 710–1,000 μm และ สำหรับ $S_w = 2.98$ สำหรับอนุภาคขนาด ง) 300 – 500 μm จ) 600–710 μm และ ฉ) 710–1,000 μm



รูปที่ จ.32 กราฟแสดงผลกระทบของอนุภาคเบดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยความเร็วอากาศ
 ปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ $U_{mf} - 3 U_{mf}$ สำหรับ d_p เท่ากับ 300-500 600-710 และ 710-1,000 μm สำหรับไบพัด S_w
 = 2.76 โดย $[(Q_S+Q_T)/Q_P]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5



รูปที่ จ.33 กราฟแสดงผลกระทบของอนุภาคเบดที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยความเร็วอากาศปฐมนุ้มีค่าเท่ากับ U_{mf} - $3U_{mf}$ สำหรับ d_p เท่ากับ 300-500 600-710 และ 710-1,000 μm สำหรับใบพัด $S_w = 2.98$ โดย $[(Q_s+Q_T)/Q_p]$ เท่ากับ ก) 0 ข) 0.3 และ ค) 0.5

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	ร.ท.ณัฐชัย คำมัน
ที่อยู่	21 ม. 2 ต.ทองเอน อ.อินทร์บุรี จ.สิงห์บุรี 16110
ที่ทำงาน	กองพันซ่อมบำรุง กรมสนับสนุน กองพลทหารม้าที่ 2 รักษาพระองค์
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2537-2545	ระดับประถมศึกษา รร.อนุบาลสิงห์บุรี
พ.ศ. 2545-2550	ระดับมัธยมศึกษา รร.สิงห์บุรี
พ.ศ. 2550-2554	ระดับอุดมศึกษา สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีฯ ม.ศิลปากร
พ.ศ. 2557	หลักสูตรเก็บกัญและทำลายวัชระเบ็ด รุ่นที่ 3/57 โรงเรียนสรรพวุธ กรมสรรพวุธทหารบก
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2556 – 2557	ผู้บังคับหมวดซ่อมบำรุง กองพันซ่อมบำรุง กรมสนับสนุน กองพลทหารม้าที่ 2 รักษาพระองค์
พ.ศ. 2557 – ปัจจุบัน	ผู้ช่วยนายทหารยุทธการ หน่วยเฉพาะกิจกรมทหารม้าที่ 4

