



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผสมผลึกเหลวในดิฟฟูเซอร์

A Study on Flow Characteristics of Water Mixed with Liquid Crystals in Diffuser

نامผู้วิจัย

นายชลธิศ บำรุงวัด

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รongศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รongศาสตราจารย์มนตรี พิรุณเกษตร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รongศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผสมผลึกเหลวในดิฟฟูเซอร์

A Study on Flow Characteristics of Water Mixed with Liquid Crystals in Diffuser

โดย

นายชลธิศ บำรุงวัด

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชลธิศ บำรุงวัด 2557: การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผสมผลึกเหลวในดิวไฟฟิวเซอร์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 131 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองการไหลสองเฟสในท่อดิวไฟฟิวเซอร์โดยใช้ข้อมูลภาคผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอยด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เพื่อเปรียบเทียบความเร็วกับการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารแขวนลอยซึ่งจำลองจากการทดลองถ่ายภาพอนุภาคในของไหล (Particle Image Velocimetry, PIV) โดยของไหลผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 3 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ของไหลเคลื่อนที่ผ่านชุดท่อดิวไฟฟิวเซอร์ที่เลขเรย์โนลด์ 13,000 ในการจำลองการไหลแบบจำลองสองมิติถูกสร้างขึ้นตามขนาดชุดทดสอบจริงและมีพื้นที่วิเคราะห์จำนวน 2,142 ช่องและมีลักษณะการไหลเป็นแบบสองเฟสคือน้ำและอนุภาค อนุภาคผลึกเหลวถูกผสมเป็นสารแขวนลอยในของไหลโดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคระหว่าง 10 ถึง 100 ไมครอน และความเข้มข้นระหว่าง 0.1 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

จากการเปรียบเทียบความเร็วของการจำลองการไหลของอนุภาคผลึกเหลวและอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า ค่าความเร็วบริเวณตรงกลางของท่อมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ และอนุภาคผลึกเหลวขนาด 10 และ 100 ไมครอน มีค่าความเร็วของไหลแตกต่างกันไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่าความเข้มข้นของอนุภาคผลึกเหลวระหว่าง 3.5 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเมื่อเทียบกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ำกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการนำอนุภาคผลึกเหลวมาประยุกต์ใช้แทนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในการจำลองการไหลมีผลกระทบต่อคุณลักษณะการไหลที่ยอมรับได้ ซึ่งการใช้อนุภาคผลึกเหลวแทนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้ได้ข้อมูลการไหลทั้งความเร็วและอุณหภูมิในเวลาเดียวกัน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chonlatid Bumrungwat 2014: A Study on Flow Characteristics of Water Mixed with Liquid Crystals in Diffuser. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.

Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 131 pages.

This thesis presents the simulation of two-phase flow in diffuser with Liquid Crystals suspended in water by using Computational Fluid Dynamics program. The objective is to compare the computational results with the experimental results obtained from using PIV in Titanium Dioxide suspended in water. The water contained 3-micron Titanium Dioxide as tracking particle at 0.1 percent by weight. Fluid flowed through diffuser at the Reynolds Number of 13,000. Experimental data was used to create a two-dimensional model with 2,142 meshes. The simulation was set for two-phase flow, liquid and solid. Liquid Crystals were suspended in fluid with various size and solid's concentration at 10-100 micron and 0.1-10 percent by weight, respectively.

From comparison between simulation of Liquid Crystals and Titanium Dioxide suspended in water, it was found that the error was less than 2 percent. The comparison of Liquid Crystals' size between 10 and 100 micron showed that the difference in velocity was not exceeding 0.1 percent. It was also found that Liquid Crystals' concentration between 3.5 to 4 percent by weight compared with Titanium Dioxide had error less than 0.1 percent. So, the application of using Liquid Crystals instead of Titanium Dioxide was approval. Moreover, Liquid Crystals can be used to reveal the flow characteristic both velocity and temperature at the same time.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและวางแผนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี พิรุณเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำแนะนำเรื่องงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทดลองงานวิจัย PIV

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำลังใจและให้คำปรึกษาในการเรียนเสมอมา และขอขอบคุณ แฟน รุ่นพี่ เพื่อน รุ่นน้อง ที่ให้กำลังใจและให้คำปรึกษาเสมอมา

ชลธิศ บำรุงวัด

เมษายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	73
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลองและการจำลองการไหล	76
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	131

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ค่าคงที่ของตัวแปรในแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε	16
2 คุณสมบัติของอนุภาคสำหรับแบบจำลองการไหล	38
3 สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคผลึกเหลวที่ความเข้มข้นต่างๆ	39
4 ความเร็วทางเข้าสำหรับแบบจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และอนุภาคผลึกเหลว	42
5 อัตราส่วนของความเร็วสูงสุดสองตำแหน่งซึ่งแบ่งตามแกนสมมาตร	61
6 สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคผลึกเหลวที่ความเข้มข้น 3.5 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยมวล	63
7 ค่าความหนาแน่นและความหนืดของของไหลผสมจากอนุภาคต่างๆ	67
 ตารางผนวกที่	
ข1 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการทดลอง PIV	77
ข2 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	83
ข3 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลว ขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	95
ข4 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลว ขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	107
ข5 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลว ขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	119

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 วิธีการวัดความเร็วของไหลโดยวิธีภาพถ่ายของอนุภาค	5
2 การสร้างแผ่นลำแสงด้วยชุดเลนส์เว้าและเลนส์นูน	7
3 การประมวลผลภาพด้วยวิธีการ Cross-Correlation	9
4 การแบ่ง Interrogation Area เพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ	10
5 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อวิเคราะห์หาทิศทางและความเร็วของอนุภาค	11
6 โครงสร้างโมเลกุลของผลึกเหลว (ก) Nematic (ข) Smectic (ค) Cholesteric	12
7 ช่วงความยาวคลื่นของแสงขาว	13
8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและสีที่เกิดขึ้นของผลึกเหลว	13
9 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน	15
10 การติดตั้งชุดทดสอบการพาความร้อนและวิธีการ PIV	19
11 แสดง Velocity Vector และ Velocity Contour ของของไหลที่เกิดจากการพาความร้อน	20
12 ขั้นตอนการยิงลำแสงและตรวจจับอนุภาคสำหรับการทดลอง Turbulent Jet และ Pool Mixing	21
13 แสดง Average Velocity Vector สำหรับการทดลอง Turbulent Jet	21
14 แสดงลักษณะการไหลของการทดลอง Pool Mixing ที่อัตราการไหลเชิงมวลต่างๆ	22
15 แสดงท่อ Reducer สำหรับการทดลองด้วยวิธีการ PIV	23
16 แสดงความเร็วไร้หน่วยในทิศทางตามแนวการไหลและทิศทางตามแนวรัศมีของชุดทดสอบ	23
17 แสดงสนามเวกเตอร์ความเร็วด้วยวิธีการ PIV	24
18 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Intensity ของอนุภาค TSPs ที่อุณหภูมิต่ำและสูง	25
19 แสดง Temperature Mapping ที่ได้จากการแปลงค่า Intensity ของอนุภาค TSPs	25
20 แสดงสนามอุณหภูมิการพาความร้อนด้วยธรรมชาติจากการทดลองด้วยผลึกเหลวและการคำนวณเชิงตัวเลข	26
21 แสดงชุดทดสอบการวัดความดันตกคร่อมของของไหล	27
22 แสดงความดันตกคร่อมของของไหลที่ผสมอนุภาคขนาด 125 ไมครอน ที่ความเร็วการไหลและอัตราส่วนผสมของอนุภาคที่แตกต่างกัน	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
23 ผลการจำลองการไหลที่แสดงความเร็วของของไหลที่ผสมอนุภาคในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่ขนาดต่างๆ	28
24 แสดงสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคที่ขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่งหน้าตัดภายในท่อ	29
25 แผนผังวิธีการวิจัย	31
26 ชุดทดสอบที่สร้างจากท่ออะคริลิก	33
27 ชุดทดลองการไหลและเครื่องมือวิเคราะห์ความเร็วอนุภาค	34
28 พื้นที่สำหรับการวิเคราะห์ความเร็ว ขนาด 18x32 มม.	35
29 โมเดลจำลองการไหลและการกำหนดขอบเขต	36
30 การเปรียบเทียบ Grid Independence ระหว่าง 0.25 และ 0.5	37
31 สนามความเร็วบริเวณท่อฉีฟิวเซอร์จากวิธีการ PIV	40
32 ความเร็วไร้หน่วยที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองด้วยวิธีการ PIV	41
33 สนามความเร็วบริเวณท่อฉีฟิวเซอร์ด้วยการจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์	43
34 ความเร็วไร้หน่วยที่ตำแหน่งต่างๆ ของการจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์	44
35 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์	45
36 ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจทานความเร็วระหว่างการทดลองด้วยวิธีการ PIV กับการจำลองการไหลด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารแขวนลอย	45
37 ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจทานของความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคฟลักเคลวขนาด 10 ไมครอนเป็นสารแขวนลอย	46
38 ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจทานของความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคฟลักเคลวขนาด 50 ไมครอนเป็นสารแขวนลอย	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
39 ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจทานของความเร็วระหว่างการจำลองการไหล โดยใช้อุณหภูมิเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 50 ไมครอน เป็นสารแขวนลอย	48
40 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อุณหภูมิ เทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	49
41 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อุณหภูมิ เทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	50
42 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อุณหภูมิ เทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	51
43 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อุณหภูมิ เทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	52
44 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อุณหภูมิ เทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	53
45 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อุณหภูมิ เทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	54
46 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อุณหภูมิ เทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	55
47 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อุณหภูมิ เทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
48 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	57
49 การเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 55$ มม.	58
50 การเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 61$ มม.	58
51 การเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 67$ มม.	59
52 การเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 73$ มม.	59
53 การเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 79$ มม.	60
54 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	64
55 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	65
56 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	66
57 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย	67

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ
$EL_{\text{turbulent}}$	=	Entrance Length Number for Turbulent Flow
G_k	=	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ก่อตัวขึ้นเนื่องจากค่าความเร็วเฉลี่ย
G_b	=	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ก่อตัวขึ้นเนื่องจากการลอกตัว
k	=	พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน
L_e	=	Length to Fully-Developed Velocity Profile
Re	=	เลขเรย์โนลด์
V_{inlet}	=	ความเร็วทางเข้า
V_m	=	ความเร็วของของไหลผสม
Y_M	=	การกระจายความผันผวนของความปั่นป่วน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Greek Symbols

ε = อัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

α_k = สัดส่วนเชิงปริมาตร

ρ_m = ความหนาแน่นของของไหลผสม

μ_m = ความหนืดของของไหลผสม

μ_t = ความหนืดจลน์ของความปั่นป่วน

σ_k = ค่า Turbulent Prandtl number ของ k

σ_ε = ค่า Turbulent Prandtl number ของ ε

คำย่อ

CFD = Computational Fluid Dynamics

PIV = Particle Image Velocimetry

TiO₂ = Titanium Dioxide

TLCs = Thermochromic Liquid Crystals

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำผสมผลึกเหลวในดิฟฟูเซอร์

A Study on Flow Characteristics of Water Mixed with Liquid Crystals in Diffuser

คำนำ

วิธีการถ่ายภาพอนุภาคในของไหล (Particle Image Velocimetry, PIV) เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการหาความเร็วของของไหลในสถานะที่ซับซ้อน หลักการของ PIV คือการผสมอนุภาคขนาดเล็ก เช่น อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารแขวนลอยและให้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับของไหล ชุดเลเซอร์ความเข้มสูงจะยิงแผ่นลำแสงไปยังชุดทดสอบและบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูง จากนั้นจะนำภาพที่ถูกบันทึกไปวิเคราะห์ทางสถิติและได้ข้อมูลออกมาเป็นสนามเวกเตอร์ความเร็ว ซึ่งวิธีการ PIV มีข้อดีคือ ไม่มีอุปกรณ์ไปรบกวนการไหลภายในชุดทดสอบ และได้ผลลัพธ์ความเร็วทั่วทั้งชุดทดสอบ แต่วิธีการนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากความเข้มของแสงเลเซอร์ที่มีความเข้มค่าเดียว และรูปภาพที่ถูกบันทึกเป็นแบบขาว-ดำ ซึ่งสามารถแปลงข้อมูลออกมาได้เฉพาะความเร็วของของไหลเพียงอย่างเดียว

ในปัจจุบัน มีงานวิจัยที่ทำการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในของไหลโดยนำอนุภาคผลึกเหลว (Thermochromic Liquid Crystals, TLCs) มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย ซึ่งโครงสร้างของผลึกเหลวนี้นี้มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิและสามารถนำมาผสมเป็นสารแขวนลอยในของไหลได้ ดังนั้นการประยุกต์นำผลึกเหลวมาใช้เป็นสารแขวนลอยทดแทนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับวิธีการ PIV จะสามารถให้ข้อมูลของการไหลได้ทั้งความเร็วและอุณหภูมิของของไหลในสถานะนั้นๆ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงผลกระทบของของไหลเนื่องจากการเปลี่ยนสารแขวนลอยในของไหลจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นอนุภาคผลึกเหลว โดยสร้างเป็นแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งมีตัวแปรที่นำมาพิจารณาคือ คุณสมบัติของอนุภาค ขนาดของอนุภาค และความเข้มข้นโดยมวลที่ผสมในของไหล

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะการไหลภายในท่อคิฟิวเซอร์ด้วยของไหลที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และใช้วิธีการถ่ายภาพอนุภาคในของไหล
2. สร้างแบบจำลองการไหลที่สภาวะเดียวกับการถ่ายภาพอนุภาคในของไหล โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลอง PIV และแบบจำลองการไหล
3. สร้างแบบจำลองการไหลที่ใช้อนุภาคผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอย เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของอนุภาคผลึกเหลวที่ขนาดต่างๆ กับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และหาขนาดของผลึกเหลวที่เหมาะสม
4. สร้างแบบจำลองการไหลที่ใช้อนุภาคผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอย เพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของอนุภาคผลึกเหลวที่ความเข้มข้นต่างๆ กับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และหาความเข้มข้นของผลึกเหลวที่เหมาะสม

การตรวจเอกสาร

การถ่ายภาพอนุภาคในของไหล

การวัดความเร็วของไหลโดยวิธีถ่ายภาพของอนุภาค (Particle Image Velocimetry, PIV) เป็นการวัดความเร็วของไหลโดยใช้ภาพของอนุภาคที่แขวนตัวอยู่ในของไหลเพื่อสามารถวิเคราะห์การไหลที่ซับซ้อนได้อย่างทันทีทันใดทั้งพื้นที่การไหลที่สนใจ (Instantaneous Complex Flow Measurement) โดยปราศจากการรบกวนหรือกีดขวางเส้นทางการไหลของของไหล ซึ่งวิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการติดตั้งเครื่องมือวัดภายในท่อหรือชุดทดสอบที่จะกีดขวางเส้นทางการไหลและอาจได้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อน

วิธีการ PIV สามารถวัดได้ทั่วทั้งพื้นที่ที่ต้องการวัดจากการวัดเพียงครั้งเดียว (การวัดที่ถือได้ว่าเป็นการวัดที่ขณะใดขณะหนึ่ง คือการวัดที่ใช้เวลาในการวัดน้อยมาก ($1/100$) เมื่อเทียบกับเวลาที่ของไหลเปลี่ยนแปลงการไหลอย่างเด่นชัด) วิธีการที่ใช้สำหรับ PIV ประกอบด้วยการทำให้เห็นภาพการไหล (Flow Visualization) และการวัดอัตราความเร็วของไหลขณะใดขณะหนึ่งเป็นจำนวนมากในบริเวณที่กว้าง

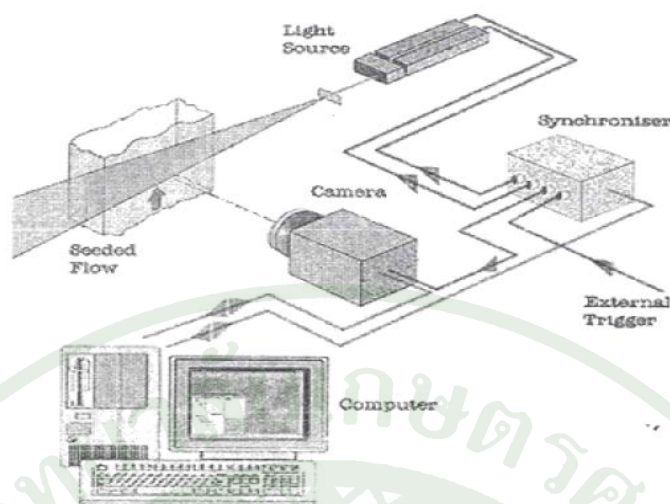
คุณลักษณะของวิธีการ PIV

- เป็นการวัดสนามความเร็วแบบไม่รบกวนการไหลโดยใช้อนุภาคที่มีขนาดในระดับไมครอนเพื่อติดตามการไหลของของไหล
- สามารถวัดความเร็วได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึงความเร็วเหนือเสียงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของเครื่องมือวัด เช่น กล้อง และระบบประมวลผล
- สามารถวัดความเร็วในภาคตัดของการไหลได้ทันที
- สามารถวัดได้ทั้งใน 2 มิติและ 3 มิติ

หลักพื้นฐานของการวัดความเร็วของไหลโดยวิธีภาพถ่ายของอนุภาค

ในของไหลที่จะทำการวัดจะถูกใส่อนุภาคเล็กๆ ที่เหมาะสมลงไปจำนวนหนึ่งซึ่งอนุภาคนี้จะต้องสามารถสะท้อนแสงได้ดีเมื่อถูกแผ่นลำแสง อนุภาคเหล่านี้จะต้องสามารถเคลื่อนที่ตามของไหลได้อย่างเที่ยงตรง หรือเรียกได้ว่าเป็นอนุภาคที่มีความถี่ในการตอบสนองสูง (High Frequency Response) เมื่อของไหลมีการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ เช่น เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น อนุภาคก็จะต้องมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามของไหลได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งใช้เวลาอันสั้นที่จะปรับความเร็วให้ได้เท่ากับความเร็วของของไหล ในขณะที่อนุภาคถูกแผ่นลำแสงก็จะสะท้อนออกมาเป็นจุดเล็กๆ ซึ่งจะคล้ายกับดาวดวงเล็กๆ บนท้องฟ้าในคืนที่มีดสนิท เมื่อแสงถูกสะท้อนออกมาการเคลื่อนที่ของของไหลก็จะถูกตรวจจับโดยกล้องที่วางตั้งฉากกับแผ่นลำแสง ซึ่งกล้องที่ใช้ในการจับภาพนี้จะเป็นกล้องดิจิทัลที่สามารถบันทึกภาพได้อย่างต่อเนื่อง แผ่นลำแสงที่ฉายไปที่ของไหลจะถูกฉายเป็นจังหวะและกล้องก็จะถูกตั้งค่าไว้ให้จับภาพไว้ให้ได้ในขณะที่ลำแสงถูกฉายออกไป 2 ครั้งติดต่อกัน หรือมากกว่า ผลของการจับภาพจากแสงที่สะท้อนออกมาจากอนุภาคเล็กๆ ที่อยู่ภายในของไหลสองครั้งติดต่อกัน (Double Exposed Image) หรือมากกว่าสองครั้ง (Multi Exposed Image) จะแสดงถึงระยะกระจัด (ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้) ของอนุภาคเล็กๆ ภายใต้อพื้นที่ทำการวัดในช่วงเวลาระหว่างลำแสงสองครั้ง ซึ่งภาพที่ถูกบันทึกจะถูกนำมาวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนออกมาเป็นความเร็วของของไหลขณะนั้น ดังแสดงในภาพที่ 1 ข้อมูลของความเร็วที่ได้จากวิธีการนี้จะมีแนวโน้มเป็นความเร็วขณะใดขณะหนึ่งก็ต่อเมื่อช่วงเวลาระหว่างการฉายลำแสงของกล้องมีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาที่น้อยที่สุดที่ของไหลจะเปลี่ยนแปลงการไหล ความเร็วที่ได้จากวิธีนี้จะแสดงให้เห็นถึงความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของของไหลที่เราทำการวัด

ภาพที่ได้จากวิธีการ PIV จะถูกวิเคราะห์โดยการแบ่งเป็นพื้นที่เล็กๆ ขนาดของพื้นที่จะถูกเลือกให้มีจำนวนคู่ของอนุภาคเพียงพอต่อความต้องการในการวัดระยะกระจัดในพื้นที่นั้นเพื่อใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ แต่พื้นที่นั้นจะต้องเล็กเพียงพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างของความเร็วของอนุภาคแต่ละอนุภาค (น้อยกว่า 5%) ชุด Synchronizer และชุด Acquisition จะถูกนำมาใช้ร่วมกันเพื่อควบคุมเวลาในการปล่อยลำแสงและใช้ในการส่งสัญญาณไปยังกล้องให้จับภาพและอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกควบคุมโดยชุดอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุมและประมวลผลข้อมูลจากภาพที่ได้จากกล้อง



ภาพที่ 1 วิธีการวัดความเร็วของไหลโดยวิธีภาพถ่ายของอนุภาค

คุณสมบัติและความสามารถในการไหลไปกับของไหล

ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคเมื่อพิจารณาพร้อมกับความหนาแน่นและความหนืดของของไหลจะทำให้ทราบถึงผลกระทบของแรงลอยตัวและความเฉื่อยของอนุภาคที่มีต่อของไหล การที่จะทำให้อนุภาคมีแรงลอยตัวเป็นศูนย์ (อนุภาคจะแขวนลอยอยู่ในของไหล) นั้นทำได้ยากแต่อย่างไรก็ตามอนุภาคจะต้องกระจายตัวอยู่ในของไหลอย่างสม่ำเสมอในระหว่างการทดลอง การเติมอนุภาคลงในของเหลวนั้นทำได้ง่ายกว่าในอากาศเนื่องจากของเหลวมีความหนาแน่นมากกว่าและการไหลของของเหลวส่วนใหญ่จะมีความเร็วและความเร่งต่ำกว่าจึงทำให้สามารถเลือกใช้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และง่ายต่อการตรวจจับมากกว่า ในของเหลวขนาดของอนุภาคที่ใช้อาจมีขนาดเล็กจนถึงขนาดสิบไมครอน (1 ไมครอน = 0.001 มิลลิเมตร) แต่สำหรับในอากาศขนาดของอนุภาคที่จะใช้ได้จะขนาดตั้งแต่ 5 ไมครอนลงไป

การกระจายของแสงจากอนุภาค

แสงที่สะท้อนออกมาจากอนุภาคเป็นเพียงส่วนหนึ่งของแสงทั้งหมดที่ฉายไปยังของไหล และแสงที่สะท้อนจากอนุภาคก็จะมีเพียงบางส่วนที่ทำมุมหักเหให้กล้องสามารถรับแสงได้ ดังนั้นขนาดและชนิดของอนุภาคซึ่งมีความสามารถในการสะท้อนแสงแตกต่างกันจะมีผลต่อความคมชัดของอนุภาคที่ปรากฏบนภาพ ภาพของอนุภาคโดยเฉลี่ยแล้วจะต้องมีความชัดกว่าระดับของพื้นหลัง (Background) บนภาพ

วัสดุที่ใช้เป็นอนุภาค

- การไหลของอากาศ (อุณหภูมิต่ำ) ละอองจากการฉีดน้ำมันเป็นฝอย 1-5 ไมครอน
- การไหลของอากาศ (อุณหภูมิสูง) ไททานเนียมไดออกไซด์ เซอโคเนียมไดออกไซด์ 0.5-5 ไมครอน
- การไหลของอากาศและน้ำ Latex particles 0.25-5 ไมครอน
- การไหลของน้ำ Conifer pollen 30-50 ไมครอน

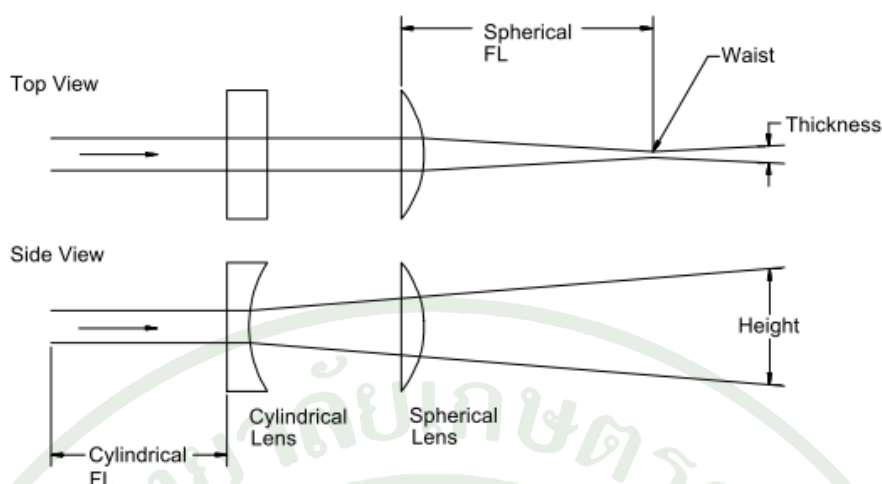
การทำให้อนุภาคสะท้อนแสง

ในการบันทึกภาพของอนุภาคจะต้องมีแหล่งกำเนิดพลังงานแสงที่เพียงพอในการฉายไปยังบริเวณระนาบที่จะทำการวัด และลำแสงที่ฉายไปนั้นจะต้องเป็นช่วงเวลาที่สั้นมาก ๆ เพื่อจะได้ไม่เกิดเป็นลายเส้นของอนุภาคบนภาพที่บันทึก โดยช่วงระยะเวลาที่ฉายแสงนั้นอนุภาคจะต้องไม่เคลื่อนที่ไปมากกว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค แหล่งกำเนิดแสงต่างๆ ไปสามารถนำมาใช้ได้แต่มีข้อจำกัดเฉพาะในการไหลที่มีความเร็วต่ำเนื่องจากความเข้มของแสงต่ำ ดังนั้นจึงจะต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อให้แสงสะท้อนออกมาจากอนุภาคเพียงพอต่อการบันทึกภาพด้วยเหตุนี้เองระบบของ PIV ส่วนใหญ่จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงที่เป็นอุปกรณ์เลเซอร์ เพราะว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มสูงและสามารถทำให้เป็นแผ่นลำแสงที่มีความหนาในระดับไมครอนได้ง่ายและสะดวก ซึ่งเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์สามารถใช้ได้ทั้งชนิดที่เป็นลำแสงต่อเนื่อง (Continuous Wave laser, CW) และชนิดที่ปล่อยลำแสงเป็นช่วงๆ (Pulsed lasers)

ในการเปลี่ยนลำเลเซอร์ (Laser beam) เป็นแผ่นลำแสง (Laser sheet) ประกอบด้วยเลนส์ 2 ชุด คือ เลนส์เว้าทำหน้าที่กระจายแสง ซึ่งสามารถถอดปรับลักษณะการสาดของแสงเป็นแนวตั้งหรือแนวนอนได้ และเลนส์นูนซึ่งทำหน้าที่บีบแสงให้อยู่ในระนาบการตกกระทบของวัตถุตามระยะโฟกัสของเลนส์ ดังแสดงในภาพที่ 2

คุณสมบัติของแสงเลเซอร์ที่ใช้ในเครื่อง PIV

- เป็นแหล่งพลังงานที่ให้แสงขาวออกมาอย่างต่อเนื่อง (Halogen lamp)
- เป็นแสงเลเซอร์ที่มีความต่อเนื่องตลอดเวลา (Argon-Ion laser, Nd: YAG laser)



ภาพที่ 2 การสร้างแผ่นลำแสงด้วยชุดเลนส์เว้าและเลนส์นูน

การควบคุมการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์

ในระบบ PIV มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบระยะเวลาที่แน่นอนในการบันทึกภาพและการปล่อยลำแสง ดังนั้นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมเวลาในการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้สามารถทำงานได้สอดคล้องกันในช่วงเวลาที่เหมาะสม เช่น การบันทึกภาพและการถ่ายภาพโอนข้อมูลของภาพจากกล้องมายังคอมพิวเตอร์จะต้องกระทำในจังหวะที่ลำแสงได้ผ่านไปยังบริเวณพื้นที่ที่ทดลองมีเช่นนั้นกล้องจะไม่สามารถบันทึกแสงที่ออกมาจากอนุภาคได้ทัน อุปกรณ์ทุกชิ้นอาจจะไม่ทำงานพร้อมกันแต่จะมีระยะเวลาในการทำงานที่ต่างกันคงที่ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมขั้นตอนและเวลาของระบบ PIV คือ ซิงโครไนเซอร์ (Synchronizer)

กล้องบันทึกภาพ

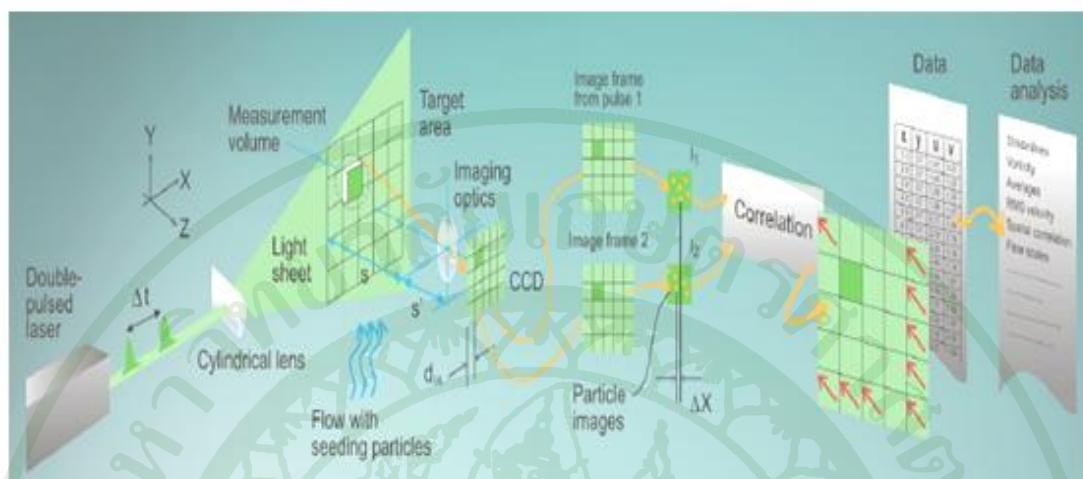
ในการเลือกใช้กล้องบันทึกภาพนั้นเป็นสิ่งสำคัญในระบบ PIV เนื่องจากการวัดความเร็วของการไหลนั้นจะอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพที่บันทึกไว้ เลนส์ที่ใช้จะต้องไม่ทำให้เกิดการกระจายของแสงที่ออกมาจากอนุภาคเพื่อที่จะให้ภาพของอนุภาคเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งจะทำให้มีความเที่ยงตรงในการวัด รูปทรงและกลไกควบคุมสำหรับบันทึกภาพของกล้องก็มีส่วนสำคัญมาก ระยะเวลาในการทำงานของกล้องหลังจากที่ส่งสัญญาณให้บันทึกภาพจนถึงเวลาที่หน้ากล้องเปิดรับแสงก็จะต้องทราบเวลาที่แน่นอนและสามารถวัดได้ จำนวนครั้งที่หน้ากล้องเปิดรับแสงนั้นก็จะต้องสามารถควบคุมได้ ซึ่งคุณสมบัติและข้อกำหนดต่าง ๆ เหล่านี้สามารถแก้ไขหรือหลีกเลี่ยงได้ด้วยการใช้กล้องดิจิทัล อุปกรณ์รับแสงไม่ว่าจะเป็นแผ่นฟิล์มหรือเซลล์รับแสงจะต้องมีความไวต่อ

ความยาวคลื่นของแสงที่สะท้อนออกมาเพื่อให้เกิดความคมชัดของภาพที่บันทึกได้และในปัจจุบันระบบ PIV จะใช้กล้องดิจิทัลที่มีเซลล์รับแสงชนิด CCD แทนการใช้ฟิล์มถ่ายรูปเนื่องจากมีข้อได้เปรียบหลายอย่าง คือ มีความละเอียดสูง อัตราเร็วในการบันทึกข้อมูลที่สูงและสามารถส่งต่อข้อมูลภาพไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลได้ทันที

ซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมและประเมินผล

หัวใจสำคัญของการวิเคราะห์และประเมินผลของซอฟต์แวร์ก็คือการหาระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ในช่วงระยะเวลาที่ทราบแน่นอน ภาพที่บันทึกได้จะถูกแบ่งออกเป็นพื้นที่เล็ก ๆ จำนวนมากและในแต่ละพื้นที่ให้ข้อมูลของระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้เมื่อซอฟต์แวร์ได้ประมวลผลข้อมูล โดยวิธีการที่ใช้ในการประมวลผลจากภาพบันทึกได้นั้นจะมีสองวิธีก็คือ การติดตามอนุภาคและการประมวลผลโดยวิธี Correlation ทั้งสองวิธีต่างมีข้อได้เปรียบซึ่งกันและกันและสามารถใช้ร่วมกันได้ แต่วิธี Correlation จะเป็นวิธีการที่ใช้ได้ผลดีมากกว่า การประมวลผลโดยวิธี Correlation นั้นจะทำการวัดระยะทางเฉลี่ยของอนุภาคที่อยู่ในพื้นที่เล็ก ๆ ที่ถูกแบ่งซึ่งการประมวลผลโดย Correlation นี้ก็จะแบ่งได้เป็นสองวิธีย่อย คือวิธี Auto-Correlation และ Cross-Correlation วิธีประมวลผลโดย Auto-Correlation นั้นจะใช้ภาพของอนุภาคที่บันทึกไว้เพียงภาพเดียว แต่เป็นภาพที่ลำแสงถูกปล่อยออกมาสองครั้งหรือมากกว่า จากนั้น ภาพที่บันทึกจะถูกนำไปประมวลผลโดยวิธี Auto-Correlation จะได้ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลาที่ทราบแน่นอน นั่นก็คือทำให้เราทราบความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือเราไม่ทราบว่าจุดใดเป็นจุดที่เกิดขึ้นจากลำแสงครั้งแรกและจุดใดเป็นจุดที่เกิดขึ้นจากลำแสงครั้งที่สอง ดังนั้นเราจะไม่สามารถทราบทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคว่ามีทิศทางใดในระหว่างทิศทางที่ได้หรือทิศทางตรงกันข้าม 180 องศา วิธีที่สองซึ่งเป็นวิธี Cross-Correlation นั้นจะต้องประมวลผลมาจากภาพที่บันทึกไว้สองภาพโดยแต่ละภาพนั้นจะมีการปล่อยลำแสงออกมาเพียงครั้งเดียว (1 Pulse / Frame) ดังแสดงในภาพที่ 3 และเนื่องจากเราทราบว่าภาพใดเป็นภาพแรก ภาพใดเป็นภาพหลังจึงไม่เกิดความสับสนในเรื่องของทิศทางการเคลื่อนที่ นอกจากนั้นยังไม่มีข้อจำกัดในการวัดความเร็วในย่านที่มีความเร็วเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Correlation สามารถเกิดผลที่มีความคลาดเคลื่อนได้ ในกรณีที่จำนวนคู่ของอนุภาคไม่เพียงพอในพื้นที่เล็ก ๆ ที่นำมาทำการประมวลผล การที่อนุภาคเคลื่อนที่หลุดออกนอกพื้นที่ในขณะที่ปล่อยลำแสงครั้งที่สองเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ค่อนข้างสูงมากของของไหลและอื่นๆ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลมาทำการประมวลผลซ้ำอีกเพื่อลดข้อผิดพลาดที่

อาจเกิดจากการทดลองและวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยต่างๆ จากข้อมูลหรือตำแหน่งข้างเคียงเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



ภาพที่ 3 การประมวลผลภาพด้วยวิธีการ Cross-Correlation

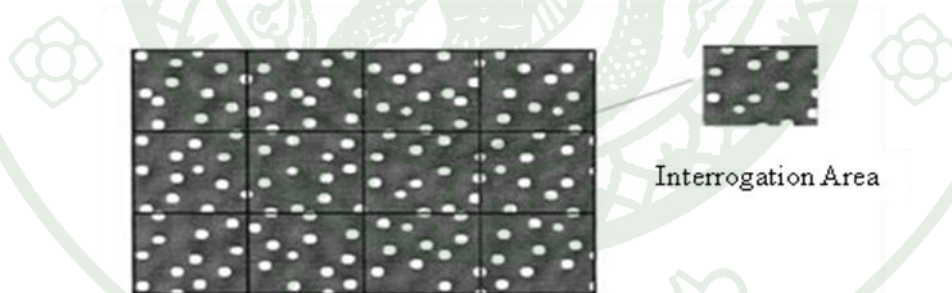
หลักการทำงานของเครื่อง PIV

ความเร็วที่ได้จากเทคนิค PIV ได้มาจากการวัดการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในพื้นที่ที่เราสนใจระหว่างการยิงแสงเลเซอร์ไป 2 ครั้งในเวลาติดกันผ่านไปยังพื้นที่ที่เราสนใจซึ่งสามารถเขียนสมการพื้นฐานดังสมการที่ 1

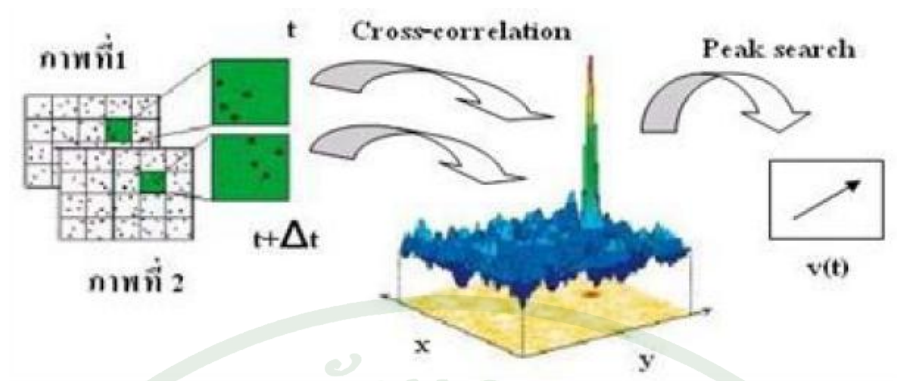
$$speed = v(t) = \frac{distance}{time} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

เมื่ออนุภาคภายในของไหลภายใต้พื้นที่ที่เราสนใจถูกแสงส่องจาก ระบายแสงเลเซอร์ ดังนั้นจึงทำให้กล้องสามารถถ่ายภาพของอนุภาคได้ ในการยิงแสงเลเซอร์แต่ละครั้งเพื่อที่จะสามารถแยกภาพออกเป็นภาพของแต่ละช่วงเวลา เมื่อเราสามารถบันทึกภาพทั้ง 2 ช่วงเวลาได้เราจะนำภาพดังกล่าวมาแบ่งเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งเรียกว่า Interrogation Area (IA) ซึ่ง IA ของแต่ละภาพ (IA_1, IA_2) จะถูกนำมาผ่านกระบวนการที่เรียกว่า Cross-correlation แบบพิกเซลต่อพิกเซล คือ ทุก ๆ จุดบน IA ของทั้ง 2 ภาพ ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติเพื่อที่จะหาโอกาสที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปมากที่สุดเพื่อที่จะนำมาใช้ในการระบุการกระจัดเฉลี่ยของอนุภาค (Δx) ในแต่ละ IA หากสามารถวัดการกระจัดของอนุภาคได้แม่นยำเราก็จะได้รับความเร็วที่มีความแม่นยำด้วย

โดยเฉพาะกระบวนการ Cross-Correlation เป็นกระบวนการทางสถิติที่ใช้วัดโอกาสเป็นไปได้ที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ไปโดยค่าที่ได้สูงสุดจากระนาบความสัมพันธ์ (Correlation Plane) จะเป็นการเคาะทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค จากภาพที่ 5 พบว่า เมื่อเราได้ภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคมา 2 ภาพ โดยที่ต่างเวลากัน แต่ว่าในรูปนั้นมีอนุภาคหลายอนุภาคซึ่งทำให้ต้องมาคำนวณหาแนวโน้มที่กลุ่มอนุภาคเคลื่อนที่ไปโดยใช้หลักทางสถิติ ค่าที่ได้นั้นจะแสดงเป็นแท่งที่สูงที่สุดออกมาและจะมีแท่งเดียวเมื่อค่าที่ได้นั้นมีความแม่นยำสูง ซึ่งแท่งนั้นจะให้ตำแหน่งที่กลุ่มอนุภาคเคลื่อนที่ไป โดยให้ค่า dx และ dy และแท่งนั้นยิ่งสูงก็หมายความว่ายังมีแนวโน้มสูง



ภาพที่ 4 การแบ่ง Interrogation Area เพื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ



ภาพที่ 5 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาทิศทางและความเร็วของอนุภาค

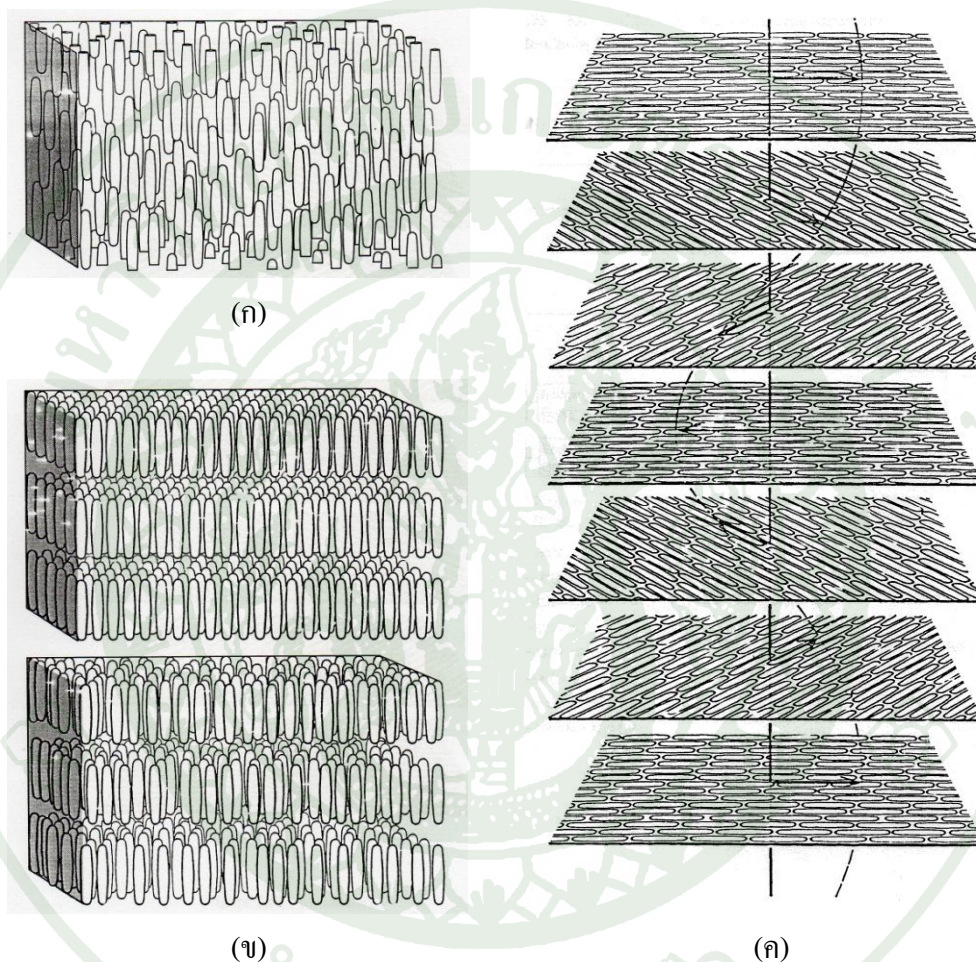
ผลึกเหลว

ผลึกเหลว (Liquid Crystals) ถูกค้นพบโดย Friedrich Reinitzer นักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย เมื่อปี 1888 ซึ่งมีเฟสอยู่ระหว่างช่วงเฟสของแข็งและเฟสของเหลว โดยมีรูปแบบการไหลเหมือนของเหลว แต่ลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสังเกตด้วยตาและคุณลักษณะทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหมือนของแข็ง

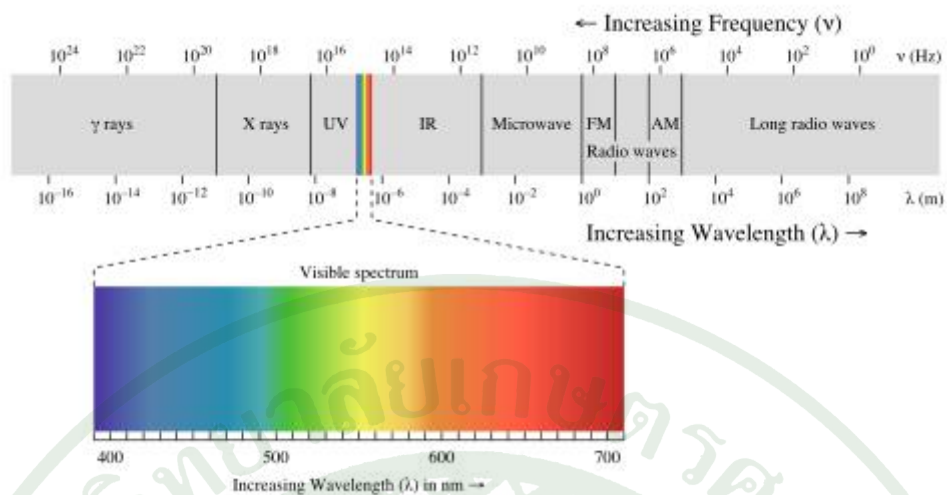
โครงสร้างโมเลกุลของผลึกเหลวได้ถูกแบ่งออกตามการจัดเรียงตัวซึ่งมี 3 แบบ ได้แก่ Nematic Phase เป็นการจัดเรียงโครงสร้างทิศทางเดียวและวางตัวขนานกัน แต่มีการกระจายของตำแหน่งที่ไม่แน่นอนและไม่จัดเรียงเป็นชั้น Smectic Phase มีการจัดเรียงโครงสร้างทิศทางเดียวและวางตัวขนานกัน มีการจัดเรียงเป็นชั้น และภายในชั้นจะมีการวางตำแหน่งทั้งแบบสม่ำเสมอและแบบที่ไม่แน่นอน และ Cholesteric Phase มีการจัดเรียงเป็นชั้น โดยภายในแต่ละชั้นจะเป็นโครงสร้างแบบ Nematic ที่มีความหนาหนึ่งโมเลกุลวางตัวขนานกันในแนวระนาบและมีการทำมุมสัมพันธ์กับชั้นใกล้เคียงในแนวแกน เมื่อมองในโครงสร้างรวมจะพบว่ามีลักษณะบิดเป็นเกลียว ดังแสดงในภาพที่ 6

โครงสร้างผลึกเหลวแบบ Cholesteric สามารถได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยทำให้โครงสร้างเกิดการยืดหดตัวได้ การยืดหดตัวนี้ส่งผลในกรณีที่มีแสงขาว (Visible light) มาตกกระทบใส่ผลึกเหลวจะเกิดความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน (ช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร) และสะท้อนออกมาในรูปแบบของระดับสีในช่วงม่วงถึงแดง ดังภาพที่ 7 และ 8 โดยที่อุณหภูมิสูงจะทำให้โครงสร้างหดตัว เกิดความยาวคลื่นที่สั้นและแสดงผลออกมาในช่วงสีม่วง สำหรับที่

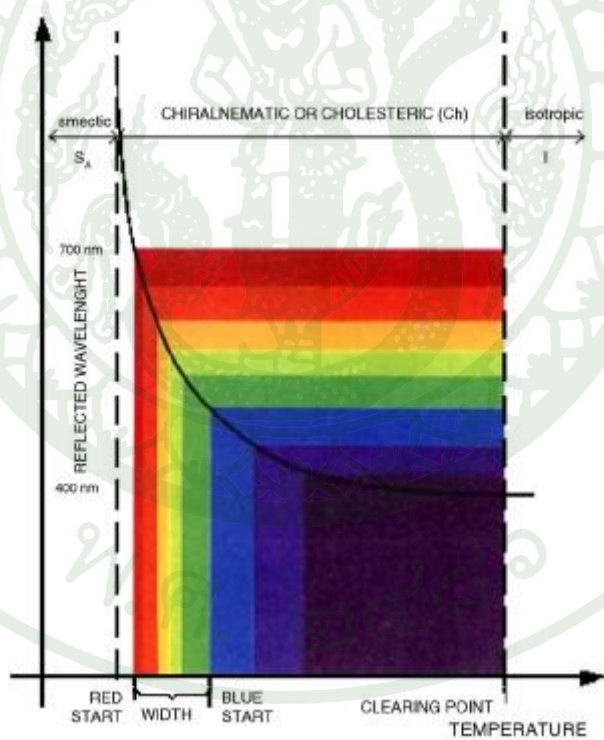
อุณหภูมิทำให้โครงสร้างขยายตัว เกิดความยาวคลื่นที่ยาวและแสดงผลออกมาในช่วงสีแดง สำหรับผลึกเหลวที่สามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ เรียกว่า Thermochromic Liquid Crystals (TLCs) โดยที่ช่วงการเปลี่ยนแปลงจะอยู่ในช่วงจำกัดประมาณ 5 ถึง 10 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับลักษณะการทดลองที่ต้องการนำผลึกเหลวไปประยุกต์ใช้



ภาพที่ 6 โครงสร้างโมเลกุลของผลึกเหลว (ก) Nematic (ข) Smectic และ (ค) Cholesteric



ภาพที่ 7 ช่วงความยาวคลื่นของแสงขาว



ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและสีที่เกิดขึ้นของผลึกเหลว

พลศาสตร์ของไหล

พลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) เป็นการศึกษาคุณสมบัติของของไหลที่มีการเคลื่อนที่ โดยสมมติให้เป็นการไหลแบบอุดมคติ สำหรับการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหล จะมีการจำกัดขอบเขตของปริมาตร (Control Volume) และวิเคราะห์การไหลบริเวณพิกัดหรือแนวระนาบ (ระนาบ x, y, และ z) ที่ต้องการ

สมการอนุรักษ์มวล

สมการอนุรักษ์มวลในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ แสดงในสมการที่ 2

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

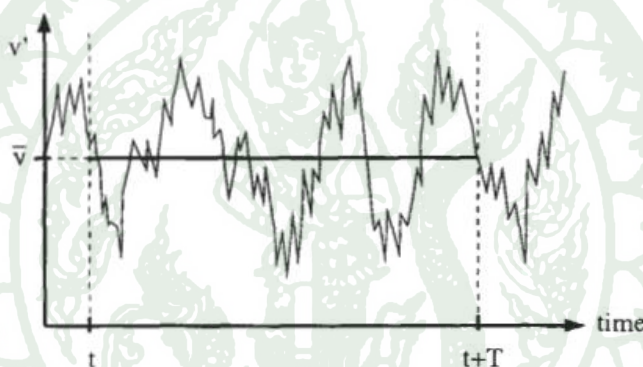
สมการอนุรักษ์มวลในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ แสดงในสมการที่ 3

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

โดยสมการที่ 3 จะถูกเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes's Equation) ซึ่งถูกประยุกต์ขึ้นมาจากกฎข้อที่สองของนิวตันกับการวิเคราะห์ความเค้นของของไหล นอกจากนี้ ยังพบว่าสมการอนุรักษ์เหล่านี้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งจะมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ แต่เราสามารถนำวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบของสมการนี้ได้ จึงเป็นที่มาของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

การไหลที่ค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) สูงกว่าค่าเลขเรย์โนลด์วิกฤต (Re_{crit}) สถานะการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการแก้ปัญหการไหลแบบปั่นป่วนทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นเรื่องยาก และใช้เวลาในการคำนวณนาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามจำลองความไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อใช้กับวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเหล่านั้น เราจำเป็นต้องทราบพฤติกรรม และคุณสมบัติพื้นฐานของความปั่นป่วนในการไหลของของไหลและสมการค่าเฉลี่ยของเรย์โนลด์



ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน

แบบจำลองความปั่นป่วน Standard k-ε

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k-ε เป็นหนึ่งในสมการความปั่นป่วนที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์ความปั่นป่วนของการไหลในวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งแบบจำลองนี้มี 2 พังก์ชันที่นำไปวิเคราะห์ลักษณะความปั่นป่วน คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulent Kinetic Energy, k) และอัตราการกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Dissipation of Turbulent Kinetic Energy, ϵ) ซึ่งแสดงในสมการที่ 4 และ 5

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

สำหรับค่า Turbulent Viscosity (μ_t) สามารถหาได้จากสมการที่ 6

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

สำหรับตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองความปั่นป่วน G_k คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ก่อตัวขึ้นเนื่องจากค่าความเร็วเฉลี่ย, G_b คือ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วนที่ก่อตัวขึ้นเนื่องจากการลอยตัว, Y_M คือ การกระจายความผันผวนของความปั่นป่วน, σ_k และ σ_ε คือค่า Turbulent Prandtl Number ของ k และ ε ตามลำดับ สำหรับตัวแปรที่เหลือ ได้แก่ $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , และ σ_ε ซึ่งเป็นค่าคงที่ จะถูกแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของตัวแปรในแบบจำลองความปั่นป่วน Standard k- ε

ตัวแปร	ค่าคงที่
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
C_μ	0.09
σ_k	1.0
σ_ε	1.3

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยการเขียนโปรแกรมหรือใช้โปรแกรมวิเคราะห์สำเร็จรูป ซึ่งมีข้อได้เปรียบเนื่องจากสามารถศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของพลศาสตร์ของไหลได้ในทุกสถานะและในทุกรูปทรง นอกจากนี้ ยังสามารถประมวลผลและแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ของการไหลออกมาได้ชัดเจน

Multiphase Model

Multiphase Model คือฟังก์ชันหนึ่งในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของการจำลองการไหล รูปแบบของโมเดลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในกรณีที่ของไหลที่ต้องการวิเคราะห์มีสารหรือของไหลผสมกันมากกว่า 1 ชนิด ซึ่งลักษณะของของไหลจะมีผลในการเลือกประเภทของโมเดลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ของไหลที่มีของแข็งผสมอยู่ในของไหล จะนิยมเลือกใช้โมเดลอยู่ 2 ประเภท คือ Mixture Model และ Eulerian Model ซึ่ง Mixture Model จะเหมาะสมกับการวิเคราะห์ Multiphase Flow ที่ไม่ซับซ้อนและช่วยประหยัดเวลาในการวิเคราะห์เนื่องจากใช้สมการการคำนวณที่จำนวนน้อยกว่า Eulerian Model

สมการการวิเคราะห์สำหรับ Mixture Model

สมการอนุรักษ์มวลในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับ Mixture Model แสดงในสมการที่ 7

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (7)$$

โดยที่ตัวแปร $\vec{v}_m$ คือ ความเร็วของของไหลผสม, ρ_m คือ ความหนาแน่นของของไหลผสม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 8 และ 9 และสำหรับ α_k คือ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตร (Volume Fraction) ของสารในแต่ละเฟส

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (8)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (9)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับ Mixture Model แสดงในสมการที่ 10

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = & -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] \\ & + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

โดยที่ตัวแปร μ_m คือ ค่าความหนืดของของไหลผสม, $\vec{v}_{dr,k}$ คือ Drift Velocity สำหรับสารในแต่ละเฟส ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 11 และ 12

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (11)$$

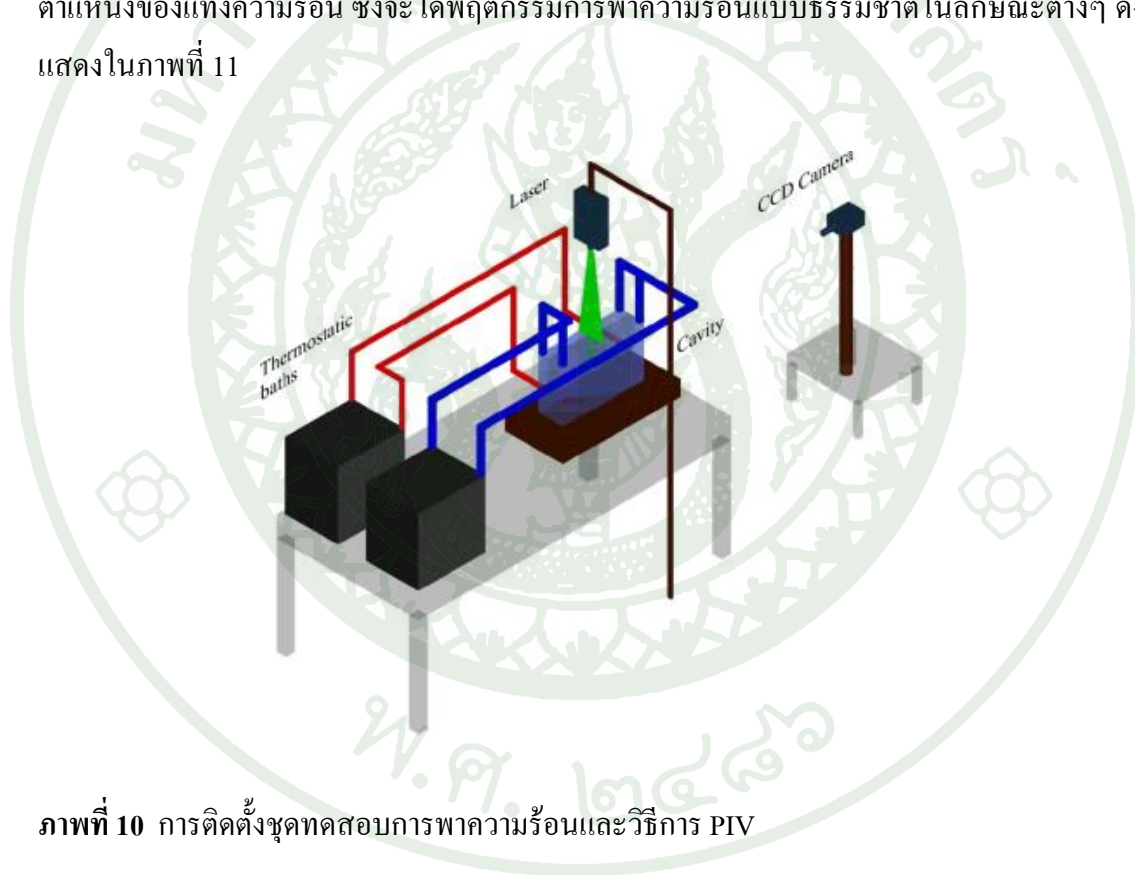
$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (12)$$

สัดส่วนเชิงปริมาตร คือ สัดส่วนระหว่างปริมาตรของสารในแต่ละสภาวะส่วนด้วยปริมาตรของของไหลผสม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 13

$$\alpha_k = \frac{\frac{m_k}{\rho_k}}{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_l}{\rho_l}} \quad (13)$$

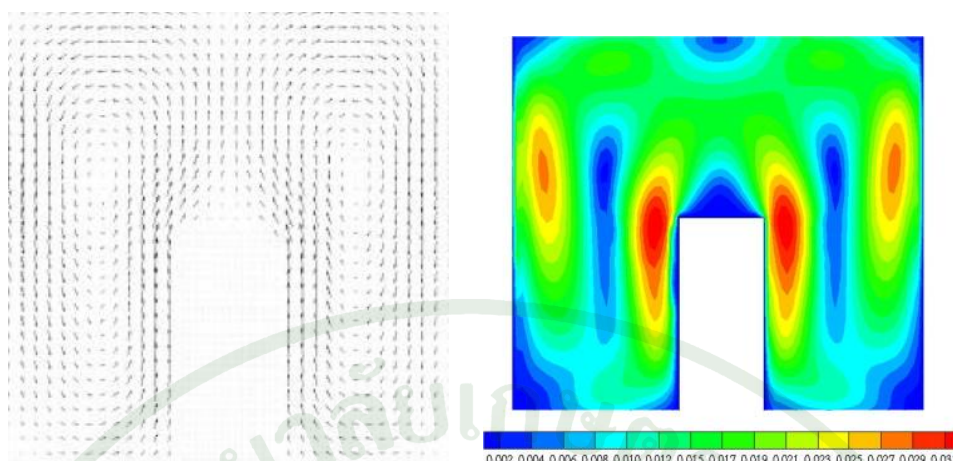
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Corvaro and Paroncini (2009) ได้สร้างชุดทดลองการพาความร้อนตามธรรมชาติด้วยวิธีการจับภาพความเร็วของอนุภาค (PIV) ประกอบด้วยห้องปิด ที่บริเวณผนังทั้งสองฝั่งควบคุมอุณหภูมิให้เย็นคงที่ และควบคุมความร้อนจากด้านล่างผ่านมายังแท่งที่ยื่นออกมาในชุดทดลองซึ่งแท่งสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งในแนวระนาบได้ ดังแสดงในภาพที่ 10 สารทดสอบใช้น้ำซึ่งผสมอนุภาคของน้ำมันที่มีขนาดประมาณ 1 ไมครอน และติดตั้งเครื่องยิงเลเซอร์จากด้านบนโดยเปิดช่องส่วนทดลองบริเวณหนึ่งให้แสงยังลอดผ่านได้ รูปภาพจะถูกบันทึกต่อเนื่องด้วยกล้องความเร็วสูงในการทดสอบจะมีการจ่ายความร้อนให้แท่งความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน และมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของแท่งความร้อน ซึ่งจะได้พฤติกรรมการพาความร้อนแบบธรรมชาติในลักษณะต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 10 การติดตั้งชุดทดสอบการพาความร้อนและวิธีการ PIV

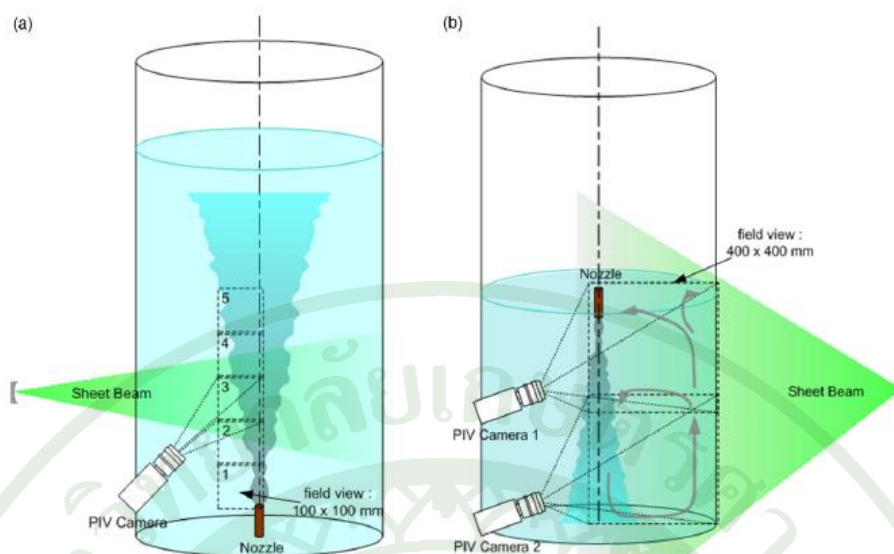
ที่มา: Corvaro and Paroncini (2009)



ภาพที่ 11 แสดง Velocity Vector และ Velocity Contour ของของไหลที่เกิดจากการพาความร้อน

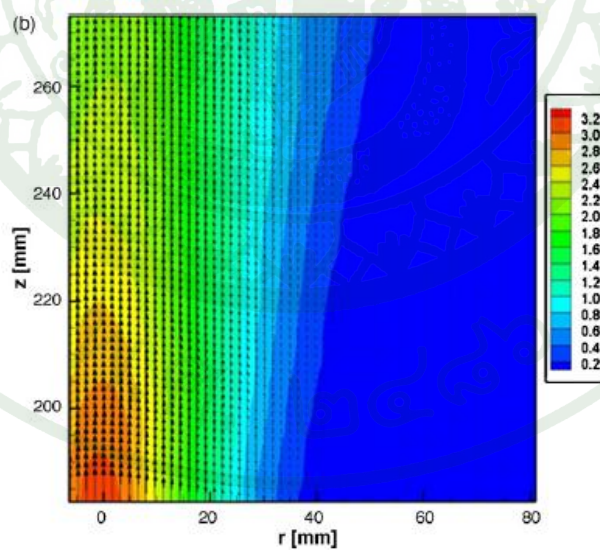
ที่มา: Corvaro *et al.* (2009)

Choo and Song (2010) ได้ทำการศึกษารูปแบบการกระจายตัวของน้ำที่พุ่งออกมาจากลำเจ็ทจากทิศทางพุ่งขึ้น (Turbulent Jet) และพุ่งลง (Pool Mixing) โดยใช้วิธีการ PIV ดังภาพที่ 12 สำหรับการทดสอบ Turbulent Jet ใช้อนุภาคสำหรับตรวจจับเป็นฟองอากาศขนาด 10-100 ไมครอน และการทดสอบแบบ Pool Mixing ใช้อนุภาคฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 20-50 ไมครอน รูปแบบการตรวจจับสำหรับ Turbulent Jet ใช้กล้อง 1 ตัว ตรวจจับเฟรมขนาด 100x100 ตารางมิลลิเมตร ที่ 5 ระดับ โดยเวกเตอร์ความเร็วที่เกิดขึ้นจาก Turbulent Jet ถูกแสดงในภาพที่ 13 และรูปแบบ Pool Mixing ใช้กล้อง 2 ตัว ตรวจจับเฟรมขนาด 400x400 ตารางมิลลิเมตร ที่ระดับความสูงตลอดชุดทดสอบดังแสดงในภาพที่ 14



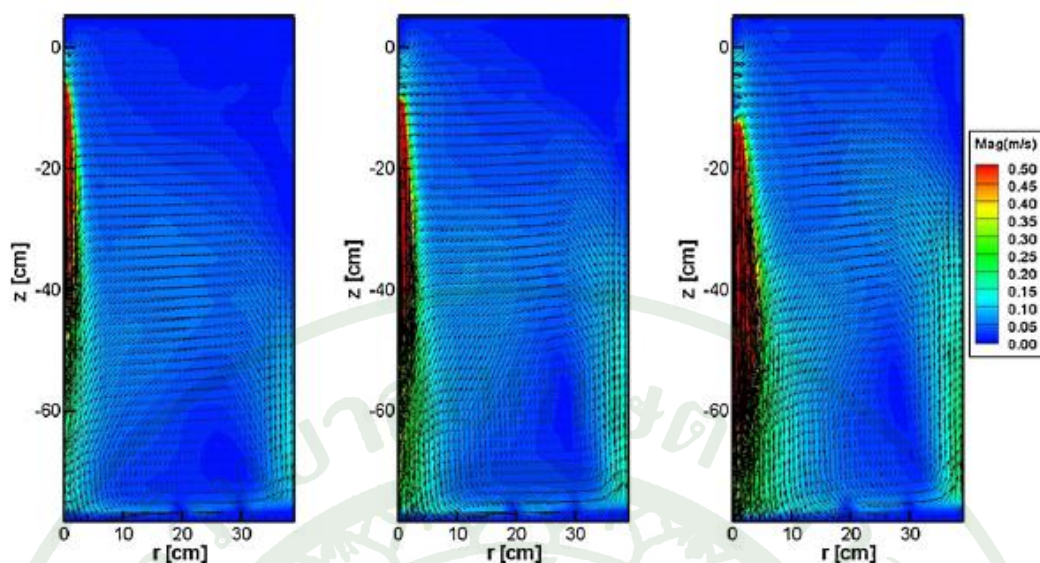
ภาพที่ 12 ขั้นตอนการยิงลำแสงและตรวจจับอนุภาคสำหรับการทดลอง Turbulent Jet และ Pool Mixing

ที่มา: Choo and Song (2010)



ภาพที่ 13 แสดง Average Velocity Vector สำหรับการทดลอง Turbulent Jet

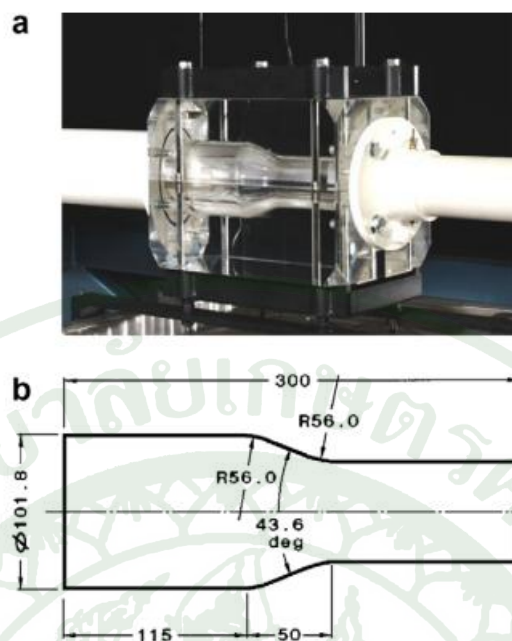
ที่มา: Choo and Song (2010)



ภาพที่ 14 แสดงลักษณะการไหลของการทดลอง Pool Mixing ที่อัตราการไหลเชิงมวลต่างๆ

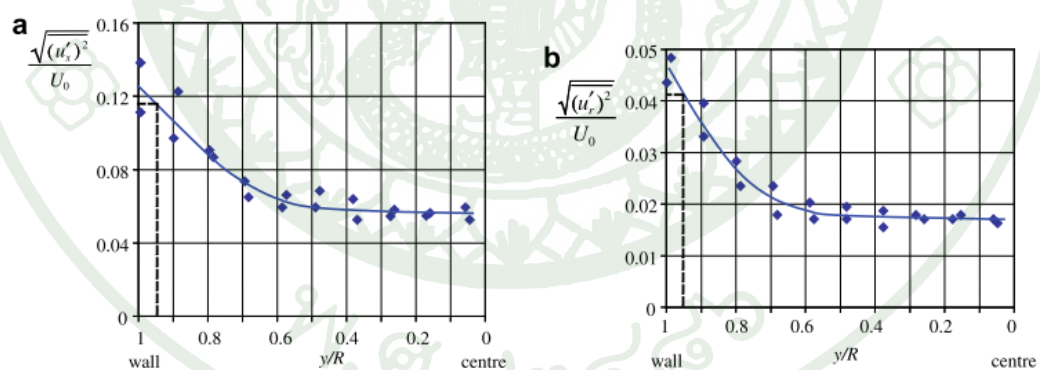
ที่มา: Choo and Song (2010)

Deev *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาลักษณะความเร็วบริเวณผิวท่อ Reducer ในรูปความเร็วไร้หน่วยด้วยวิธีการ PIV โดยที่ชุดทดสอบสร้างจากท่ออะคริลิกใสกลวงและมีช่วงลดขนาดท่ออยู่ภายในดังแสดงในภาพที่ 15 ของไหลภายในท่อจะถูกผสมด้วยอนุภาคโพลิสตีลีนขนาด 30 ไมครอน และมีค่าเลขเรย์โนลด์ที่ 43,000 ชุดติดตั้งเลเซอร์จะยิงแผ่นลำแสงในแนวระนาบและกล้องความเร็วสูงจะบันทึกภาพถ่ายจากด้านบน การยิงลำแสงและบันทึกภาพจะถูกควบคุมด้วยชุดซิงโครไนส์ซึ่งกำหนดให้ชุด PIV ยิงและบันทึกที่อัตรา 10 ชุดข้อมูลต่อวินาที และชุดภาพแต่ละคู่จะถูกนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อให้ได้เวกเตอร์ลัพธ์ของความเร็ว จากนั้นข้อมูลความเร็วในแนวท่อและแนวรัศมีได้ถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะความเร็วบริเวณผิวท่อต่อไปดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 15 แสดงท่อ Reducer สำหรับการทดลองด้วยวิธีการ PIV

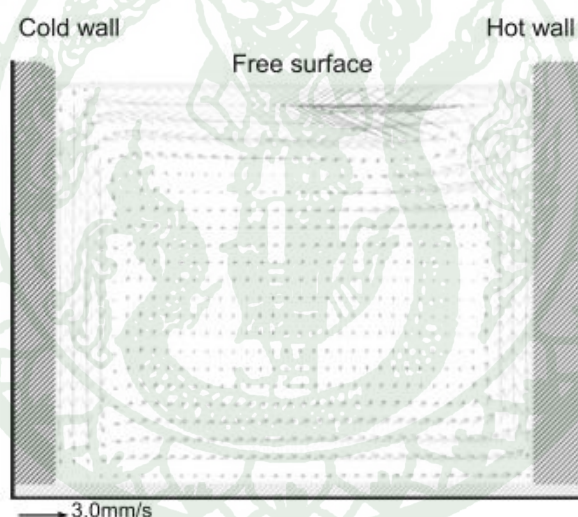
ที่มา: Deev *et al.* (2009)



ภาพที่ 16 แสดงความเร็วไร้หน่วยในทิศทางตามแนวการไหลและทิศทางตามแนวรัศมีของชุดทดสอบ

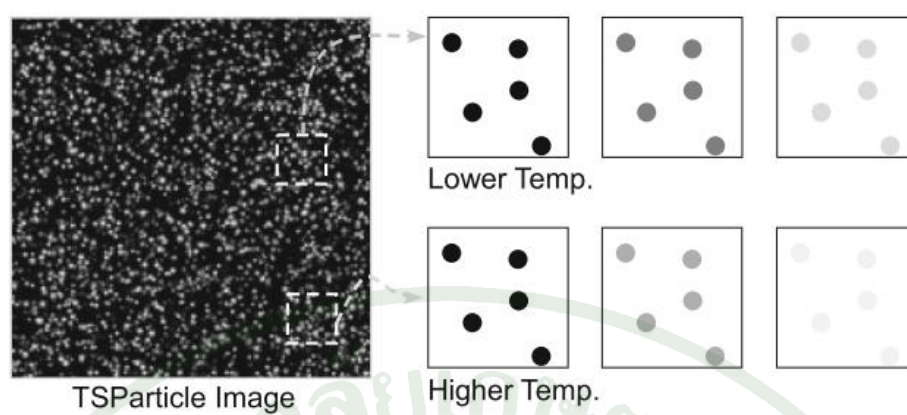
ที่มา: Deev *et al.* (2009)

Satoshi *et al.* (2010) ได้ทดสอบหาเวกเตอร์ความเร็วและลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ชุดทดสอบได้ติดตั้งแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองด้านซึ่งควบคุมอุณหภูมิให้แตกต่างกัน สำหรับของไหลได้ใช้น้ำมันที่สามารถเรืองแสงได้เมื่อได้รับการกระตุ้นจากการยิงลำแสงมากระทบ ซึ่งมีขนาด 15 ไมครอน โดยคุณสมบัติในการเรืองแสงของอนุภาคนี้อยู่กับอุณหภูมิโดยรอบ นอกจากนี้ยังมีแผ่นลำแสงอัลตราไวโอเลตส่องตั้งฉากกับชุดทดสอบ และกล้องความเร็วสูงบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่อัตรา 15,000 เฟรมต่อวินาที ภาพที่ถูบันทึกจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Cross-Correlation (วิธีการ PIV) เพื่อให้แสดงผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบสนามเวกเตอร์ความเร็วดังแสดงในภาพที่ 17 สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิจะใช้ระยะเวลาการเรืองแสงของอนุภาค TSPs มาหาค่าความเข้มแสง (Intensity) โดยระยะเวลาการเรืองแสงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิโดยรอบมีค่าที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 18 และค่าความเข้มแสงได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเพื่อสร้าง Temperature Mapping ขึ้นมา ดังแสดงในภาพที่ 19



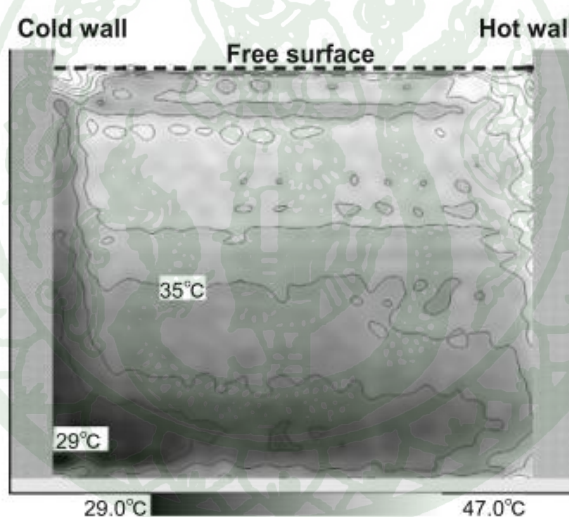
ภาพที่ 17 แสดงสนามเวกเตอร์ความเร็วด้วยวิธีการ PIV

ที่มา: Satoshi *et al.* (2010)



ภาพที่ 18 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Intensity ของอนุภาค TSPs ที่อุณหภูมิต่ำและสูง

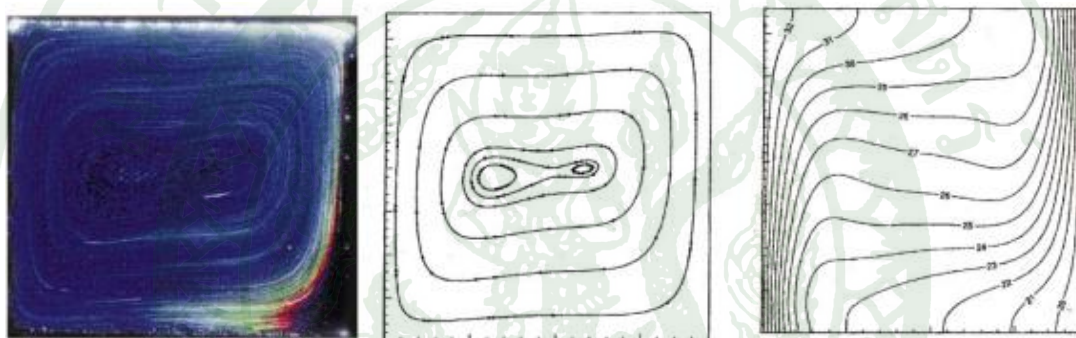
ที่มา: Satoshi *et al.* (2010)



ภาพที่ 19 แสดง Temperature Mapping ที่ได้จากการแปลงค่า Intensity ของอนุภาค TSPs

ที่มา: Satoshi *et al.* (2010)

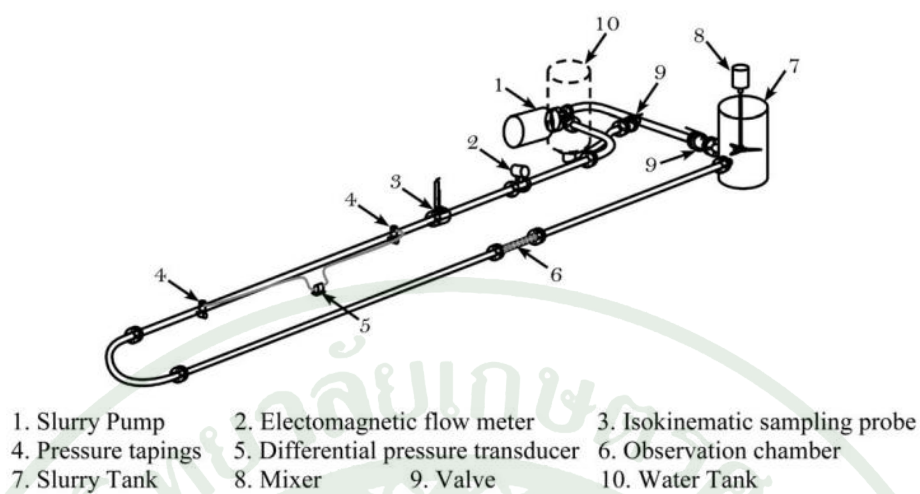
Cuckovic-Dzodzo *et al.* (1999) ได้ศึกษาการพาความร้อนแบบธรรมชาติในชุดทดสอบระบบปิด ของไหลในชุดทดสอบได้ผสมอนุภาคฟลักเคลว (TLCs) ขนาด 100 ไมครอน ที่ความเข้มข้น 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ชุดทดสอบถูกสร้างจากอะคริลิกใสและติดตั้งแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณด้านข้างซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิของผิวสัมผัสที่ 19.3 และ 32.6 องศาเซลเซียสตามลำดับ ชุดยังลำแสงอัลตราไวโอเลตได้ถูกติดตั้งและยังเข้าสู่ชุดทดสอบจากด้านบน และปรากฏการณ์การพาความร้อนจะถูกบันทึกด้วยกล้องบันทึกภาพ นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของการพาความร้อนเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยฟลักเคลว จากการทดลองพบว่า เกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติและเกิดสัณฐานจากอนุภาคออกมาซึ่งสามารถนำไปหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชุดทดสอบได้ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 แสดงสนามอุณหภูมิการพาความร้อนด้วยธรรมชาติจากการทดลองด้วยฟลักเคลวและการคำนวณเชิงตัวเลข

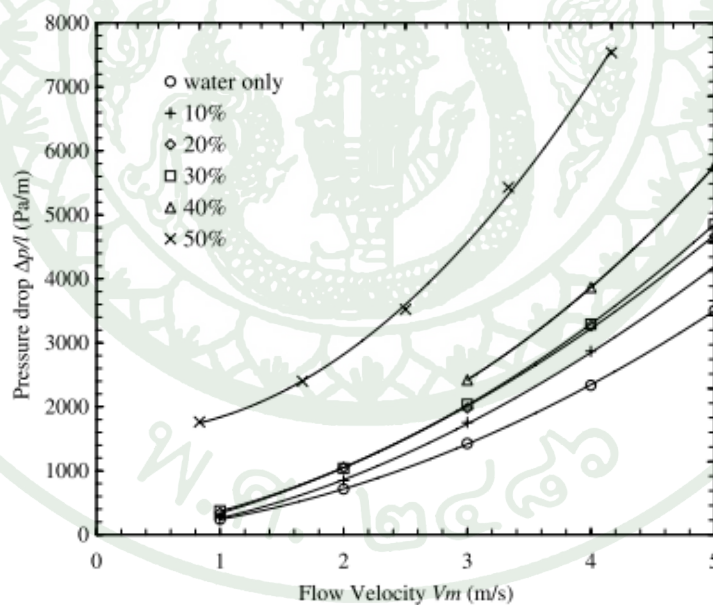
ที่มา: Cuckovic-Dzodzo *et al.* (1999)

Kuashal *et al.* (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความดันตกคร่อมของของไหลในท่อ โดยชุดทดสอบเป็นระบบท่อแบบปิดดังแสดงในภาพที่ 21 มีการติดตั้งปั๊มหอยโข่งซึ่งมีการควบคุมความเร็วรอบใบพัดทำให้เกิดความเร็วของการไหลในท่ออยู่ในช่วง 1 ถึง 5 เมตรต่อวินาที ของไหลในท่อได้ผสมอนุภาคขนาด 125 ไมครอน และมีการปรับอัตราส่วนผสมอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีเซนเซอร์วัดความดันติดตั้งสองตำแหน่งห่างกัน 3 เมตร เพื่อวัดความดันตกคร่อมในท่อ จากผลการทดลอง พบว่าของไหลที่ผสมอนุภาคน้อยจะส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมที่น้อยกว่าของไหลที่ผสมอนุภาคมาก และที่ความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้นจะเกิดความดันตกคร่อมที่มากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 21 แสดงชุดทดสอบการวัดความดันตกคร่อมของของไหล

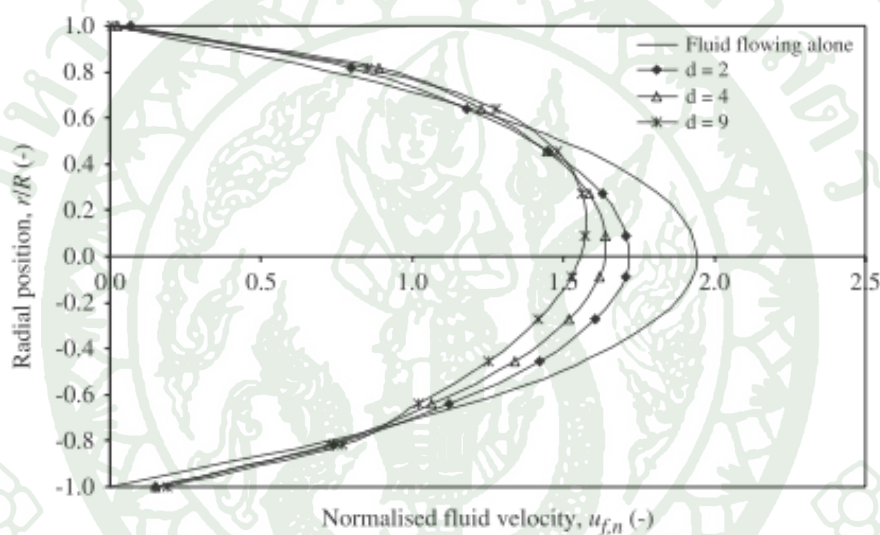
ที่มา: Kuashal *et al.* (2005)



ภาพที่ 22 แสดงความดันตกคร่อมของของไหลที่ผสมอนุภาคขนาด 125 ไมครอน ที่ความเร็วการไหลและอัตราส่วนผสมของอนุภาคที่แตกต่างกัน

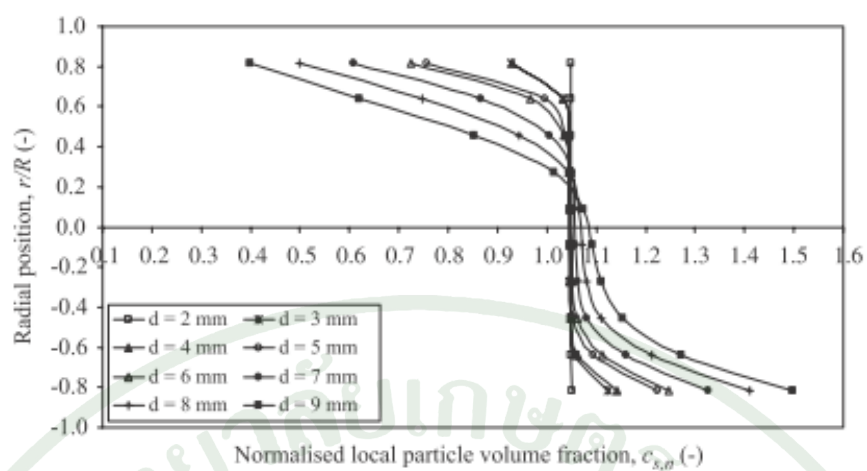
ที่มา: Kuashal *et al.* (2005)

Eesa and Barigou (2008) ได้จำลองการไหลของของไหลที่มีอนุภาคผสมในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 2 ถึง 9 มิลลิเมตร ท่อจำลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร และความยาว 6 เมตรเพื่อให้ของไหลมีลักษณะการไหลเป็น Fully-Developed และมีความเร็วทางเข้า 0.125 เมตรต่อวินาที จากการจำลองการไหล พบว่าขนาดของอนุภาคมีผลต่อความเร็วของของไหล โดยขนาดอนุภาคที่ใหญ่ทำให้ความเร็วของของไหลไม่สมมาตรในแนวระนาบ ซึ่งบริเวณช่วงบนของท่อจะพบความเร็วที่มากกว่าบริเวณช่วงล่าง ดังแสดงในภาพที่ 23 นอกจากนี้ยังพบว่า อนุภาคขนาดใหญ่เกิดการตกตะกอนมากกว่าอนุภาคขนาดเล็กดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 23 ผลการจำลองการไหลที่แสดงความเร็วของของไหลที่ผสมอนุภาคในอัตราส่วน 25 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรที่ขนาดต่างๆ

ที่มา: Eesa and Barigou (2008)



ภาพที่ 24 แสดงสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคนาขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่งหน้าตัดภายในท่อ

ที่มา: Eesa and Barigou (2008)

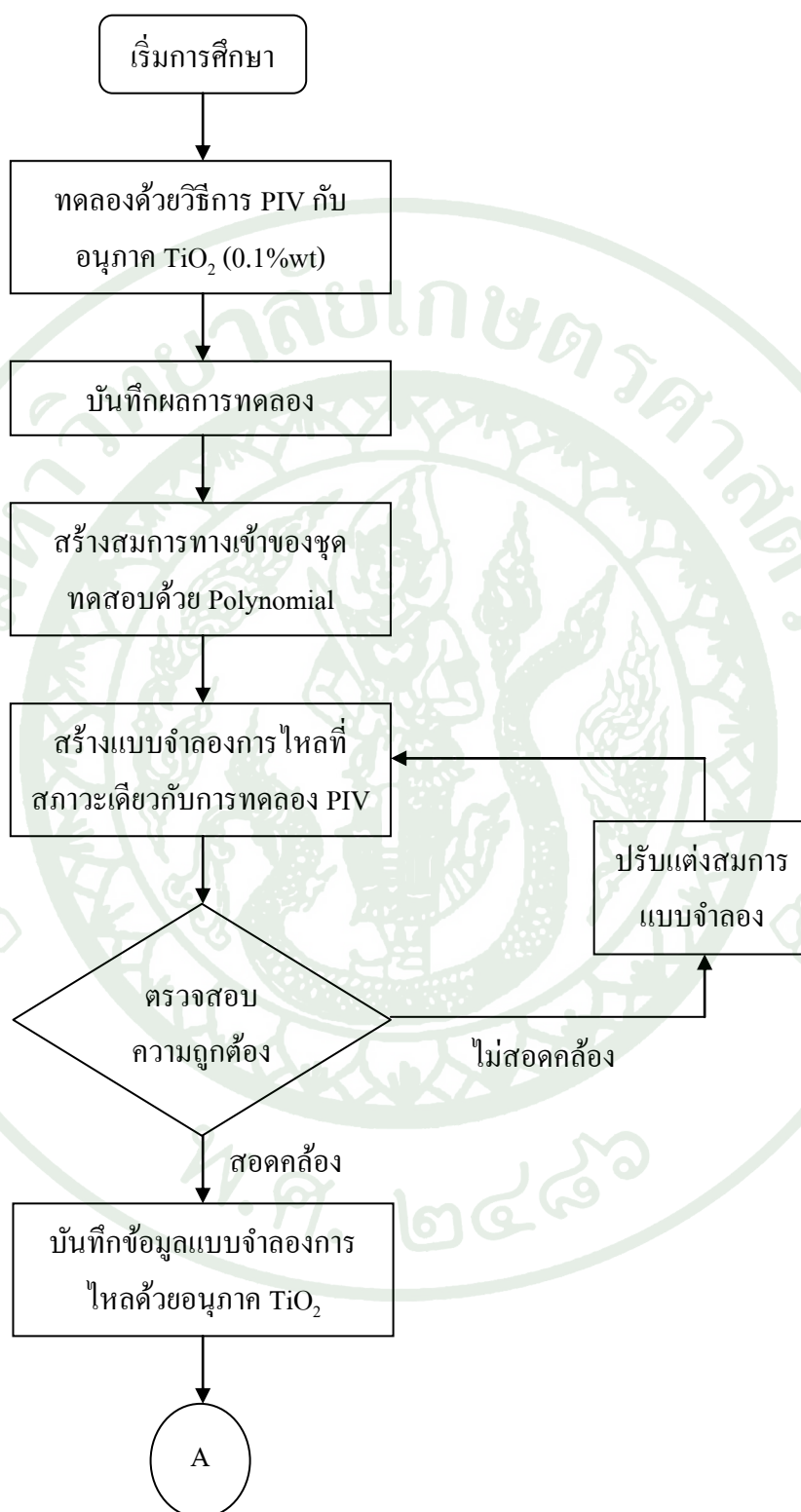
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

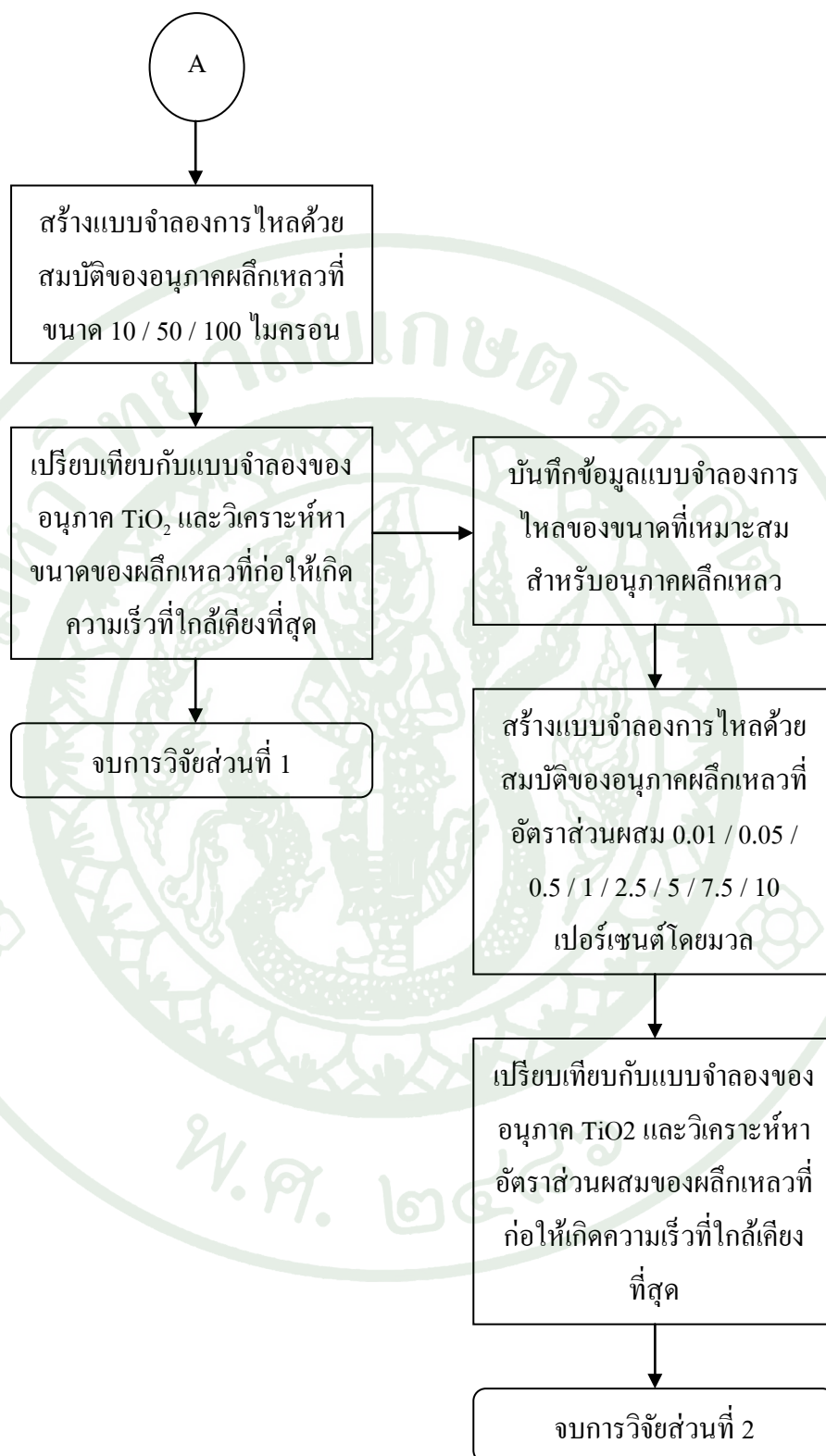
1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. ชุดท่อดีฟิวเซอร์
3. ปืนน้ำ
4. อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)
5. กล้องความเร็วสูง
6. เครื่องมือวิเคราะห์ความเร็วอนุภาค (PIV)
7. โปรแกรม Gambit และ ANSYS (Fluent)

ภาพที่ 25 แสดงถึงกระบวนการและวิธีวิจัย ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ (1) การศึกษาความเร็วในท่อดีฟิวเซอร์ด้วยวิธีการ PIV (2) การสร้างแบบจำลองการไหลโดยใช้สถานะเดียวกับวิธีการ PIV (3) การเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลระหว่างคุณสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และผลึกเหลว และ (4) การเปรียบเทียบความเข้มข้นของอนุภาคผลึกเหลว

กระบวนการและวิธีวิจัย



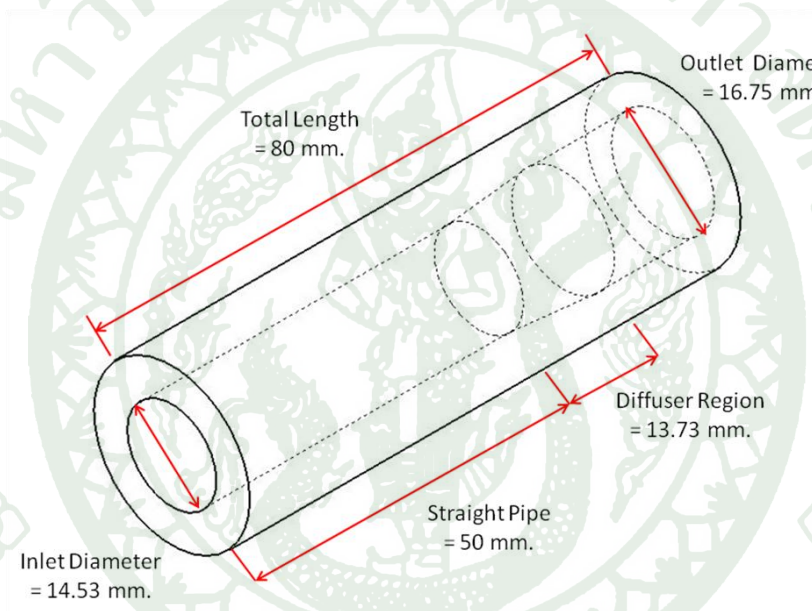
ภาพที่ 25 แผนผังวิธีการวิจัย



ภาพที่ 25 (ต่อ)

การทดลองด้วยวิธีการ PIV

การสร้างชุดทดสอบ PIV ได้นำข้อมูลการวิจัยมาจาก วิชัย (2553) ที่ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของครีบริดฟิวเซอร์ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ชุดทดสอบถูกสร้างจากท่ออะคริลิกใสซึ่งเจาะกลวงเพื่อให้เป็นทางผ่านของของไหล ขนาดรูเจาะของท่อได้นำข้อมูลของครีบริดมาแปลงเป็นหน้าตัดทางเข้าและทางออกแบบวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ 14.53 มม และ 16.75 มม ตามลำดับ โดยมีความยาวในช่วงรีดฟิวเซอร์อยู่ที่ 13.73 มม และความยาวทั้งหมดของชุดทดสอบอยู่ที่ 80 มม ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ชุดทดสอบที่สร้างจากท่ออะคริลิก

ส่วนประกอบของอุปกรณ์ PIV จะประกอบด้วย ชุดทดลอง เครื่องยิงเลเซอร์ความเข้มสูง กล้องบันทึกภาพ ความเร็วสูง และชุดประมวลผลภาพ ดังภาพที่ 27

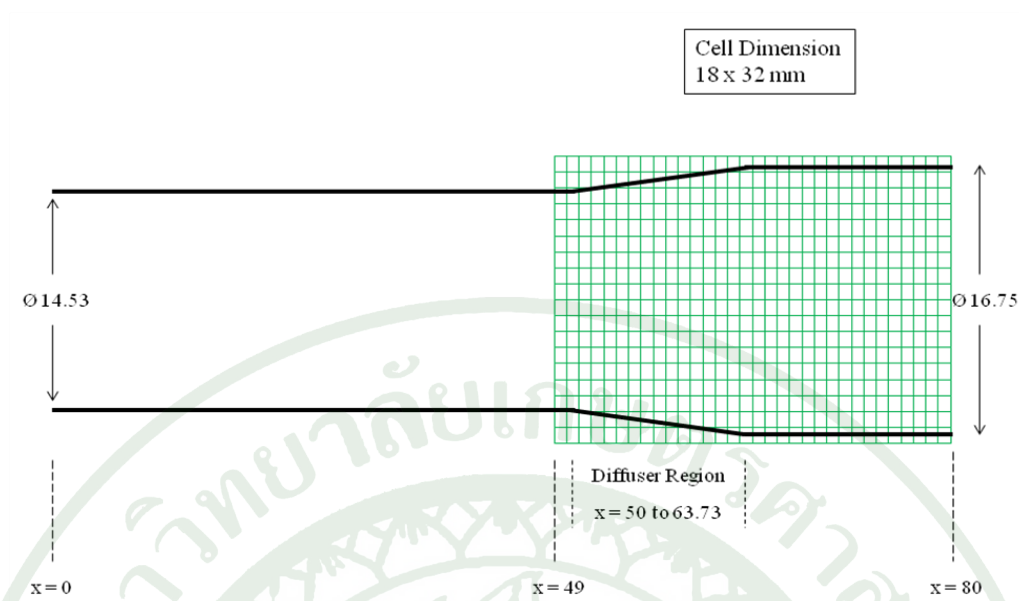
ชุดทดลองจะถูกบรรจุอยู่ในตู้พลาสติกใส ภายในตู้จะบรรจุน้ำที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีขนาด 3 ไมครอนในอัตราส่วน 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล และท่ออะคริลิกจะติดตั้งเข้ากับปั๊มน้ำที่มีอัตราการไหลที่ 500 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะได้ความเร็วที่ทางเข้าชุดทดสอบอยู่ที่ 0.9 เมตรต่อวินาที (เลขเรย์โนลด์ 13,000) และเป็นการไหลแบบต่อเนื่อง

เครื่องยิงเลเซอร์ความเข้มสูงที่มีความยาวคลื่น 523 นาโนเมตร จะสร้างลำแสงออกมาเป็นเส้นตรง จากนั้นจะถูกหักเหด้วยเลนส์เว้าและเลนส์นูน และได้ออกมาเป็นแผ่นลำแสงในแนวตั้งฉากส่งไปยังบริเวณชุดทดสอบ การยิงเลเซอร์ จะทำการยิงออกมาเป็นชุดๆ ละสองครั้งต่อเนื่องกัน ในขณะเดียวกัน กล้องบันทึกภาพ จะบันทึกภาพตามจังหวะการยิงของเลเซอร์ ซึ่งจังหวะการยิงของเลเซอร์และการบันทึกภาพจะถูกควบคุมด้วยเครื่องซิงโครไนเซอร์ (Synchronizer) โดยในงานวิจัยนี้ ได้ทำการยิงเลเซอร์และบันทึกภาพเป็นจำนวน 40 ชุด โดยนำภาพแต่ละชุดไปวิเคราะห์ทิศทางและความเร็วการไหลออกมาเป็น 40 ภาพ และนำภาพทั้งหมดมาเฉลี่ยความเร็วเพื่อออกมาเป็นเวกเตอร์ความเร็ว 1 ภาพ



ภาพที่ 27 ชุดทดลองการไหลและเครื่องมือวิเคราะห์ความเร็วอนุภาค

พื้นที่สำหรับการวิเคราะห์ความเร็ว อยู่บริเวณทางเข้าช่วงดิฟฟิวเซอร์ของชุดทดสอบ (ตำแหน่งที่ 49 มม) จนถึงปลายทางออกของท่อ (ตำแหน่งที่ 80 มม) และครอบคลุมบริเวณท่อทั้งหน้าตัด (ความกว้างทั้งหมด 18 มม) ซึ่งจะได้พื้นที่วิเคราะห์ทั้งหมด 18x32 มม และได้แบ่งพื้นที่เพื่อวิเคราะห์เวกเตอร์ความเร็วแต่ละค่าอยู่ที่ขนาด 1x1 มม ซึ่งจะได้จำนวนเวกเตอร์ความเร็วทั้งหมด 576 ตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 พื้นที่สำหรับการวิเคราะห์ความเร็ว ขนาด 18x32 มม.

การสร้างแบบจำลองการไหล

ในการสร้างแบบจำลองการไหล จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

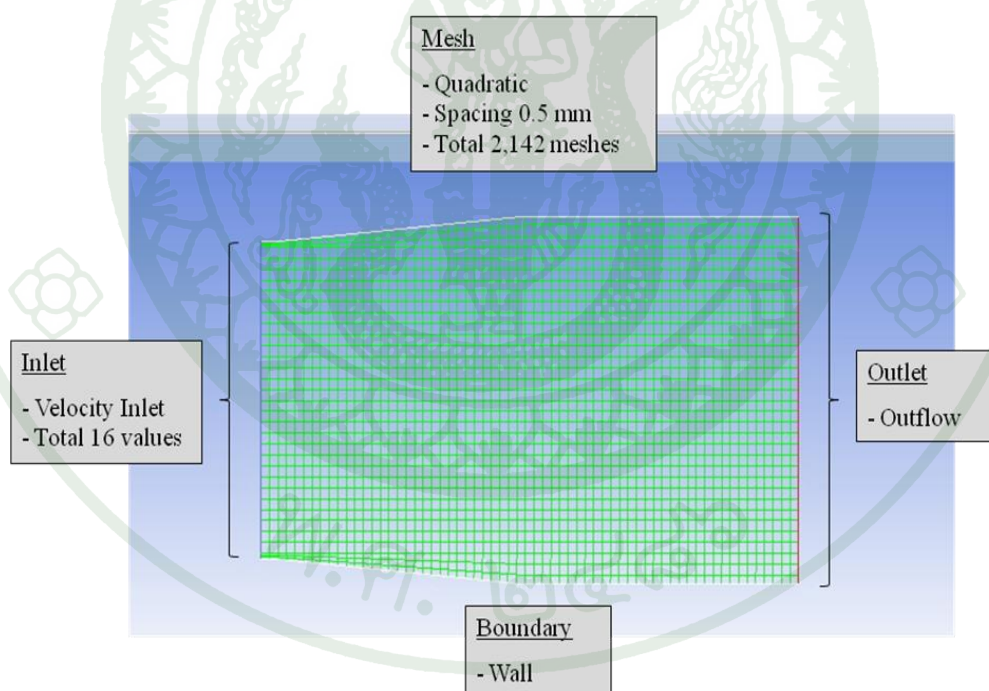
1. การสร้างและกำหนดสถานะของแบบจำลองการไหล

แบบจำลองการไหลได้ถูกสร้างขึ้นเป็นแบบ 2 มิติ และมีขนาดสัดส่วนเท่ากับชุดทดลองจริงในส่วนบริเวณช่วงคิฟิวเซอร์ (ตำแหน่งที่ 49 ถึง 80 มม ของชุดทดลอง) ดังแสดงในภาพที่ 29

โครงสร้างตาข่ายของแบบจำลองการไหลถูกสร้างด้วยโปรแกรม GAMBIT โดยกำหนดรูปแบบเป็น Quadratic มีการกำหนดขนาดโครงสร้างที่ 0.25, และ 0.5 มม ซึ่งเมื่อพิจารณาเรื่อง Grid Independence จะพบว่าขนาดโครงสร้างที่ 0.5 มม (จำนวนโครงสร้าง 2,142 ชิ้น) นั้นเพียงพอในการจำลองการไหล ดังแสดงในภาพที่ 30

การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองการไหล บริเวณทางเข้าจะถูกกำหนดเป็น Velocity Inlet ซึ่งจะมีทางเข้าทั้งหมด 16 ตำแหน่งที่ระยะทุกๆ 1 มม สำหรับค่าความเร็วที่แต่ละช่องทางเข้าจะนำมาจากผลการทดลองด้วยวิธีการ PIV ในส่วนของทางออกจะถูกกำหนดเป็น Outflow และบริเวณผิวท่อจะถูกกำหนดเป็น Wall

สำหรับสภาวะของของไหลในแบบจำลอง ถูกกำหนดเป็นการไหลแบบสภาวะคงตัว (Steady-State Flow) โมเดลของของไหลถูกกำหนดเป็น Multiphase แบบ Mixture Type เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะของไหลที่มีสถานะเป็นน้ำและมีสารแขวนลอยผสมอยู่ และมีแบบจำลองความปั่นป่วนเป็นแบบ Standard k- ϵ โดยระบุค่าคงที่สำหรับ Intensity และ Length Scale อยู่ที่ 0.05 และ 0.001 มม ตามลำดับ



ภาพที่ 29 โมเดลจำลองการไหลและการกำหนดขอบเขต

**Velocity Comparison of Grid Independence
between 0.25 and 0.5**



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบ Grid Independence ระหว่าง 0.25 และ 0.5

2. การกำหนดคุณสมบัติของอนุภาคแบบจำลองการไหล

การจำลองการไหล เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง PIV ในงานวิจัยนี้ได้ใช้คุณสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 3 ไมครอนมาใช้ในการจำลอง ซึ่งแสดงในตารางที่ 2

ในการจำลองการไหลด้วยอนุภาคผลึกเหลว ทางผู้ผลิตได้ระบุถึงขนาดของผลึกเหลวจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 ไมครอน ผู้วิจัยจึงได้กำหนดขนาดของอนุภาคผลึกเหลวในการจำลองออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่ 10, 50, และ 100 ไมครอน และสำหรับคุณสมบัติต่างๆ ของผลึกเหลว ได้ถูกแสดงในตารางที่ 2 และจะนำข้อมูลของแบบจำลองอนุภาคผลึกเหลว ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของแบบจำลองอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของอนุภาคสำหรับแบบจำลองการไหล

คุณสมบัติ	TiO ₂	Liquid Crystal
ขนาด (μm)	3	10 / 50 / 100
ความหนาแน่น (kg/m ³)	4,000	1,100
ความหนืด (kg/m•s)	5	0.0398
อัตราส่วนผสมโดยมวล (%wt)	0.1	0.1
สัดส่วนโดยปริมาตร	0.00025	0.000908

ที่มา: Lutjen et al. (2001), Qingkun et al. (2011)

ในงานวิจัยนี้ยังมีการศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของผลึกเหลว ผู้วิจัยได้ทำการปรับอัตราส่วนผสมของอนุภาคผลึกเหลวในของไหล ซึ่งปริมาณความเข้มข้นจะส่งผลต่อสัดส่วนโดยปริมาตรที่จะถูกระบุในแบบจำลองการไหล โดยความเข้มข้นที่นำมาจำลองการไหลจะแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งผลการจำลองความเข้มข้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองการไหลด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 3 สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคผลึกเหลวที่ความเข้มข้นต่างๆ

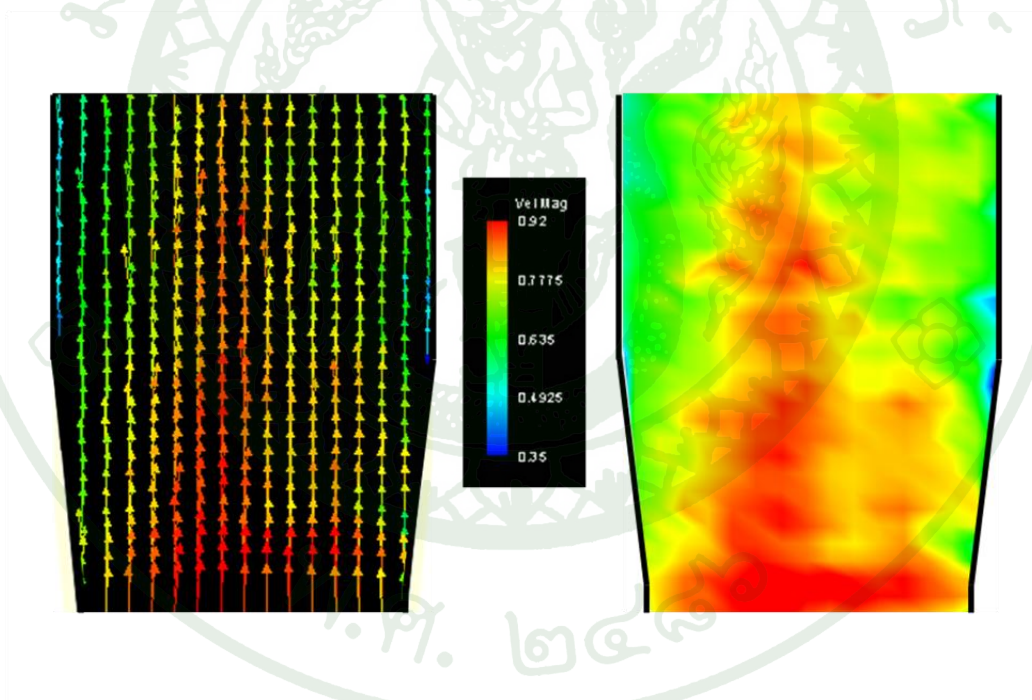
ความเข้มข้น (%wt)	สัดส่วนโดยปริมาตร
0.01	0.000091
0.05	0.000454
0.1	0.000908
0.5	0.004539
1	0.009083
2.5	0.022739
5	0.045584
7.5	0.068535
10	0.091593

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาคุณลักษณะการไหลบริเวณท่อคิฟิวเซอร์ด้วยวิธีการ PIV การจำลองการไหลด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และอนุภาคฟลักเหลว ผลการวิจัยสามารถแสดงได้ดังนี้

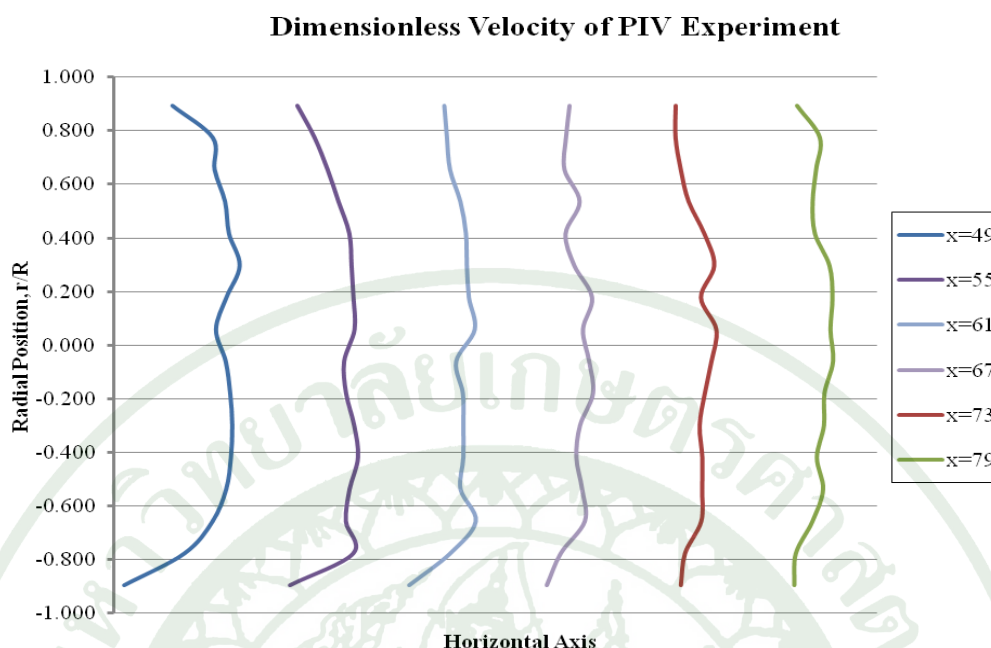
วิธีการถ่ายภาพอนุภาคในของไหล (PIV)

จากการทดลองด้วยวิธีการถ่ายภาพอนุภาคในของไหลบริเวณท่อคิฟิวเซอร์ที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ที่ 13,000 ในภาพที่ 31 พบว่า บริเวณทางเข้าบริเวณคิฟิวเซอร์มีค่าความเร็วในแต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกันและมีลักษณะเป็น Non-Uniform and Developed Flow และภายในท่อคิฟิวเซอร์พบว่าความเร็วจะมีค่าลดลงตามระยะทางของท่อที่เพิ่มขึ้น โดยจะมีแถบสีบ่งบอกถึงค่าความเร็วของเวกเตอร์ในแต่ละตำแหน่ง



ภาพที่ 31 สนามความเร็วบริเวณท่อคิฟิวเซอร์จากวิธีการ PIV

เมื่อนำค่าความเร็วของการทดลองด้วยวิธีการ PIV มาสังเกตพฤติกรรมที่ตำแหน่งต่างๆ ของชุดทดสอบ (ตำแหน่งที่ 49, 55, 61, 67, 73, และ 79 มม) โดยนำค่าความเร็วทุกตำแหน่งมาหารกับค่าความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นในการทดลองซึ่งจะได้ออกมาเป็นความเร็วไร้หน่วยที่ทุกตำแหน่งในพื้นที่วิเคราะห์ พบว่า ทุกตำแหน่งมีความผันผวนของความเร็ว และการไหลเป็นแบบ Developing Flow ทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ความเร็วไร้หน่วยที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองด้วยวิธีการ PIV

การไหลแบบ Developing Flow ที่พบในการทดลอง เกิดขึ้นจากความยาวท่อจนถึงทางเข้าชุดทดสอบมีเพียง 50 มม. ซึ่งความยาวทางเข้าชุดทดสอบจะทำให้เกิดการไหลแบบพัฒนาเต็มท่อ (Fully-Developed Flow) ได้นั้น มีค่าความยาวช่องทางเข้า $L_e = 31$ ซม. ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14 และ 15 โดยที่เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (D) และเลขเรย์โนลด์ (Re) มีค่า 14.53 มม. และ 13,000 ตามลำดับ

$$L_e = EL \times D \quad (14)$$

$$EL_{\text{turbulent}} = 4.4 \text{Re}^{1/6} \quad (15)$$

ค่าความเร็วทางเข้าที่เกิดจากการทดลอง PIV ได้ถูกนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ของความเร็วและตำแหน่งทางเข้าที่จุดต่างๆ โดยใช้สมการโพลีโนเมียลลำดับที่สี่ ซึ่งได้แสดงในสมการที่ 16 จากนั้น เมื่อป้อนค่าตำแหน่งทางเข้าจำนวน 16 ค่า ($x = 1$ ถึง 16) จะได้ค่าความเร็วที่ทางเข้า (v_{inlet}) ที่ตำแหน่งนั้นๆ ซึ่งข้อมูลตำแหน่งและความเร็วได้แสดงในตารางที่ 4 โดยเมื่อทำการตรวจทานสมการความสัมพันธ์โพลีโนเมียลลำดับที่สี่กับวิธีการ PIV พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) อยู่ที่ 0.9701

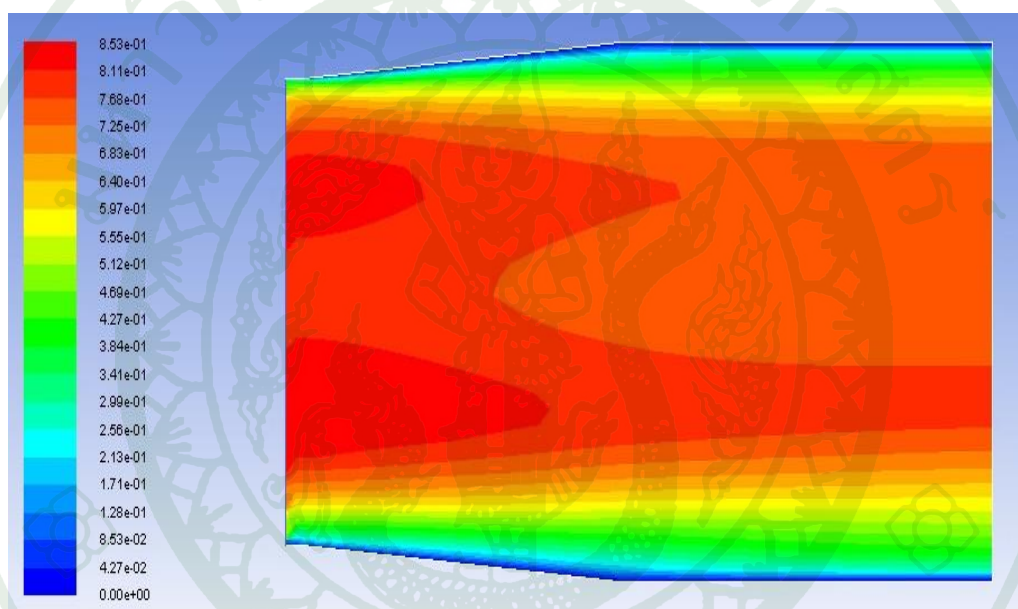
$$v_{inlet} = -0.0003x^4 + 0.0096x^3 - 0.1078x^2 + 0.4967x + 0.0296 \quad (16)$$

ตารางที่ 4 ความเร็วทางเข้าสำหรับแบบจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และอนุภาคสลิคเหลว

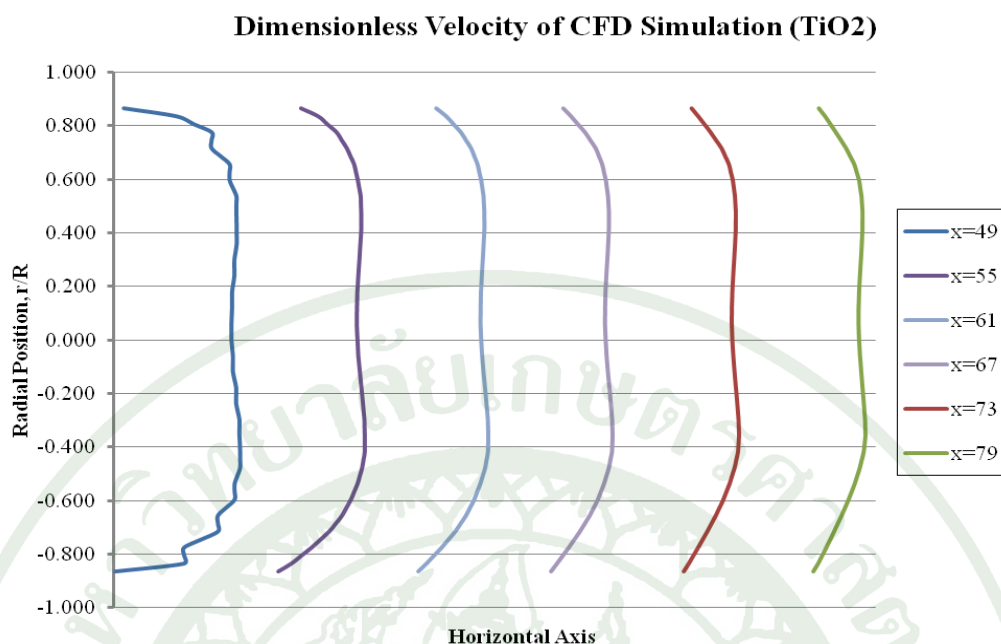
ตำแหน่งที่	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
1	0.4252
2	0.6614
3	0.7823
4	0.8276
5	0.8298
6	0.8141
7	0.7986
8	0.7942
9	0.8045
10	0.8262
11	0.8484
12	0.8532
13	0.8157
14	0.7035
15	0.4772
16	0.0901

การจำลองการไหลโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารแขวนลอย

จากการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่สถานะเดียวกันกับวิธีการ PIV ซึ่งใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ขนาด 3 ไมครอน ที่อัตราส่วนผสม 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย และการกำหนดค่าความเร็วทางเข้าจากสมการความสัมพันธ์ (สมการที่ 3) พบว่า ลักษณะความเร็วที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับวิธีการ PIV โดยมีลักษณะการไหลเป็นแบบ Developing Flow เนื่องมาจากค่าความเร็วที่ป้อนลงในที่ค่า Velocity Inlet ในโปรแกรม CFD นั้นมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 33 และ 34

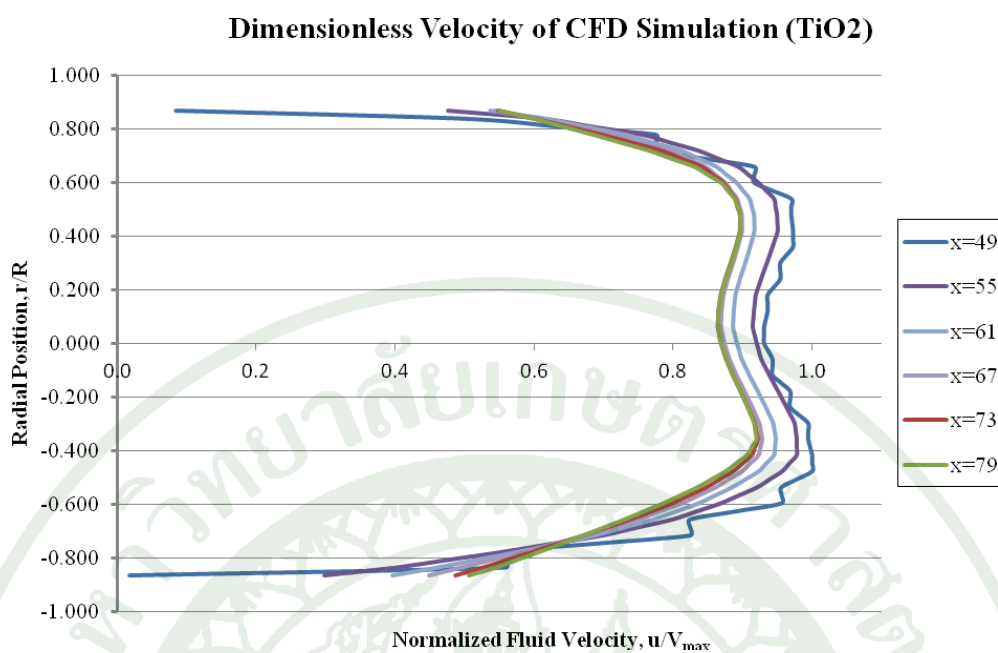


ภาพที่ 33 สนามความเร็วบริเวณท่อตีฟิวเซอร์ด้วยการจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

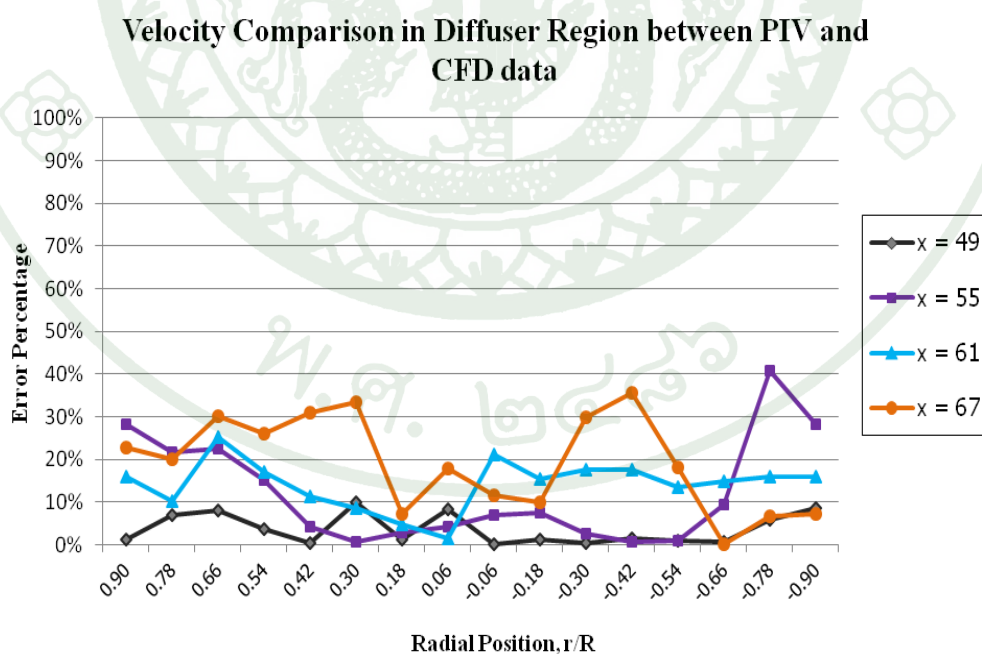


ภาพที่ 34 ความเร็วไร้หน่วยที่ตำแหน่งต่างๆ ของการจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อของไหลไหลผ่านบริเวณท่อคิฟิวเซอร์ ความเร็วของของไหลที่ผ่านคิฟิวเซอร์จะมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพที่ 35 และเมื่อนำการจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มาตรวจทาน (Validation) กับผลการทดลองจากวิธีการ PIV พบว่าค่าความเร็วของการจำลองการไหลเทียบต่อการทดลอง PIV มีค่าความคลื่อนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์บริเวณทางเข้าของชุดทดสอบ และพบค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดที่ 30 เปอร์เซ็นต์ บริเวณทางออกของชุดทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 35 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการจำลองการไหลของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

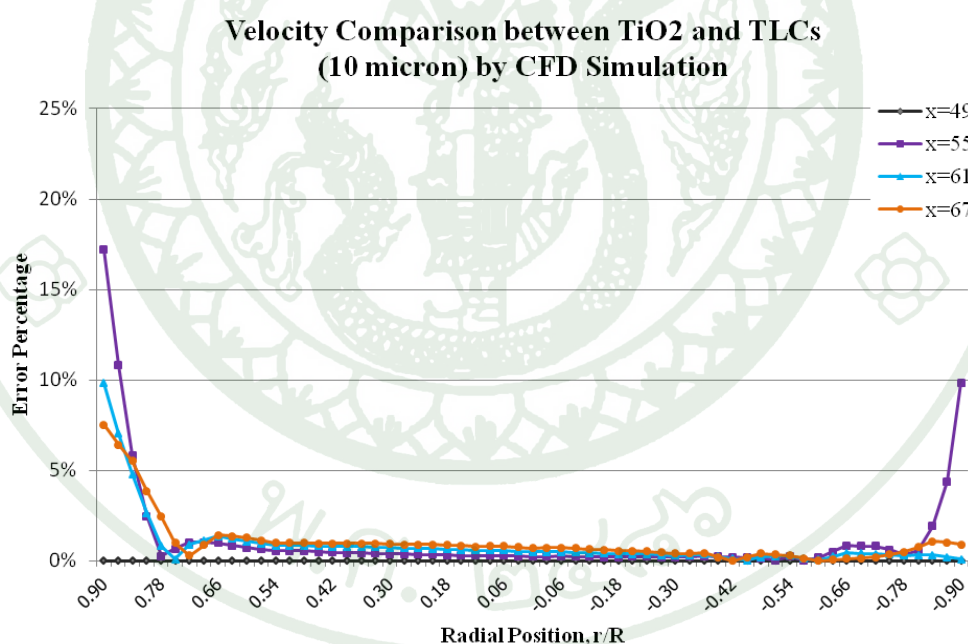


ภาพที่ 36 ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจทานความเร็วระหว่างการทดลองด้วยวิธีการ PIV กับการจำลองการไหลด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารแขวนลอย

การจำลองการไหลโดยใช้ผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอย

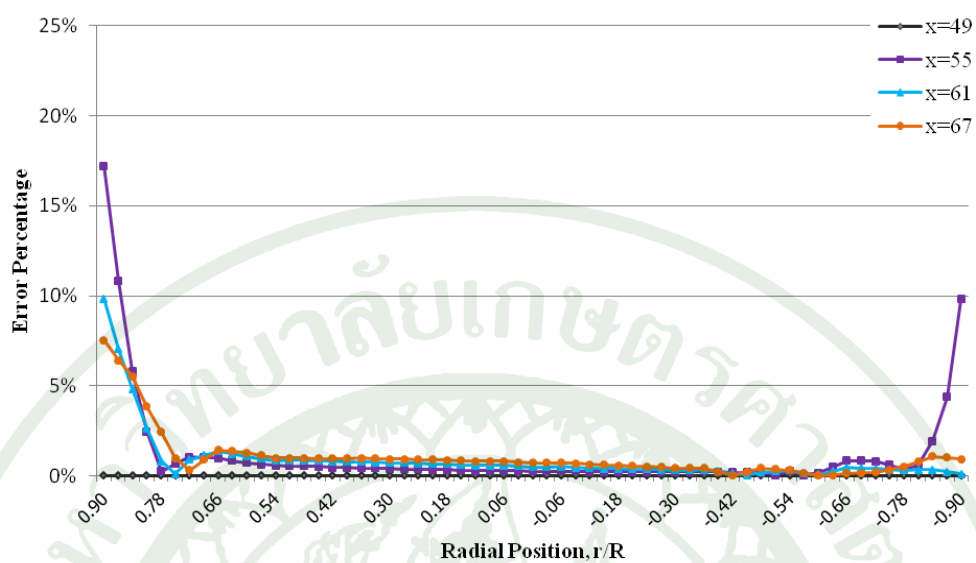
ในงานวิจัยส่วนต่อไป คือการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอย แทนที่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีการกำหนดขนาดของอนุภาคผลึกเหลวอยู่ที่ 10, 50, และ 100 ไมครอน ที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

จากการตรวจทานระหว่างการจำลองที่ใช้คุณสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลว พบว่าค่าความเร็วของผลึกเหลวเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่า อนุภาคผลึกเหลวที่ขนาด 100 ไมครอน มีความแตกต่างของความเร็วเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาด 10 ไมครอน ดังแสดงในภาพ 37 ถึง 39 ดังนั้น การจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนซึ่งเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดเป็นสารแขวนลอยจะไม่ส่งผลกระทบต่อผลการจำลองการไหล



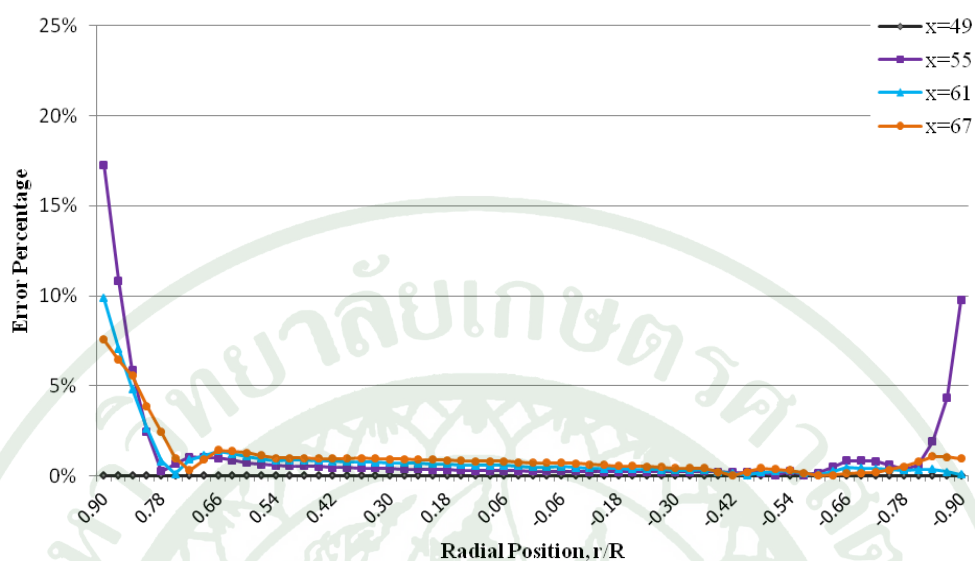
ภาพที่ 37 ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 10 ไมครอนเป็นสารแขวนลอย

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs (50 micron) by CFD Simulation



ภาพที่ 38 ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้
อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคฟลักเคลวขนาด 50 ไมครอนเป็น
สารแขวนลอย

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs (100 micron) by CFD Simulation

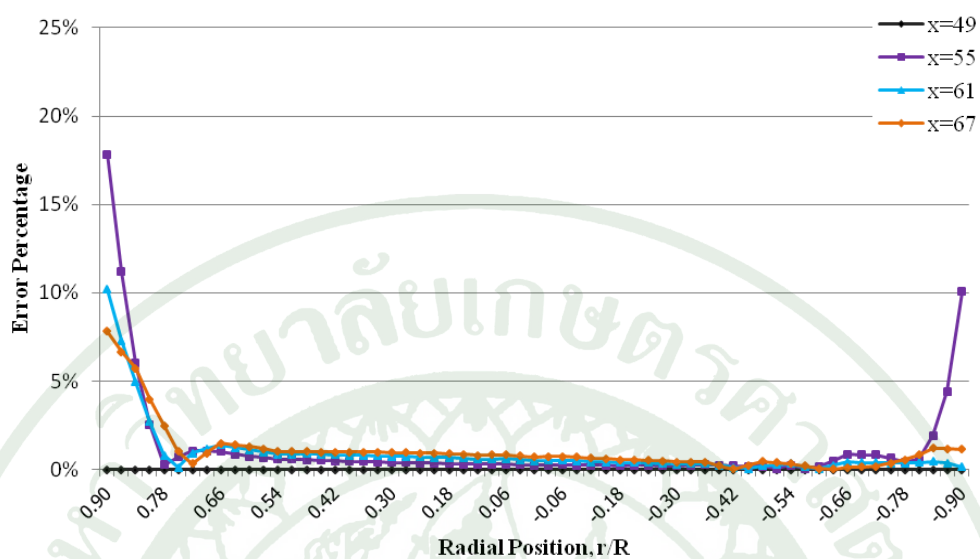


ภาพที่ 39 ค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนเป็นสารแขวนลอย

การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของอนุภาคผลึกเหลวในการจำลองการไหล

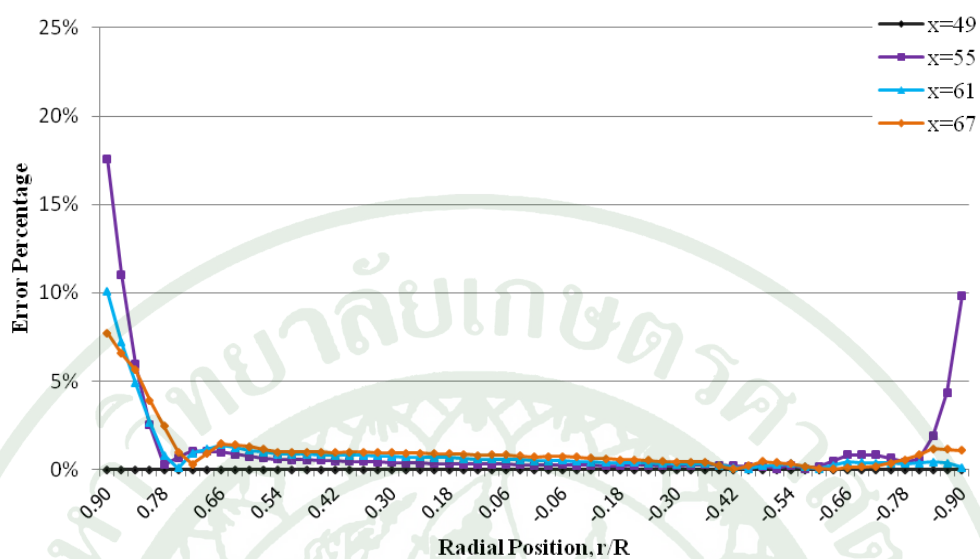
ในงานวิจัยส่วนต่อไป คือการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอน เมื่อทำการตรวจทานกับแบบจำลองการไหลอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ความเข้มข้นระหว่าง 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เมื่ออัตราส่วนผสมมีค่าน้อยลงหรือเพิ่มขึ้นจากช่วงดังกล่าว พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 40 ถึง 48

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (0.01%wt) by CFD Simulation



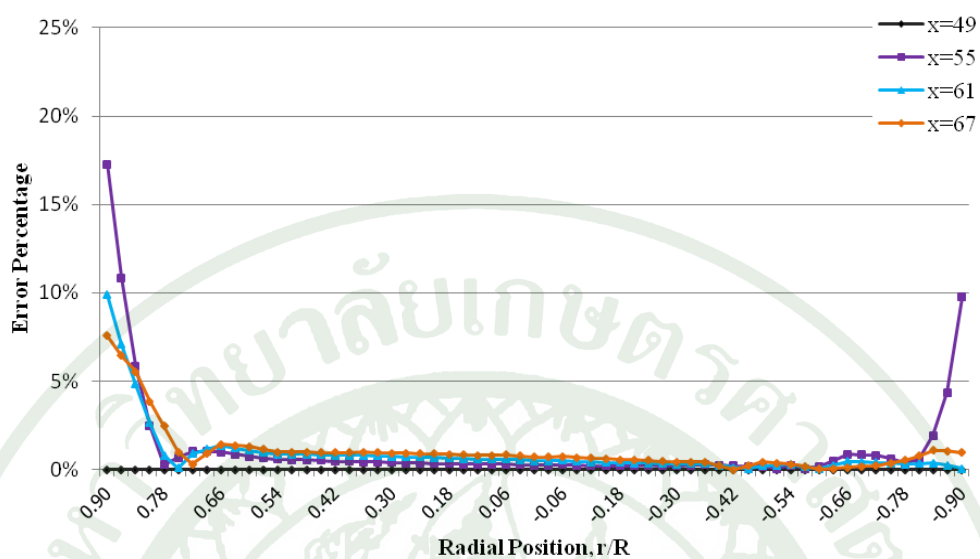
ภาพที่ 40 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.01 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

**Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron
(0.05%wt) by CFD Simulation**



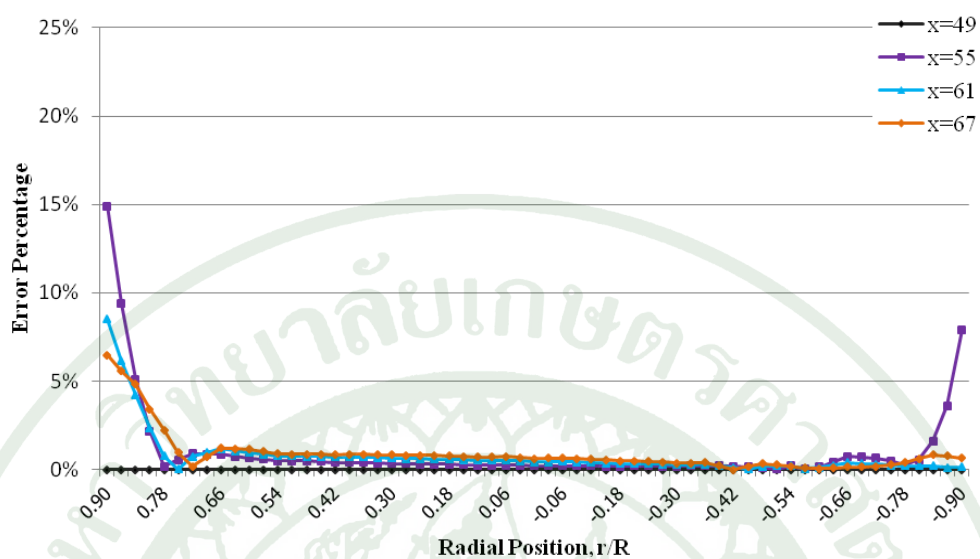
ภาพที่ 41 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

**Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron
(0.1%wt) by CFD Simulation**



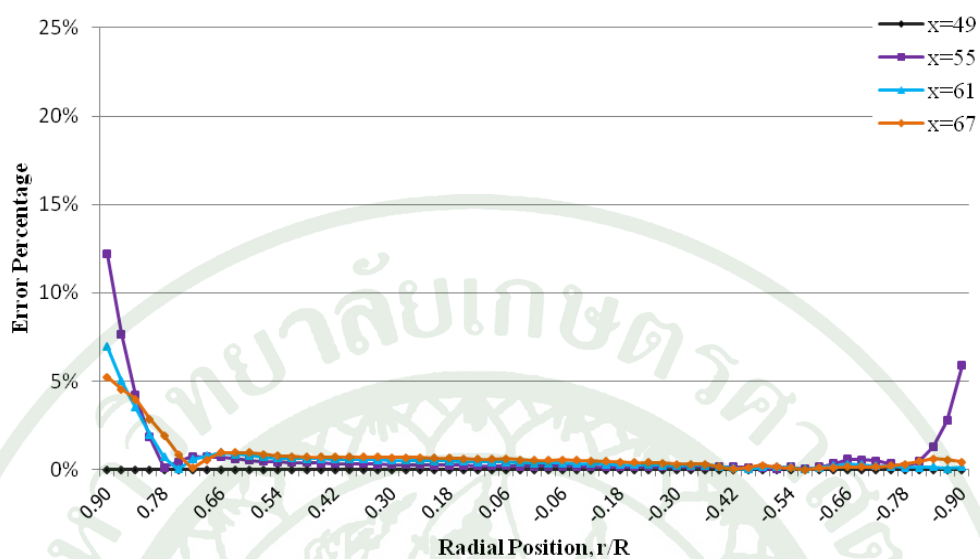
ภาพที่ 42 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

**Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron
(0.5%wt) by CFD Simulation**



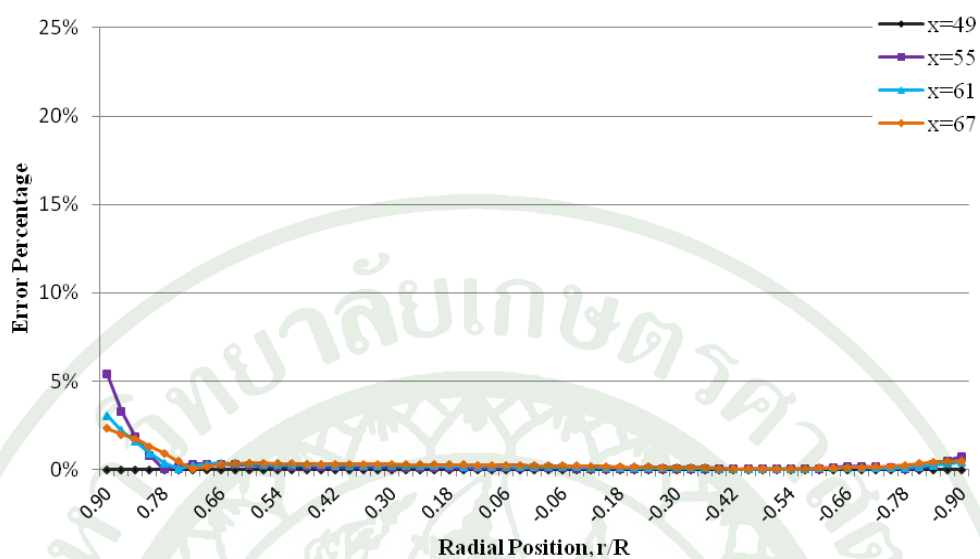
ภาพที่ 43 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

**Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron
(1.0%wt) by CFD Simulation**



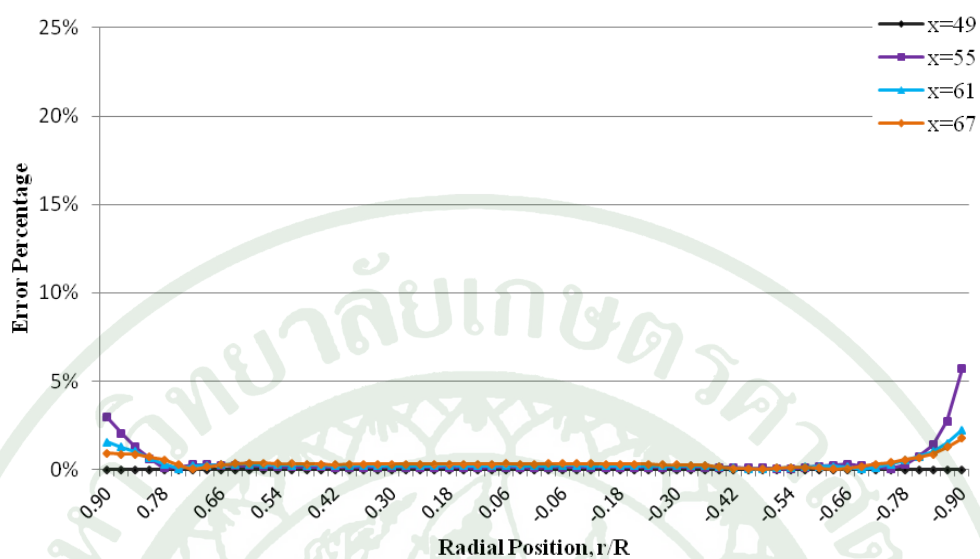
ภาพที่ 44 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (2.5%wt) by CFD Simulation



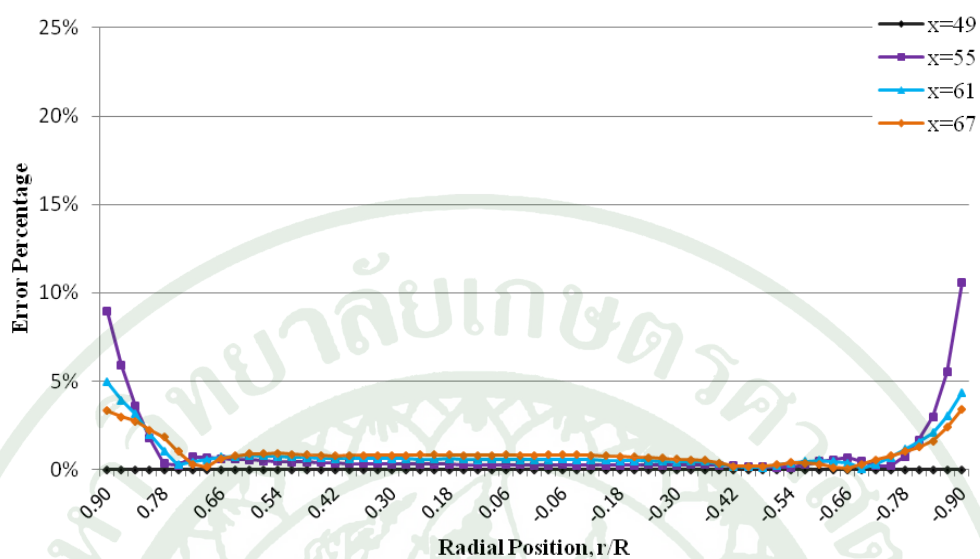
ภาพที่ 45 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีผลเป็นเส้นแนวรอย

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (5%wt) by CFD Simulation



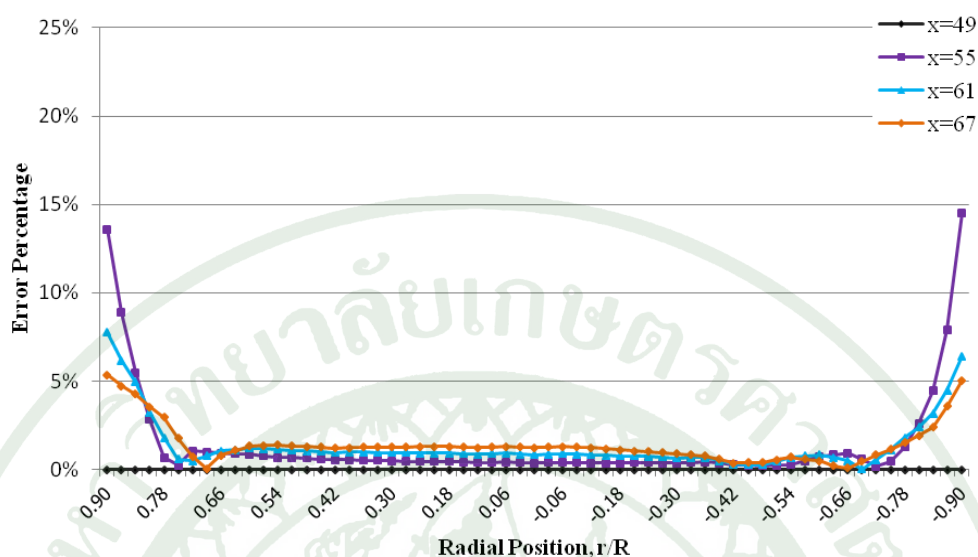
ภาพที่ 46 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีผลเป็นเส้นต่อเนื่อง

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (7.5%wt) by CFD Simulation



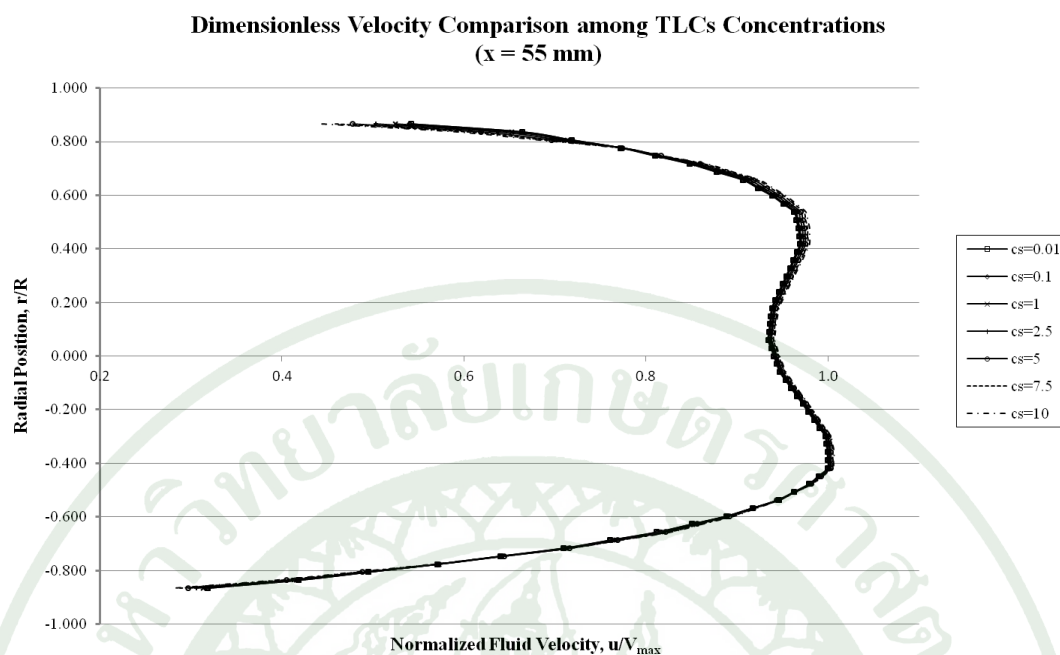
ภาพที่ 47 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (10%wt) by CFD Simulation

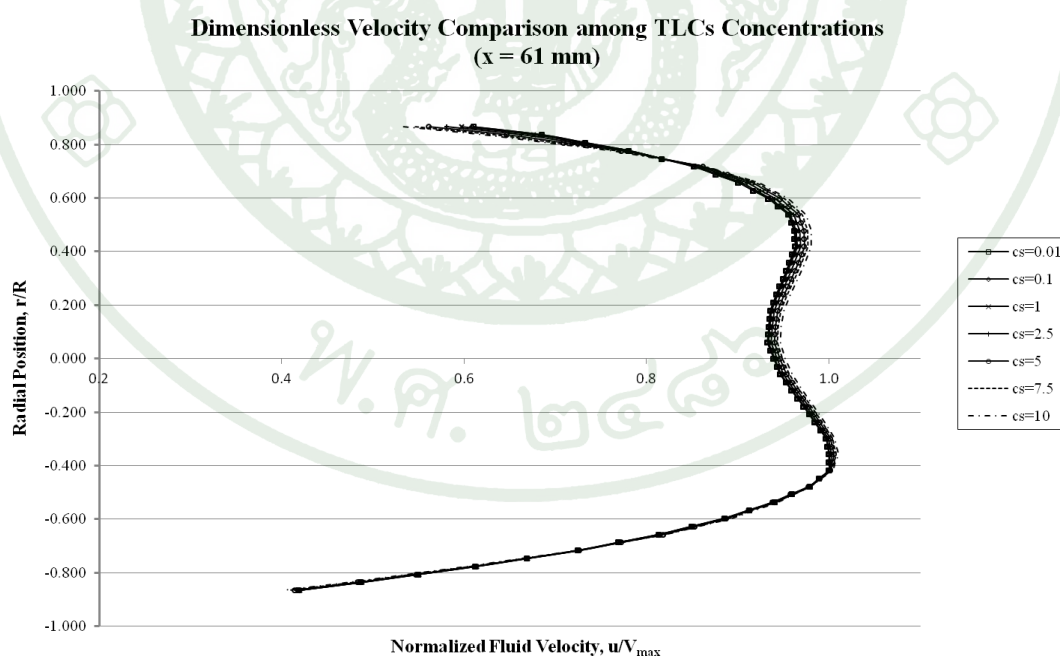


ภาพที่ 48 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยมีผลเป็นสารแขวนลอย

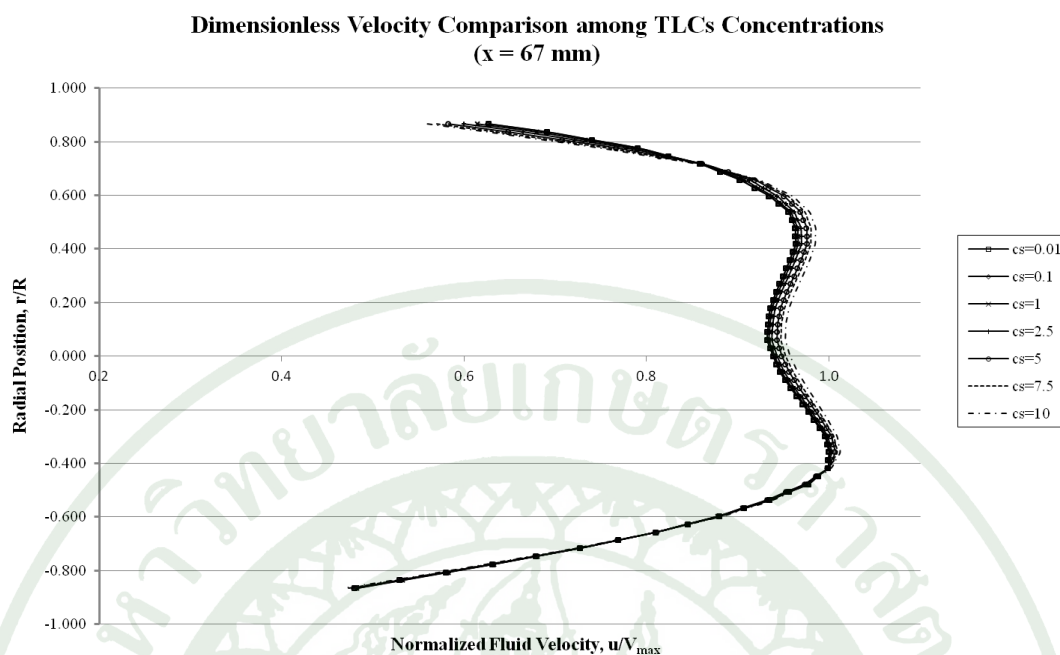
นอกจากนี้ยังพบว่า ในแต่ละตำแหน่งของชุดทดสอบพบความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นสองจุด คือ บริเวณส่วนครึ่งบนและครึ่งล่างโดยแบ่งตามแกนสมมาตร ดังแสดงในภาพที่ 49 ถึง 53 และที่ความเข้มข้นของอนุภาคผลึกเหลวที่แตกต่างกัน จะเกิดความแตกต่างของความเร็วที่ตำแหน่งนั้นๆ โดยที่ความเข้มข้นของอนุภาคผลึกเหลวที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลกระทบต่อให้ความเร็วในช่วงบนของแกนสมมาตรมีค่าสูงขึ้น และความเร็วที่ช่วงล่างของแกนสมมาตรมีค่าลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคผลึกเหลวที่สูงกว่า ส่งผลให้มีมวลที่มากกว่า และเกิดการตกตะกอนไปรวมที่ช่วงล่างของชุดทดสอบซึ่งไปกีดขวางเส้นทางการไหล ซึ่งอัตราความเร็วสูงสุดช่วงบนต่อช่วงล่างที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แสดงที่ตารางที่ 5 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า อัตราส่วนความเร็วที่ลดลงสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่มากขึ้น



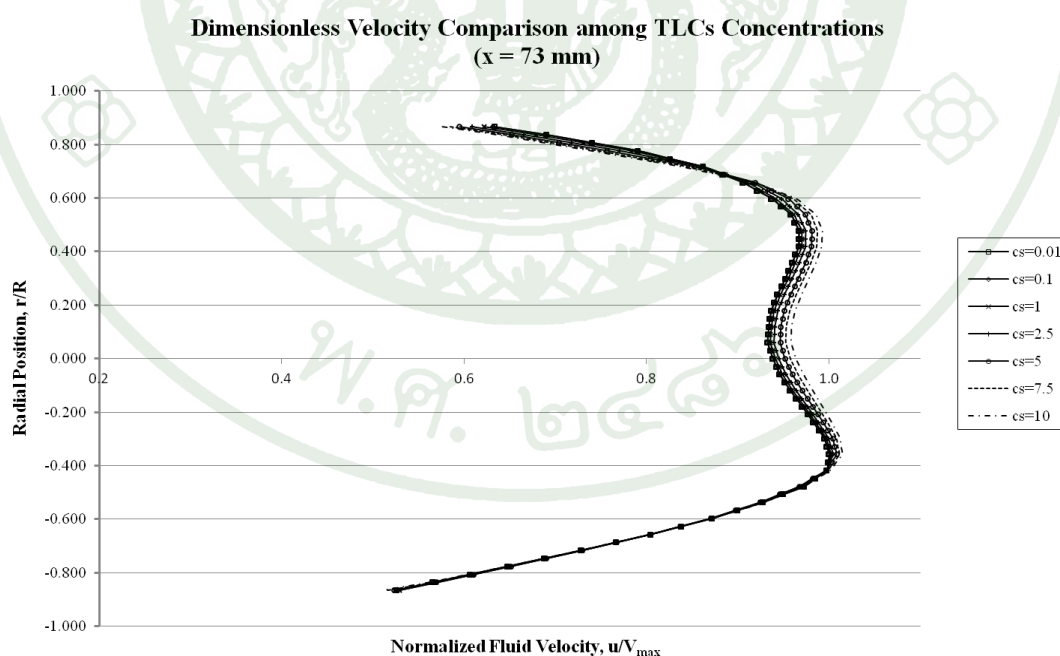
ภาพที่ 49 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 55 \text{ มม}$



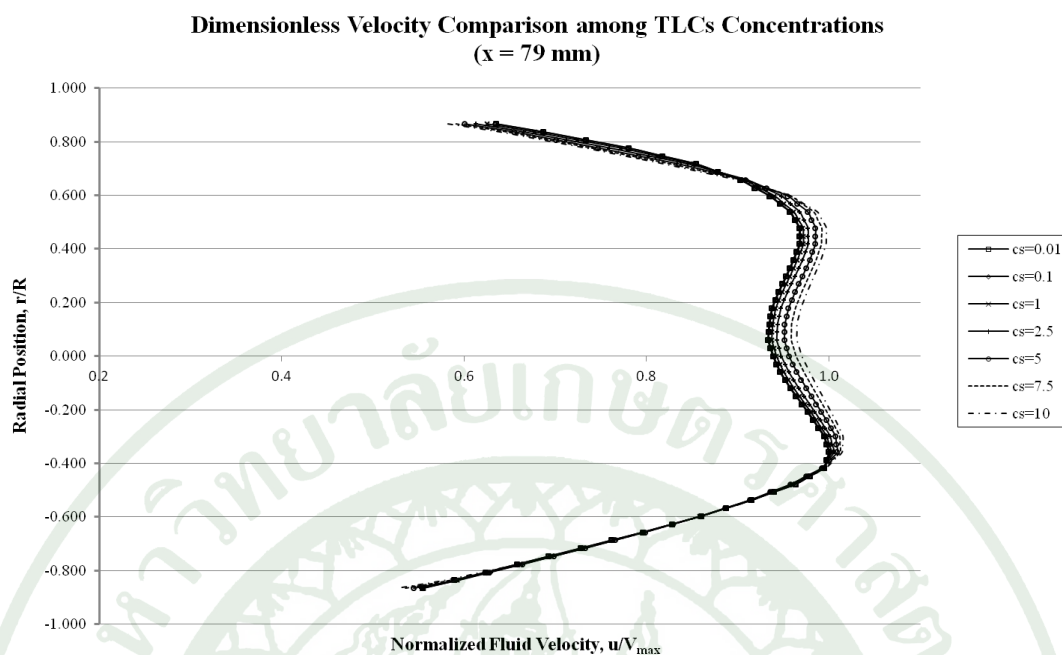
ภาพที่ 50 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 61 \text{ มม}$



ภาพที่ 51 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 67$ มม



ภาพที่ 52 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 73$ มม



ภาพที่ 53 กราฟเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคผลึกเหลวที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ ที่ตำแหน่ง $x = 79 \text{ มม}$

ตารางที่ 5 อัตราส่วนของความเร็วสูงสุดสองตำแหน่งซึ่งแบ่งตามแกนสมมาตร

Pipe Position (Horizontal)	Solid Concentration	Maximum Velocity		Ratio (Lower / Upper)
		Upper (0+)	Lower (0-)	
X = 55 mm	0.01%	0.807293	0.832788	1.0316
	0.1%	0.807398	0.832825	1.0315
	1%	0.808439	0.833375	1.0308
	2.5%	0.809987	0.834179	1.0299
	5%	0.812168	0.835584	1.0288
	7.5%	0.813985	0.836901	1.0282
	10%	0.815568	0.838066	1.0276
X = 61 mm	0.01%	0.776458	0.806295	1.0384
	0.1%	0.776628	0.80632	1.0382
	1%	0.778341	0.807075	1.0369
	2.5%	0.780925	0.808441	1.0352
	5%	0.78457	0.810669	1.0333
	7.5%	0.787669	0.8127	1.0318
	10%	0.790519	0.814476	1.0303
X = 67 mm	0.01%	0.759591	0.78844	1.0380
	0.1%	0.759785	0.788483	1.0378
	1%	0.761765	0.789377	1.0362
	2.5%	0.764828	0.791052	1.0343
	5%	0.769219	0.793696	1.0318
	7.5%	0.773202	0.795988	1.0295
	10%	0.776787	0.797976	1.0273

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Pipe Position (Horizontal)	Solid Concentration	Maximum Velocity		Ratio (Lower / Upper)
		Upper (0+)	Lower (0-)	
X = 73 mm	0.01%	0.755533	0.781663	1.0346
	0.1%	0.75576	0.781768	1.0344
	1%	0.758073	0.783082	1.0330
	2.5%	0.761726	0.785248	1.0309
	5%	0.767201	0.788253	1.0274
	7.5%	0.771949	0.790714	1.0243
	10%	0.776021	0.792918	1.0218
X = 79 mm	0.01%	0.754553	0.779626	1.0332
	0.1%	0.754831	0.779782	1.0331
	1%	0.757574	0.781408	1.0315
	2.5%	0.761811	0.783725	1.0288
	5%	0.767958	0.786552	1.0242
	7.5%	0.7733	0.788935	1.0202
	10%	0.777761	0.791885	1.0182

จากการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลวพบว่าความคลาดเคลื่อนเมื่อตรวจทานกับการใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อมีอัตราส่วนผสมของผลึกเหลวอยู่ในช่วงระหว่าง 2.5 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มการจำลองการไหลในช่วงความเข้มข้นนั้นเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่จะให้ผลใกล้เคียงที่สุดกับการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยปรับความเข้มข้นอนุภาคผลึกเหลวในแบบจำลองการไหลที่ 3, 3.5, 4, และ 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคผลึกเหลวที่ความเข้มข้น 3 ถึง 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล

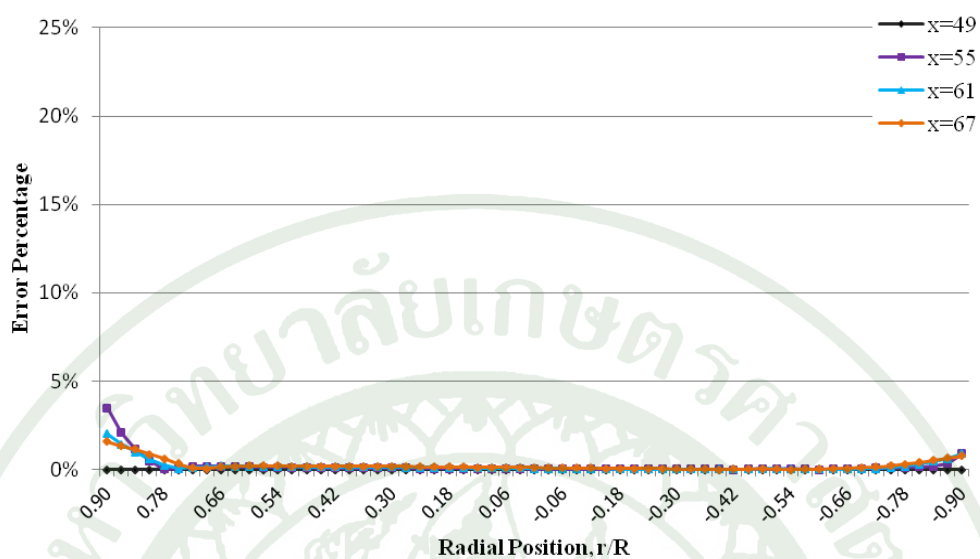
ความเข้มข้น (%wt)	สัดส่วนโดยปริมาตร
3	0.027299
3.5	0.031864
4	0.036433
4.5	0.041006

จากภาพที่ 54 ถึง 57 แสดงให้เห็นถึงการตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวที่ความเข้มข้น 3 ถึง 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล พบว่า ที่อัตราความเข้มข้นระหว่าง 3.5 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งหมายความว่ามีความเร็วการไหลใกล้เคียงกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มากที่สุด

ทางผู้วิจัยจึงได้ตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์) และอนุภาคผลึกเหลว (ความเข้มข้น 3.5 และ 4 เปอร์เซ็นต์) พบว่า สมการที่ 9 และ 11 มีตัวแปรที่เกิดขึ้นจากคุณสมบัติของอนุภาคแต่ละชนิด คือ ความหนาแน่นของของไหลผสม (ρ_m) และ ความหนืดของของไหลผสม (μ_m) ซึ่งมีผลต่อสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยลำดับ

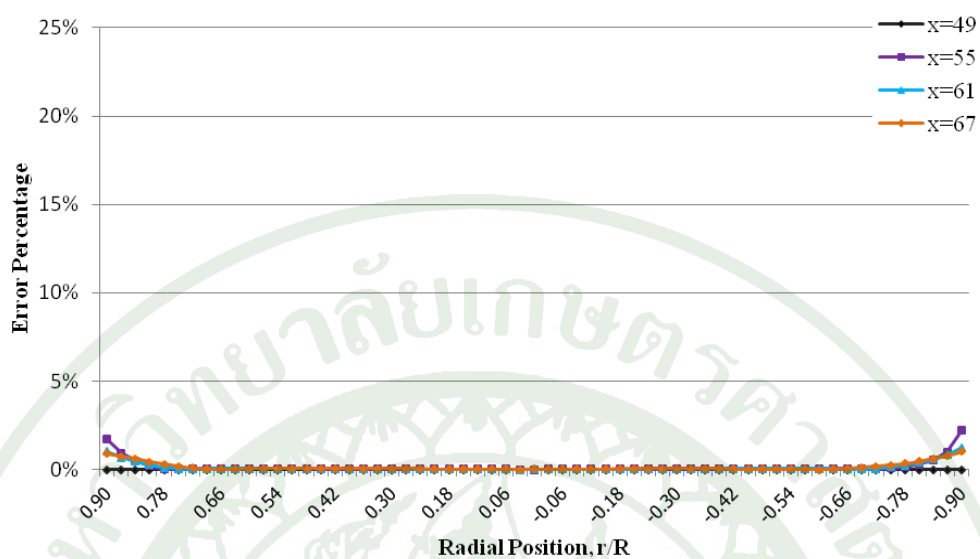
ตารางที่ 7 แสดงค่าความหนาแน่นและความหนืดของของไหลผสมซึ่งมีอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลและอนุภาคผลึกเหลวที่ความเข้มข้น 3.5 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย ซึ่งพบว่าความหนาแน่นผสมของอนุภาคผลึกเหลวมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 0.29 เปอร์เซ็นต์ และความหนืดผสมของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วงความหนืดผสมของอนุภาคผลึกเหลว จึงสรุปได้ว่าของไหลที่ผสมอนุภาคผลึกเหลวที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 3.5 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยมวล สามารถนำมาประยุกต์ใช้แทนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะของของไหลน้อยที่สุด

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (3%wt) by CFD Simulation



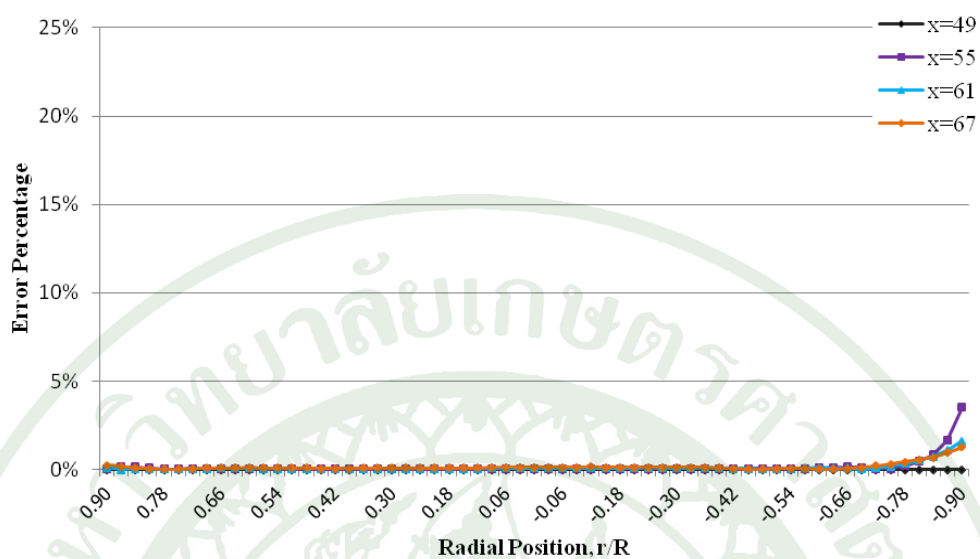
ภาพที่ 54 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (3.5%wt) by CFD Simulation



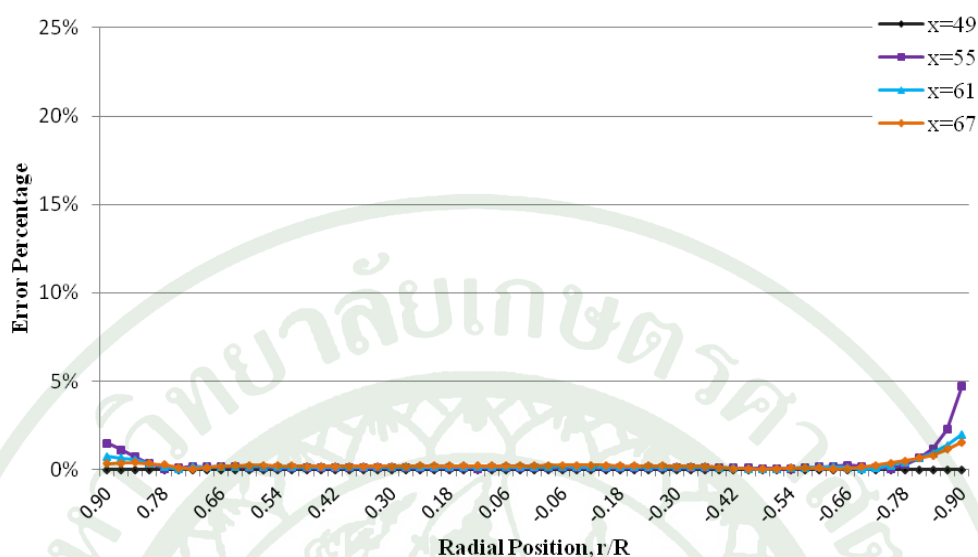
ภาพที่ 55 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (4%wt) by CFD Simulation



ภาพที่ 56 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียม-ไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ โดยมีผลเป็นเส้นเฉลว

Velocity Comparison between TiO₂ and TLCs 100 micron (4.5%wt) by CFD Simulation



ภาพที่ 57 การตรวจทานความเร็วระหว่างการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กับอนุภาคผลึกเหลวขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 4.5 เปอร์เซ็นต์ โดยมีผลเป็นเส้นแนวลอย

ตารางที่ 7 ค่าความหนาแน่นและความหนืดของของไหลผสมจากอนุภาคต่างๆ

อนุภาค	ความหนาแน่นของของไหลผสม (ρ_m)	ความหนืดของของไหลผสม (μ_m)
	(kg/m ³)	(kg/m•s)
TiO ₂ (0.1%wt)	998.9497	0.002251
TLCs (3.5%wt)	1001.4438	0.002239
TLCs (4%wt)	1001.9089	0.002416

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ผลการทดลองด้วยวิธีการ PIV สามารถแสดงผลค่าความเร็วบนสนามการไหลทั่วทั้งชุดทดสอบ บริเวณทางเข้าชุดทดสอบเกิดการไหลแบบ Developing Flow และพบว่าความเร็วภายในท่อมีค่าลดลงเมื่อของไหลไหลผ่านบริเวณคิฟิวเซอร์ สำหรับการจำลองการไหลเพื่อสอบเทียบความถูกต้องโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่สภาวะเดียวกับการทดลอง PIV พบว่าเกิดค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์บริเวณทางเข้าคิฟิวเซอร์ และ ไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์บริเวณทางออกคิฟิวเซอร์

ผลการตรวจทานระหว่างการจำลองการไหลที่มีอนุภาคฟลักเหลวเป็นสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล พบว่า ความเร็วของของไหลที่มีอนุภาคฟลักเหลวเป็นสารแขวนลอยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และขนาดของอนุภาคฟลักเหลวขนาด 100 ไมครอนซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการไหลเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาด 10 ไมครอน

ผลการตรวจทานอัตราส่วนผสมของอนุภาคฟลักเหลวขนาด 100 ไมครอนกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในการจำลองการไหล พบว่า ของไหลที่ผสมอนุภาคฟลักเหลวที่มีความเข้มข้นระหว่าง 3.5 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอยมีค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเทียบเคียงกับของไหลที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ำกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นช่วงอัตราส่วนผสมที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วต่ำที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. การสร้างชุดทดสอบการไหลสำหรับวิธีการ PIV ควรคำนึงถึงความยาวทางเข้าของท่อ (Entrance Length) ที่ทำให้คุณลักษณะการไหลบริเวณทางเข้าชุดทดสอบเป็น Fully-Developed Flow เพื่อลดความปั่นป่วนการไหลภายในชุดทดสอบ และได้สนามเวกเตอร์ความเร็วที่ชัดเจนมากขึ้น
2. ปรับเปลี่ยนฟังก์ชันของการไหลแบบหลายเฟส (Multiphase Flows) ในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จาก Mixture Model เป็น Eulerian Model เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของแต่ละเฟสอย่างชัดเจนและมีความแม่นยำที่มากขึ้น
3. สร้างชุดทดสอบ PIV โดยใช้อนุภาคผลึกเหลวเป็นสารแขวนลอยเพื่อศึกษาถึงสภาพการไหลจริง และสามารถนำผลการทดลองมายืนยันความถูกต้องได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- วิชัย สีนัจกร. 2553. การออกแบบและทดสอบดีฟิวเซอร์ประกอบร่วมกับใบพัดคอมเพรสเซอร์วีลแบบการไหลผ่านของอากาศตามแนวรัศมีโดยใช้เทคนิควิธีการถ่ายภาพอนุภาค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Choo, Y.J. and C.H. Song. 2010. PIV measurements of turbulent jet and pool mixing produced by a steam jet discharge in a subcooled water pool. **Nuclear Engineering and Design** 240 (9): 2215-2224.
- Corvaro, F. and M. Paroncini. 2009. An experimental study of natural convection in a differentially heated cavity through a 2D-PIV system. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 52 (1-2): 355-365.
- Cuckovic-Dzodzo, D.M., M.B. Dzodzo and M.D. Pavlovic. 1999. Laminar natural convection in a fully partitioned enclosure containing fluid with nonlinear thermophysical properties. **International Journal of Heat and Fluid Flow** 20 (6): 614-623.
- Dabiri, D. 2009. Digital particle image thermometry/velocimetry: a review. **Experiments in Fluids** 46 (2): 191-241.
- Deev, A.V., T. Rasheed, M.C. Welsh, M.M.K. Khan and M.G. Rasul. 2009. Measurement of instantaneous flow velocities in a concentric reducer using Particle Image Velocimetry: Study of scale deposition. **Experimental Thermal and Fluid Science** 33 (6): 1003-1011.
- Eesa, M. and M. Barigou. 2009. CFD investigation of the pipe transport of coarse solids in laminar power law fluids. **Chemical Engineering Science** 64 (2): 322-333.
- Gharib, M. and D. Daribi. 2000. Digital particle image velocimetry, pp. 123-147. In Smits, A.J. and Lim, T.T., eds. **Flow Visualization: Techniques and Examples**. Imperial College Press, Singapore.

- Kaushal, D.R., K. Sato, T. Toyota, K. Funatsu and Y. Tomita. 2005. Effect of particle size distribution on pressure drop and concentration profile in pipeline flow of highly concentrated slurry. **International Journal of Multiphase Flow** 31 (7): 809-823.
- Liu, Q., T. Asavei, T. Lee, H. Rubinsztein-Dunlop, S. He and I.I. Smalyukh. 2011. Measurement of viscosity of lyotropic liquid crystals by means of rotating laser-trapped microparticles. **Optics Express** 19 (25): 25134-25143.
- Lutjen, P.M., D. Mishra and V. Prasad. 2001. Three-dimensional visualization and measurement of temperature field using liquid crystal scanning thermography. **Journal of Heat Transfer** 123 (5): 1006-1014.
- Raffel, M., C.E. Willert, S.T. Wereley and J. Kompenhans. 2007. **Particle Image Velocimetry: A Practical Guide** (2 ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- Someya, S., Y. Li, K. Ishii and K. Okamoto. 2011. Combined two-dimensional velocity and temperature measurements of natural convection using a high-speed camera and temperature-sensitive particles. **Experiments in Fluids** 50 (1): 65-73.



ภาคผนวก



ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดิวไฟวเซอร์

จากหน้าตัดบริเวณคريبดิวไฟวเซอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม หน้าตัดเหล่านี้ได้ถูกแปลงเป็นวงกลมเพื่อนำมาสร้างท่อดิวไฟวเซอร์โดยใช้ความสัมพันธ์ของพื้นที่หน้าตัด มาคำนวณ

$$A_{rec} = A_{cir}$$

$$a \times b = \frac{\pi D^2}{4}$$

ที่ทางเข้าดิวไฟวเซอร์ ซึ่งมีความกว้าง 11 มม. และความยาว 15.08 มม. จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 14.53 มม. และที่ทางออกดิวไฟวเซอร์ ซึ่งมีความกว้าง 11 มม. และความยาว 20.4 มม. จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 16.75 มม.

การคำนวณอัตราการไหลภายในชุดทดสอบ

ความเร็วที่ทางเข้าดิวไฟวเซอร์สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของเลขเรย์โนลด์ดังสมการ

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$V = \frac{Re \times \mu}{\rho D}$$

สำหรับของไหลที่ทางเข้าชุดทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และมีเลขเรย์โนลด์ 13,000 จะมีค่าความเร็วทางเข้าอยู่ที่ 0.8037 เมตรต่อวินาที

สำหรับอัตราการไหลของของไหลที่เข้าสู่ทดสอบ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = VA$$

$$Q = V \times \frac{\pi D^2}{4}$$

ซึ่งจะได้อัตราการไหลบริเวณทางเข้าอยู่ที่ 480 ลิตรต่อชั่วโมง

การคำนวณค่าสัดส่วนเชิงปริมาตร

ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรสำหรับของไหลสองเฟส สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha_k = \frac{\frac{m_k}{\rho_k}}{\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_l}{\rho_l}}$$

ตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนเชิงปริมาตรสำหรับเฟสของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนผสม 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลสำหรับการจำลองการไหล สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\alpha_{TiO_2} = \frac{\frac{0.1}{4000}}{\frac{0.1}{4000} + \frac{99.9}{998.2}}$$

$$\alpha_{TiO_2} = 0.00025$$



ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการทดลอง PIV

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+8.5	+7.5	+6.5	+5.5	+4.5	+3.5
x = 49 mm	0.167073	0.294182	0.354669	0.458582	0.464923	0.541182
x = 50 mm	0.226401	0.341857	0.506736	0.479910	0.455185	0.470997
x = 51 mm	0.340279	0.480079	0.510366	0.478489	0.471240	0.569374
x = 52 mm	0.381773	0.432301	0.407649	0.489337	0.477340	0.553585
x = 53 mm	0.330089	0.383858	0.425308	0.535897	0.534090	0.460964
x = 54 mm	0.363302	0.475024	0.527356	0.565510	0.616323	0.542099
x = 55 mm	0.355065	0.436611	0.493321	0.518819	0.556775	0.602340
x = 56 mm	0.301157	0.381425	0.380029	0.418249	0.475615	0.589909
x = 57 mm	0.335989	0.429046	0.359663	0.355243	0.503892	0.626515
x = 58 mm	0.303697	0.477398	0.488576	0.498371	0.563013	0.588352
x = 59 mm	0.291000	0.351300	0.347546	0.321646	0.421741	0.481572
x = 60 mm	0.264348	0.298416	0.432472	0.368483	0.464419	0.523768
x = 61 mm	0.311005	0.447239	0.404890	0.567348	0.600862	0.621892
x = 62 mm	0.298220	0.532009	0.506530	0.495682	0.603972	0.503738
x = 63 mm	0.340868	0.502649	0.559208	0.620143	0.573696	0.588945
x = 64 mm	0.385774	0.574670	0.557712	0.599557	0.613126	0.666888

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+8.5	+7.5	+6.5	+5.5	+4.5	+3.5
x = 65 mm	0.179726	0.523445	0.535009	0.668319	0.651171	0.709825
x = 66 mm	0.034477	0.484120	0.514003	0.546715	0.584046	0.686316
x = 67 mm	0.004232	0.537024	0.478456	0.485601	0.583959	0.695651
x = 68 mm	0.001641	0.546585	0.566071	0.588102	0.663099	0.703498
x = 69 mm	0.435571	0.535127	0.527547	0.516080	0.760600	0.724518
x = 70 mm	0.323699	0.531190	0.631337	0.650501	0.690250	0.801180
x = 71 mm	0.364126	0.492265	0.620188	0.681174	0.726208	0.812376
x = 72 mm	0.345654	0.512314	0.596136	0.641629	0.710912	0.668481
x = 73 mm	0.392692	0.528174	0.644785	0.590215	0.723122	0.779093
x = 74 mm	0.339478	0.406491	0.529797	0.622372	0.700170	0.777298
x = 75 mm	0.269388	0.490968	0.507487	0.589936	0.646679	0.660179
x = 76 mm	0.283327	0.495073	0.507343	0.537207	0.658820	0.749547
x = 77 mm	0.358032	0.447981	0.558073	0.520973	0.648827	0.749305
x = 78 mm	0.479933	0.626193	0.623615	0.609735	0.755413	0.756957
x = 79 mm	0.400224	0.546300	0.639183	0.694810	0.710026	0.815109
x = 80 mm	0.160309	0.419518	0.710016	0.723861	0.798736	0.827064

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+2.5	+1.5	+0.5	-0.5	-1.5	-2.5
x = 49 mm	0.620048	0.693520	0.596366	0.624990	0.542761	0.494346
x = 50 mm	0.576360	0.598120	0.583738	0.602098	0.540215	0.536888
x = 51 mm	0.646726	0.657769	0.689940	0.659041	0.522836	0.526496
x = 52 mm	0.557740	0.571329	0.562758	0.623473	0.599712	0.573924
x = 53 mm	0.539971	0.679670	0.616373	0.533351	0.605555	0.556977
x = 54 mm	0.604123	0.699899	0.640765	0.679908	0.621402	0.591164
x = 55 mm	0.655997	0.680232	0.663312	0.626957	0.645707	0.619080
x = 56 mm	0.662603	0.565756	0.677611	0.642246	0.593787	0.555879
x = 57 mm	0.624766	0.600737	0.605923	0.633911	0.598753	0.606383
x = 58 mm	0.746820	0.734116	0.684249	0.702712	0.727360	0.715683
x = 59 mm	0.553993	0.586939	0.587196	0.549095	0.608497	0.550260
x = 60 mm	0.590028	0.573487	0.621256	0.581570	0.541952	0.506913
x = 61 mm	0.587072	0.601008	0.618643	0.591195	0.597754	0.680226
x = 62 mm	0.566335	0.693565	0.628197	0.673096	0.700214	0.607283
x = 63 mm	0.598977	0.702601	0.645269	0.666605	0.676626	0.683279
x = 64 mm	0.653607	0.688112	0.706497	0.674208	0.630179	0.684710

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+2.5	+1.5	+0.5	-0.5	-1.5	-2.5
x = 65 mm	0.777698	0.746715	0.739723	0.718471	0.693515	0.682178
x = 66 mm	0.785351	0.763560	0.731107	0.772142	0.742465	0.735224
x = 67 mm	0.815891	0.728753	0.717154	0.653118	0.698551	0.724359
x = 68 mm	0.710512	0.725471	0.767755	0.632992	0.681695	0.685125
x = 69 mm	0.796272	0.812220	0.747426	0.753056	0.733767	0.634974
x = 70 mm	0.778549	0.775898	0.769756	0.735387	0.722786	0.700162
x = 71 mm	0.782241	0.722560	0.797410	0.776573	0.781885	0.748354
x = 72 mm	0.816289	0.749783	0.774988	0.739161	0.715712	0.722954
x = 73 mm	0.762692	0.741312	0.703850	0.753615	0.734395	0.773448
x = 74 mm	0.793329	0.806630	0.814590	0.740094	0.754323	0.811571
x = 75 mm	0.816319	0.788665	0.798628	0.788684	0.804349	0.790753
x = 76 mm	0.783957	0.699924	0.791833	0.710790	0.730350	0.818841
x = 77 mm	0.777550	0.802560	0.726363	0.743357	0.802989	0.794149
x = 78 mm	0.789194	0.880045	0.833087	0.752838	0.775318	0.886460
x = 79 mm	0.826545	0.873870	0.802943	0.808142	0.797555	0.911831
x = 80 mm	0.904493	0.808560	0.733473	0.803670	0.835852	0.851364

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-3.5	-4.5	-5.5	-6.5	-7.5	-8.5
x = 49 mm	0.539994	0.438345	0.353227	0.378837	0.339885	0.247424
x = 50 mm	0.485244	0.530438	0.453465	0.333819	0.322602	0.223193
x = 51 mm	0.629589	0.529130	0.475846	0.447392	0.390767	0.310760
x = 52 mm	0.599774	0.563324	0.558914	0.483075	0.527819	0.306481
x = 53 mm	0.599926	0.603744	0.564516	0.553901	0.475083	0.286824
x = 54 mm	0.572000	0.682962	0.628076	0.642057	0.523940	0.212270
x = 55 mm	0.660917	0.713557	0.649935	0.631830	0.518915	0.225901
x = 56 mm	0.575422	0.574236	0.567536	0.449140	0.418749	0.184675
x = 57 mm	0.647221	0.631056	0.625053	0.545000	0.418320	0.193196
x = 58 mm	0.646976	0.693070	0.616266	0.623462	0.564179	0.273084
x = 59 mm	0.500030	0.570211	0.566980	0.552899	0.504579	0.068612
x = 60 mm	0.471568	0.521781	0.570041	0.607059	0.460182	0.070044
x = 61 mm	0.604151	0.606283	0.624568	0.593819	0.473936	0.177038
x = 62 mm	0.580944	0.622397	0.641286	0.468721	0.368982	0.177197
x = 63 mm	0.603948	0.711654	0.648587	0.558714	0.374493	0.102335
x = 64 mm	0.621113	0.737612	0.699132	0.631498	0.491975	0.098464

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-3.5	-4.5	-5.5	-6.5	-7.5	-8.5
x = 65 mm	0.683364	0.655457	0.606065	0.597729	0.454694	0.095533
x = 66 mm	0.707212	0.711698	0.640252	0.590285	0.306560	0.065736
x = 67 mm	0.662175	0.696033	0.715770	0.578254	0.219801	0.065802
x = 68 mm	0.685200	0.664928	0.774968	0.589873	0.291783	0.105539
x = 69 mm	0.698763	0.744062	0.669563	0.651987	0.383839	0.129559
x = 70 mm	0.757934	0.753439	0.697666	0.691033	0.513115	0.140837
x = 71 mm	0.794414	0.776360	0.715742	0.694908	0.494137	0.153069
x = 72 mm	0.771837	0.792999	0.793800	0.725202	0.396901	0.137160
x = 73 mm	0.822797	0.762972	0.749398	0.741255	0.385342	0.090988
x = 74 mm	0.839375	0.778742	0.752493	0.805334	0.354213	0.095226
x = 75 mm	0.768170	0.734010	0.766274	0.769556	0.451108	0.122119
x = 76 mm	0.784442	0.707086	0.697412	0.603548	0.418501	0.092962
x = 77 mm	0.840486	0.837252	0.745731	0.631703	0.413362	0.085869
x = 78 mm	0.915496	0.876306	0.837403	0.796954	0.504968	0.096721
x = 79 mm	0.886252	0.812132	0.830974	0.741823	0.528424	0.122231
x = 80 mm	0.841400	0.806952	0.708853	0.506996	0.071257	-0.007472

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการจำลองการไหลโดยใช้นูภาคไทเทเนียม
ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.8	+0.75	+0.7	+0.65	+0.6	+0.55
x = 49 mm	-	-	0.425200	0.661400	0.661400	0.782300
x = 50 mm	-	-	0.502415	0.676007	0.729809	0.784387
x = 51 mm	-	-	0.497178	0.672146	0.730609	0.783326
x = 52 mm	-	-	0.502735	0.663105	0.726427	0.778761
x = 53 mm	-	0.012329	0.510363	0.655410	0.721774	0.773196
x = 54 mm	-	0.129081	0.516845	0.649483	0.717588	0.767714
x = 55 mm	-	0.222551	0.521594	0.644826	0.713848	0.762568
x = 56 mm	-	0.284387	0.524836	0.640965	0.710375	0.757737
x = 57 mm	-	0.313846	0.526881	0.637559	0.707018	0.753145
x = 58 mm	-	0.337119	0.527961	0.634369	0.703677	0.748723
x = 59 mm	-	0.355591	0.528215	0.631220	0.700285	0.744424
x = 60 mm	0.061936	0.370195	0.527706	0.627978	0.696808	0.740231
x = 61 mm	0.120057	0.381543	0.526437	0.624543	0.693244	0.736166
x = 62 mm	0.168766	0.390020	0.524387	0.620870	0.689648	0.732307
x = 63 mm	0.208144	0.395706	0.521545	0.617050	0.686206	0.728837
x = 64 mm	0.237112	0.399943	0.518407	0.613670	0.683357	0.726053

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.8	+0.75	+0.7	+0.65	+0.6	+0.55
x = 65 mm	0.252425	0.403940	0.516798	0.611451	0.681451	0.724141
x = 66 mm	0.263262	0.407956	0.515944	0.609717	0.680129	0.722911
x = 67 mm	0.271023	0.411331	0.515262	0.607960	0.678970	0.722072
x = 68 mm	0.276707	0.414101	0.514600	0.606025	0.677732	0.721408
x = 69 mm	0.280953	0.416371	0.513950	0.603903	0.676297	0.720788
x = 70 mm	0.284186	0.418241	0.513338	0.601652	0.674630	0.720135
x = 71 mm	0.286712	0.419778	0.512792	0.599356	0.672739	0.719385
x = 72 mm	0.288752	0.421047	0.512335	0.597087	0.670642	0.718505
x = 73 mm	0.290443	0.422129	0.511982	0.594889	0.668371	0.717482
x = 74 mm	0.291887	0.423093	0.511736	0.592797	0.665968	0.716315
x = 75 mm	0.293153	0.423984	0.511588	0.590837	0.663479	0.715005
x = 76 mm	0.294293	0.424834	0.511524	0.589029	0.660952	0.713560
x = 77 mm	0.295338	0.425656	0.511527	0.587387	0.658435	0.711998
x = 78 mm	0.296284	0.426437	0.511580	0.585929	0.655989	0.710356
x = 79 mm	0.297068	0.427187	0.511652	0.584700	0.653731	0.708730
x = 80 mm	0.297564	0.427455	0.511656	0.583991	0.652371	0.707682

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.5	+0.45	+0.4	+0.35	+0.3	+0.25
x = 49 mm	0.782300	0.827600	0.827600	0.829800	0.829800	0.814100
x = 50 mm	0.805862	0.827242	0.828302	0.829101	0.821295	0.813433
x = 51 mm	0.804959	0.825482	0.826715	0.827323	0.819628	0.811829
x = 52 mm	0.801665	0.821903	0.823724	0.824362	0.816925	0.809299
x = 53 mm	0.797205	0.817179	0.819704	0.820461	0.813365	0.805981
x = 54 mm	0.792419	0.811966	0.815120	0.815971	0.809213	0.802087
x = 55 mm	0.787633	0.806623	0.810287	0.811169	0.804710	0.797819
x = 56 mm	0.782934	0.801312	0.805380	0.806240	0.800033	0.793344
x = 57 mm	0.778330	0.796098	0.800492	0.801299	0.795305	0.788787
x = 58 mm	0.773816	0.791017	0.795683	0.796426	0.790618	0.784248
x = 59 mm	0.769392	0.786094	0.791000	0.791686	0.786049	0.779808
x = 60 mm	0.765082	0.781369	0.786499	0.787144	0.781669	0.775545
x = 61 mm	0.760938	0.776901	0.782248	0.782874	0.777552	0.771534
x = 62 mm	0.757060	0.772784	0.778342	0.778964	0.773782	0.767851
x = 63 mm	0.753613	0.769151	0.774894	0.775507	0.770438	0.764570
x = 64 mm	0.750809	0.766150	0.772013	0.772588	0.767588	0.761744

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.5	+0.45	+0.4	+0.35	+0.3	+0.25
x = 65 mm	0.748766	0.763849	0.769750	0.770242	0.765259	0.759399
x = 66 mm	0.747379	0.762183	0.768062	0.768438	0.763431	0.757521
x = 67 mm	0.746454	0.761008	0.766846	0.767097	0.762045	0.756060
x = 68 mm	0.745818	0.760182	0.765989	0.766126	0.761023	0.754956
x = 69 mm	0.745354	0.759595	0.765392	0.765435	0.760291	0.754147
x = 70 mm	0.744979	0.759165	0.764979	0.764954	0.759789	0.753580
x = 71 mm	0.744637	0.758836	0.764698	0.764632	0.759465	0.753206
x = 72 mm	0.744302	0.758578	0.764512	0.764430	0.759279	0.752985
x = 73 mm	0.743956	0.758369	0.764397	0.764321	0.759201	0.752884
x = 74 mm	0.743589	0.758199	0.764339	0.764285	0.759208	0.752880
x = 75 mm	0.743195	0.758061	0.764328	0.764309	0.759282	0.752954
x = 76 mm	0.742772	0.757952	0.764359	0.764384	0.759412	0.753091
x = 77 mm	0.742323	0.757876	0.764433	0.764504	0.759589	0.753278
x = 78 mm	0.741863	0.757842	0.764550	0.764665	0.759800	0.753502
x = 79 mm	0.741433	0.757860	0.764704	0.764849	0.760029	0.753744
x = 80 mm	0.741138	0.757870	0.764809	0.764981	0.760194	0.753923

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.2	+0.15	+0.1	+0.05	0	-0.05
x = 49 mm	0.814100	0.798600	0.798600	0.794200	0.794200	0.804500
x = 50 mm	0.805670	0.798006	0.795738	0.793631	0.798695	0.803913
x = 51 mm	0.804099	0.796562	0.794261	0.792249	0.797243	0.802514
x = 52 mm	0.801669	0.794318	0.792017	0.790118	0.795058	0.800384
x = 53 mm	0.798503	0.791382	0.789111	0.787341	0.792244	0.797635
x = 54 mm	0.794776	0.787903	0.785677	0.784047	0.788926	0.794392
x = 55 mm	0.790669	0.784040	0.781861	0.780369	0.785231	0.790779
x = 56 mm	0.786337	0.779934	0.777797	0.776436	0.781282	0.786914
x = 57 mm	0.781906	0.775708	0.773602	0.772363	0.777187	0.782902
x = 58 mm	0.777477	0.771464	0.769379	0.768249	0.773046	0.778838
x = 59 mm	0.773138	0.767288	0.765217	0.764185	0.768947	0.774809
x = 60 mm	0.768968	0.763262	0.761196	0.760250	0.764971	0.770896
x = 61 mm	0.765041	0.759459	0.757391	0.756520	0.761191	0.767172
x = 62 mm	0.761430	0.755950	0.753868	0.753061	0.757674	0.763704
x = 63 mm	0.758198	0.752793	0.750686	0.749928	0.754477	0.760549
x = 64 mm	0.755395	0.750033	0.747885	0.747163	0.751639	0.757747

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.2	+0.15	+0.1	+0.05	0	-0.05
x = 65 mm	0.753042	0.747689	0.745487	0.744787	0.749183	0.755323
x = 66 mm	0.751129	0.745758	0.743488	0.742799	0.747110	0.753277
x = 67 mm	0.749619	0.744214	0.741868	0.741181	0.745403	0.751595
x = 68 mm	0.748463	0.743019	0.740588	0.739897	0.744032	0.750246
x = 69 mm	0.747608	0.742124	0.739605	0.738909	0.742960	0.749194
x = 70 mm	0.747001	0.741481	0.738876	0.738173	0.742145	0.748399
x = 71 mm	0.746595	0.741045	0.738358	0.737650	0.741551	0.747823
x = 72 mm	0.746353	0.740778	0.738015	0.737305	0.741140	0.747431
x = 73 mm	0.746241	0.740649	0.737815	0.737105	0.740885	0.747195
x = 74 mm	0.746235	0.740632	0.737734	0.737028	0.740759	0.747088
x = 75 mm	0.746314	0.740705	0.737750	0.737050	0.740742	0.747093
x = 76 mm	0.746462	0.740851	0.737845	0.737155	0.740816	0.747191
x = 77 mm	0.746664	0.741055	0.738003	0.737325	0.740966	0.747367
x = 78 mm	0.746905	0.741300	0.738207	0.737545	0.741175	0.747606
x = 79 mm	0.747166	0.741569	0.738440	0.737796	0.741422	0.747886
x = 80 mm	0.747363	0.741773	0.738626	0.737996	0.741622	0.748106

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35
x = 49 mm	0.804500	0.826200	0.826200	0.848400	0.848400	0.853200
x = 50 mm	0.814672	0.825513	0.836566	0.847519	0.849975	0.851988
x = 51 mm	0.813156	0.823954	0.834895	0.845651	0.848080	0.849636
x = 52 mm	0.810892	0.821638	0.832441	0.842986	0.845394	0.846480
x = 53 mm	0.808008	0.818705	0.829371	0.839722	0.842143	0.842798
x = 54 mm	0.804634	0.815293	0.825834	0.836013	0.838490	0.838754
x = 55 mm	0.800895	0.811522	0.821953	0.831980	0.834543	0.834444
x = 56 mm	0.796905	0.807503	0.817833	0.827720	0.830389	0.829936
x = 57 mm	0.792767	0.803332	0.813567	0.823320	0.826100	0.825295
x = 58 mm	0.788576	0.799099	0.809241	0.818861	0.821750	0.820588
x = 59 mm	0.784418	0.794888	0.804938	0.814421	0.817410	0.815881
x = 60 mm	0.780374	0.790781	0.800737	0.810080	0.813157	0.811249
x = 61 mm	0.776520	0.786853	0.796716	0.805917	0.809069	0.806769
x = 62 mm	0.772925	0.783177	0.792950	0.802014	0.805230	0.802528
x = 63 mm	0.769649	0.779816	0.789507	0.798444	0.801722	0.798616
x = 64 mm	0.766735	0.776819	0.786440	0.795268	0.798612	0.795113

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35
x = 65 mm	0.764208	0.774212	0.783777	0.792519	0.795940	0.792062
x = 66 mm	0.762070	0.772000	0.781522	0.790197	0.793703	0.789456
x = 67 mm	0.760305	0.770165	0.779650	0.788276	0.791865	0.787245
x = 68 mm	0.758883	0.768673	0.778126	0.786710	0.790373	0.785360
x = 69 mm	0.757764	0.767484	0.776904	0.785450	0.789167	0.783734
x = 70 mm	0.756907	0.766557	0.775940	0.784446	0.788195	0.782305
x = 71 mm	0.756274	0.765851	0.775190	0.783654	0.787409	0.781024
x = 72 mm	0.755829	0.765331	0.774620	0.783038	0.786770	0.779850
x = 73 mm	0.755543	0.764968	0.774200	0.782566	0.786247	0.778750
x = 74 mm	0.755390	0.764738	0.773906	0.782217	0.785815	0.777700
x = 75 mm	0.755352	0.764621	0.773721	0.781974	0.785458	0.776682
x = 76 mm	0.755411	0.764604	0.773632	0.781825	0.785163	0.775687
x = 77 mm	0.755555	0.764674	0.773632	0.781766	0.784927	0.774716
x = 78 mm	0.755767	0.764818	0.773713	0.781797	0.784757	0.773791
x = 79 mm	0.756024	0.765015	0.773854	0.781907	0.784660	0.772959
x = 80 mm	0.756228	0.765177	0.773974	0.781999	0.784603	0.772444

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.4	-0.45	-0.5	-0.55	-0.6	-0.65
x = 49 mm	0.853200	0.815700	0.815700	0.703500	0.703500	0.477200
x = 50 mm	0.833529	0.812842	0.758627	0.700252	0.590672	0.468553
x = 51 mm	0.831357	0.808136	0.756088	0.696293	0.590606	0.464230
x = 52 mm	0.828380	0.802614	0.752812	0.692504	0.591713	0.464450
x = 53 mm	0.824861	0.796938	0.749152	0.688986	0.593423	0.467556
x = 54 mm	0.820927	0.791346	0.745220	0.685541	0.594914	0.472066
x = 55 mm	0.816658	0.785888	0.741072	0.682053	0.595745	0.477071
x = 56 mm	0.812124	0.780554	0.736757	0.678469	0.595759	0.481941
x = 57 mm	0.807401	0.775330	0.732322	0.674769	0.594982	0.486257
x = 58 mm	0.802564	0.770207	0.727807	0.670947	0.593534	0.489795
x = 59 mm	0.797690	0.765191	0.723249	0.667008	0.591557	0.492489
x = 60 mm	0.792856	0.760300	0.718686	0.662969	0.589173	0.494363
x = 61 mm	0.788143	0.755570	0.714168	0.658863	0.586486	0.495490
x = 62 mm	0.783642	0.751066	0.709767	0.654762	0.583606	0.495973
x = 63 mm	0.779456	0.746881	0.705606	0.650811	0.580721	0.496004
x = 64 mm	0.775681	0.743125	0.701842	0.647248	0.578199	0.496126

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.4	-0.45	-0.5	-0.55	-0.6	-0.65
x = 65 mm	0.772372	0.739860	0.698578	0.644255	0.576379	0.497026
x = 66 mm	0.769513	0.737050	0.695765	0.641760	0.575131	0.498474
x = 67 mm	0.767036	0.734599	0.693277	0.639603	0.574243	0.500195
x = 68 mm	0.764857	0.732401	0.690998	0.637661	0.573581	0.502037
x = 69 mm	0.762896	0.730370	0.688846	0.635863	0.573078	0.503921
x = 70 mm	0.761089	0.728442	0.686772	0.634177	0.572702	0.505809
x = 71 mm	0.759384	0.726572	0.684751	0.632590	0.572436	0.507679
x = 72 mm	0.757742	0.724733	0.682773	0.631099	0.572268	0.509515
x = 73 mm	0.756134	0.722905	0.680835	0.629703	0.572185	0.511304
x = 74 mm	0.754539	0.721082	0.678942	0.628399	0.572173	0.513035
x = 75 mm	0.752946	0.719261	0.677099	0.627186	0.572219	0.514693
x = 76 mm	0.751351	0.717451	0.675315	0.626060	0.572305	0.516266
x = 77 mm	0.749767	0.715670	0.673607	0.625021	0.572417	0.517735
x = 78 mm	0.748232	0.713964	0.672009	0.624077	0.572537	0.519071
x = 79 mm	0.746836	0.712439	0.670612	0.623271	0.572650	0.520205
x = 80 mm	0.745996	0.711543	0.669816	0.622828	0.572724	0.520839

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)			
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)		
แนวท่อ	-0.7	-0.75	-0.8
x = 49 mm	0.477200	-	-
x = 50 mm	0.262648	-	-
x = 51 mm	0.296357	-	-
x = 52 mm	0.312782	-	-
x = 53 mm	0.323454	0.007106	-
x = 54 mm	0.332692	0.074170	-
x = 55 mm	0.342000	0.128679	-
x = 56 mm	0.351693	0.168945	-
x = 57 mm	0.361502	0.195164	-
x = 58 mm	0.370964	0.218865	-
x = 59 mm	0.379674	0.240309	-
x = 60 mm	0.387366	0.259516	0.041250
x = 61 mm	0.393904	0.276443	0.082963
x = 62 mm	0.399251	0.291055	0.120905
x = 63 mm	0.403477	0.303295	0.154274
x = 64 mm	0.407097	0.313915	0.181560

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)			
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)		
แนวท่อ	-0.7	-0.75	-0.8
x = 65 mm	0.411641	0.323627	0.199346
x = 66 mm	0.416860	0.333417	0.213494
x = 67 mm	0.422191	0.342462	0.224978
x = 68 mm	0.427353	0.350621	0.234591
x = 69 mm	0.432239	0.357935	0.242818
x = 70 mm	0.436818	0.364490	0.249961
x = 71 mm	0.441092	0.370375	0.256221
x = 72 mm	0.445069	0.375668	0.261740
x = 73 mm	0.448765	0.380435	0.266616
x = 74 mm	0.452192	0.384729	0.270925
x = 75 mm	0.455357	0.388591	0.274718
x = 76 mm	0.458264	0.392047	0.278025
x = 77 mm	0.460906	0.395108	0.280857
x = 78 mm	0.463256	0.397755	0.283200
x = 79 mm	0.465223	0.399986	0.285025
x = 80 mm	0.466309	0.401131	0.286173

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลว
ขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.8	+0.75	+0.7	+0.65	+0.6	+0.55
x = 49 mm	-	-	0.425200	0.661400	0.661400	0.782300
x = 50 mm	-	-	0.511518	0.670249	0.725733	0.782316
x = 51 mm	-	-	0.530458	0.665133	0.724136	0.779155
x = 52 mm	-	-	0.540291	0.657271	0.719221	0.773328
x = 53 mm	-	0.014566	0.545961	0.651033	0.714381	0.766927
x = 54 mm	-	0.151820	0.549676	0.646495	0.710173	0.760779
x = 55 mm	-	0.260981	0.552095	0.643146	0.706496	0.755056
x = 56 mm	-	0.330202	0.553575	0.640522	0.703144	0.749709
x = 57 mm	-	0.358128	0.554340	0.638287	0.699946	0.744649
x = 58 mm	-	0.379710	0.554514	0.636214	0.696790	0.739797
x = 59 mm	-	0.396480	0.554152	0.634138	0.693603	0.735105
x = 60 mm	0.071632	0.409431	0.553260	0.631948	0.690354	0.730556
x = 61 mm	0.138344	0.419199	0.551808	0.629577	0.687055	0.726176
x = 62 mm	0.193640	0.426162	0.549766	0.627031	0.683794	0.722062
x = 63 mm	0.237624	0.430337	0.547170	0.624496	0.680813	0.718420
x = 64 mm	0.268791	0.433464	0.544722	0.622717	0.678624	0.715576

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.8	+0.75	+0.7	+0.65	+0.6	+0.55
x = 65 mm	0.283939	0.436972	0.544198	0.622415	0.677564	0.713694
x = 66 mm	0.294824	0.440127	0.544141	0.622646	0.677166	0.712518
x = 67 mm	0.303002	0.442465	0.543880	0.622774	0.676964	0.711720
x = 68 mm	0.309394	0.444194	0.543345	0.622603	0.676735	0.711092
x = 69 mm	0.314540	0.445513	0.542592	0.622098	0.676386	0.710524
x = 70 mm	0.318780	0.446577	0.541699	0.621281	0.675886	0.709964
x = 71 mm	0.322344	0.447496	0.540739	0.620196	0.675230	0.709390
x = 72 mm	0.325403	0.448342	0.539769	0.618893	0.674425	0.708798
x = 73 mm	0.328077	0.449163	0.538831	0.617429	0.673487	0.708180
x = 74 mm	0.330463	0.449986	0.537955	0.615858	0.672427	0.707530
x = 75 mm	0.332628	0.450826	0.537162	0.614222	0.671257	0.706847
x = 76 mm	0.334622	0.451689	0.536464	0.612557	0.669989	0.706136
x = 77 mm	0.336472	0.452569	0.535865	0.610895	0.668643	0.705404
x = 78 mm	0.338176	0.453448	0.535364	0.609275	0.667252	0.704669
x = 79 mm	0.339673	0.454339	0.534954	0.607763	0.665895	0.703976
x = 80 mm	0.340691	0.454760	0.534703	0.606838	0.665025	0.703516

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.5	+0.45	+0.4	+0.35	+0.3	+0.25
x = 49 mm	0.782300	0.827600	0.827600	0.829800	0.829800	0.814100
x = 50 mm	0.804618	0.826538	0.827742	0.828741	0.820985	0.813199
x = 51 mm	0.802218	0.823698	0.825254	0.826282	0.818735	0.811123
x = 52 mm	0.797845	0.819177	0.821365	0.822561	0.815345	0.808005
x = 53 mm	0.792628	0.813714	0.816561	0.817938	0.811094	0.804070
x = 54 mm	0.787245	0.807905	0.811304	0.812791	0.806291	0.799573
x = 55 mm	0.781943	0.802061	0.805885	0.807398	0.801187	0.794738
x = 56 mm	0.776775	0.796314	0.800463	0.801935	0.795961	0.789737
x = 57 mm	0.771732	0.790714	0.795120	0.796513	0.790735	0.784699
x = 58 mm	0.766800	0.785284	0.789907	0.791208	0.785597	0.779721
x = 59 mm	0.761979	0.780044	0.784868	0.786081	0.780621	0.774884
x = 60 mm	0.757289	0.775029	0.780055	0.781196	0.775876	0.770262
x = 61 mm	0.752788	0.770303	0.775539	0.776628	0.771437	0.765930
x = 62 mm	0.748587	0.765966	0.771414	0.772463	0.767384	0.761962
x = 63 mm	0.744863	0.762157	0.767798	0.768798	0.763796	0.758426
x = 64 mm	0.741840	0.759024	0.764796	0.765709	0.760734	0.755372

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.5	+0.45	+0.4	+0.35	+0.3	+0.25
x = 65 mm	0.739612	0.756615	0.762441	0.763219	0.758213	0.752813
x = 66 mm	0.738033	0.754830	0.760663	0.761276	0.756198	0.750724
x = 67 mm	0.736873	0.753498	0.759339	0.759785	0.754615	0.749048
x = 68 mm	0.735957	0.752466	0.758346	0.758645	0.753382	0.747715
x = 69 mm	0.735176	0.751629	0.757585	0.757767	0.752423	0.746656
x = 70 mm	0.734470	0.750918	0.756988	0.757081	0.751673	0.745818
x = 71 mm	0.733809	0.750288	0.756505	0.756536	0.751086	0.745158
x = 72 mm	0.733175	0.749709	0.756102	0.756099	0.750628	0.744640
x = 73 mm	0.732555	0.749166	0.755760	0.755747	0.750273	0.744236
x = 74 mm	0.731946	0.748653	0.755467	0.755465	0.750000	0.743926
x = 75 mm	0.731350	0.748167	0.755216	0.755241	0.749796	0.743695
x = 76 mm	0.730771	0.747711	0.755003	0.755070	0.749653	0.743531
x = 77 mm	0.730216	0.747290	0.754830	0.754948	0.749562	0.743425
x = 78 mm	0.729699	0.746914	0.754699	0.754872	0.749518	0.743369
x = 79 mm	0.729245	0.746593	0.754606	0.754831	0.749507	0.743349
x = 80 mm	0.728950	0.746386	0.754544	0.754808	0.749508	0.743348

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.2	+0.15	+0.1	+0.05	0	-0.05
x = 49 mm	0.814100	0.798600	0.798600	0.794200	0.794200	0.804500
x = 50 mm	0.805481	0.797825	0.795613	0.793477	0.798595	0.803776
x = 51 mm	0.803511	0.796023	0.793845	0.791797	0.796904	0.802109
x = 52 mm	0.800561	0.793309	0.791200	0.789267	0.794382	0.799619
x = 53 mm	0.796828	0.789852	0.787835	0.786037	0.791178	0.796460
x = 54 mm	0.792534	0.785844	0.783926	0.782273	0.787453	0.792796
x = 55 mm	0.787882	0.781468	0.779645	0.778135	0.783362	0.788775
x = 56 mm	0.783040	0.776880	0.775141	0.773765	0.779038	0.784529
x = 57 mm	0.778138	0.772207	0.770539	0.769284	0.774600	0.780170
x = 58 mm	0.773278	0.767552	0.765941	0.764794	0.770143	0.775790
x = 59 mm	0.768546	0.763001	0.761436	0.760383	0.765755	0.771472
x = 60 mm	0.764017	0.758631	0.757101	0.756130	0.761510	0.767289
x = 61 mm	0.759766	0.754514	0.753007	0.752104	0.757477	0.763308
x = 62 mm	0.755861	0.750715	0.749215	0.748366	0.753717	0.759590
x = 63 mm	0.752362	0.747290	0.745779	0.744965	0.750279	0.756184
x = 64 mm	0.749311	0.744274	0.742733	0.741937	0.747197	0.753125

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.2	+0.15	+0.1	+0.05	0	-0.05
x = 65 mm	0.746721	0.741683	0.740091	0.739297	0.744487	0.750432
x = 66 mm	0.744572	0.739500	0.737845	0.737039	0.742147	0.748103
x = 67 mm	0.742820	0.737693	0.735966	0.735140	0.740157	0.746120
x = 68 mm	0.741408	0.736217	0.734414	0.733565	0.738485	0.744452
x = 69 mm	0.740279	0.735027	0.733144	0.732272	0.737094	0.743064
x = 70 mm	0.739383	0.734075	0.732112	0.731219	0.735945	0.741918
x = 71 mm	0.738673	0.733317	0.731278	0.730367	0.735002	0.740978
x = 72 mm	0.738116	0.732720	0.730609	0.729685	0.734232	0.740213
x = 73 mm	0.737683	0.732255	0.730078	0.729144	0.733611	0.739597
x = 74 mm	0.737352	0.731899	0.729661	0.728723	0.733115	0.739110
x = 75 mm	0.737107	0.731636	0.729344	0.728404	0.732729	0.738734
x = 76 mm	0.736934	0.731451	0.729110	0.728174	0.732439	0.738457
x = 77 mm	0.736824	0.731333	0.728949	0.728020	0.732234	0.738269
x = 78 mm	0.736766	0.731271	0.728850	0.727931	0.732102	0.738160
x = 79 mm	0.736749	0.731255	0.728802	0.727898	0.732033	0.738117
x = 80 mm	0.736754	0.731265	0.728796	0.727902	0.732018	0.738119

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35
x = 49 mm	0.804500	0.826200	0.826200	0.848400	0.848400	0.853200
x = 50 mm	0.814565	0.825393	0.836421	0.847398	0.849756	0.851836
x = 51 mm	0.812809	0.823584	0.834467	0.845254	0.847481	0.849133
x = 52 mm	0.810219	0.820937	0.831652	0.842241	0.844350	0.845584
x = 53 mm	0.806967	0.817644	0.828201	0.838621	0.840674	0.841560
x = 54 mm	0.803220	0.813877	0.824302	0.834593	0.836656	0.837271
x = 55 mm	0.799126	0.809783	0.820101	0.830298	0.832423	0.832825
x = 56 mm	0.794810	0.805480	0.815710	0.825834	0.828056	0.828282
x = 57 mm	0.790379	0.801064	0.811219	0.821281	0.823618	0.823688
x = 58 mm	0.785923	0.796620	0.806707	0.816707	0.819166	0.819088
x = 59 mm	0.781523	0.792225	0.802244	0.812180	0.814757	0.814533
x = 60 mm	0.777252	0.787947	0.797901	0.807764	0.810453	0.810079
x = 61 mm	0.773177	0.783855	0.793744	0.803528	0.806320	0.805791
x = 62 mm	0.769360	0.780012	0.789840	0.799541	0.802430	0.801745
x = 63 mm	0.765854	0.776473	0.786246	0.795868	0.798855	0.798021
x = 64 mm	0.762695	0.773278	0.783009	0.792563	0.795655	0.794692

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35
x = 65 mm	0.759905	0.770452	0.780154	0.789654	0.792866	0.791797
x = 66 mm	0.757484	0.767995	0.777682	0.787142	0.790486	0.789329
x = 67 mm	0.755414	0.765889	0.775572	0.785003	0.788483	0.787244
x = 68 mm	0.753664	0.764105	0.773788	0.783195	0.786809	0.785480
x = 69 mm	0.752200	0.762604	0.772290	0.781675	0.785414	0.783976
x = 70 mm	0.750981	0.761347	0.771036	0.780398	0.784249	0.782677
x = 71 mm	0.749973	0.760300	0.769989	0.779324	0.783274	0.781537
x = 72 mm	0.749145	0.759430	0.769117	0.778422	0.782456	0.780518
x = 73 mm	0.748470	0.758712	0.768393	0.777664	0.781768	0.779591
x = 74 mm	0.747927	0.758126	0.767798	0.777033	0.781193	0.778731
x = 75 mm	0.747501	0.757657	0.767318	0.776514	0.780716	0.777923
x = 76 mm	0.747180	0.757294	0.766942	0.776099	0.780332	0.777156
x = 77 mm	0.746955	0.757030	0.766668	0.775788	0.780043	0.776429
x = 78 mm	0.746815	0.756857	0.766489	0.775582	0.779859	0.775757
x = 79 mm	0.746748	0.756762	0.766393	0.775470	0.779782	0.775169
x = 80 mm	0.746735	0.756730	0.766355	0.775418	0.779744	0.774786

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.4	-0.45	-0.5	-0.55	-0.6	-0.65
x = 49 mm	0.853200	0.815700	0.815700	0.703500	0.703500	0.477200
x = 50 mm	0.833151	0.813270	0.757975	0.699140	0.589067	0.467416
x = 51 mm	0.830458	0.808965	0.754805	0.693453	0.587675	0.462719
x = 52 mm	0.827047	0.803806	0.751234	0.688189	0.587841	0.462901
x = 53 mm	0.823308	0.798420	0.747574	0.683711	0.588938	0.466012
x = 54 mm	0.819398	0.793043	0.743793	0.679813	0.590134	0.470447
x = 55 mm	0.815360	0.787740	0.739841	0.676270	0.590965	0.475332
x = 56 mm	0.811207	0.782520	0.735711	0.672916	0.591213	0.480117
x = 57 mm	0.806957	0.777384	0.731433	0.669629	0.590824	0.484427
x = 58 mm	0.802637	0.772335	0.727046	0.666325	0.589845	0.488023
x = 59 mm	0.798286	0.767386	0.722598	0.662953	0.588362	0.490800
x = 60 mm	0.793956	0.762558	0.718138	0.659489	0.586466	0.492751
x = 61 mm	0.789712	0.757887	0.713724	0.655946	0.584241	0.493934
x = 62 mm	0.785633	0.753431	0.709434	0.652376	0.581783	0.494451
x = 63 mm	0.781814	0.749276	0.705382	0.648905	0.579257	0.494481
x = 64 mm	0.778346	0.745519	0.701718	0.645748	0.576996	0.494514

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.4	-0.45	-0.5	-0.55	-0.6	-0.65
x = 65 mm	0.775283	0.742219	0.698537	0.643071	0.575310	0.495197
x = 66 mm	0.772614	0.739344	0.695793	0.640809	0.574078	0.496309
x = 67 mm	0.770285	0.736807	0.693371	0.638815	0.573103	0.497611
x = 68 mm	0.768222	0.734514	0.691160	0.636973	0.572270	0.498990
x = 69 mm	0.766359	0.732386	0.689075	0.635217	0.571527	0.500397
x = 70 mm	0.764639	0.730361	0.687065	0.633517	0.570857	0.501813
x = 71 mm	0.763017	0.728398	0.685095	0.631861	0.570255	0.503230
x = 72 mm	0.761458	0.726465	0.683147	0.630248	0.569722	0.504642
x = 73 mm	0.759934	0.724542	0.681211	0.628681	0.569255	0.506041
x = 74 mm	0.758427	0.722616	0.679284	0.627162	0.568849	0.507418
x = 75 mm	0.756921	0.720682	0.677367	0.625695	0.568497	0.508761
x = 76 mm	0.755411	0.718743	0.675466	0.624279	0.568188	0.510053
x = 77 mm	0.753904	0.716818	0.673597	0.622923	0.567910	0.511273
x = 78 mm	0.752429	0.714951	0.671803	0.621646	0.567654	0.512392
x = 79 mm	0.751062	0.713254	0.670187	0.620517	0.567429	0.513353
x = 80 mm	0.750204	0.712231	0.669233	0.619870	0.567314	0.513915

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)			
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)		
แนวท่อ	-0.7	-0.75	-0.8
x = 49 mm	0.477200	-	-
x = 50 mm	0.267695	-	-
x = 51 mm	0.304374	-	-
x = 52 mm	0.321889	-	-
x = 53 mm	0.332465	0.007984	-
x = 54 mm	0.340729	0.082511	-
x = 55 mm	0.348523	0.141216	-
x = 56 mm	0.356467	0.181413	-
x = 57 mm	0.364571	0.204356	-
x = 58 mm	0.372543	0.225082	-
x = 59 mm	0.380028	0.244004	-
x = 60 mm	0.386744	0.261198	0.042071
x = 61 mm	0.392521	0.276597	0.083864
x = 62 mm	0.397288	0.290114	0.121435
x = 63 mm	0.401069	0.301616	0.154361
x = 64 mm	0.404239	0.311620	0.181562

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)			
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)		
แนวท่อ	-0.7	-0.75	-0.8
x = 65 mm	0.408220	0.320774	0.199872
x = 66 mm	0.412837	0.330226	0.215043
x = 67 mm	0.417603	0.339208	0.227901
x = 68 mm	0.422276	0.347545	0.239136
x = 69 mm	0.426765	0.355229	0.249166
x = 70 mm	0.431041	0.362305	0.258239
x = 71 mm	0.435099	0.368825	0.266517
x = 72 mm	0.438944	0.374843	0.274106
x = 73 mm	0.442583	0.380402	0.281074
x = 74 mm	0.446020	0.385535	0.287472
x = 75 mm	0.449255	0.390269	0.293328
x = 76 mm	0.452280	0.394616	0.298652
x = 77 mm	0.455079	0.398572	0.303433
x = 78 mm	0.457615	0.402104	0.307631
x = 79 mm	0.459788	0.405165	0.311167
x = 80 mm	0.461040	0.406875	0.313468

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลว
ขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.35 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.8	+0.75	+0.7	+0.65	+0.6	+0.55
x = 49 mm	-	-	0.425200	0.661400	0.661400	0.782300
x = 50 mm	-	-	0.503551	0.675839	0.729662	0.784289
x = 51 mm	-	-	0.499715	0.671795	0.730310	0.783091
x = 52 mm	-	-	0.505567	0.662722	0.726042	0.778425
x = 53 mm	-	0.012531	0.513124	0.655099	0.721367	0.772802
x = 54 mm	-	0.131252	0.519457	0.649284	0.717189	0.767292
x = 55 mm	-	0.226349	0.524079	0.644755	0.713471	0.762135
x = 56 mm	-	0.289001	0.527237	0.641026	0.710028	0.757303
x = 57 mm	-	0.318315	0.529239	0.637753	0.706705	0.752714
x = 58 mm	-	0.341439	0.530307	0.634693	0.703399	0.748296
x = 59 mm	-	0.359768	0.530573	0.631670	0.700044	0.744003
x = 60 mm	0.063063	0.374233	0.530090	0.628551	0.696605	0.739817
x = 61 mm	0.122270	0.385443	0.528859	0.625237	0.693081	0.735759
x = 62 mm	0.171905	0.393776	0.526853	0.621690	0.689533	0.731914
x = 63 mm	0.212015	0.399330	0.524076	0.618013	0.686158	0.728468
x = 64 mm	0.241403	0.403523	0.521063	0.614818	0.683405	0.725725

ตารางผนวกที่ ๔ (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.8	+0.75	+0.7	+0.65	+0.6	+0.55
x = 65 mm	0.256797	0.407569	0.519635	0.612828	0.681624	0.723869
x = 66 mm	0.267745	0.411593	0.518926	0.611324	0.680439	0.722700
x = 67 mm	0.275665	0.414962	0.518346	0.609785	0.679424	0.721919
x = 68 mm	0.281533	0.417747	0.517762	0.608053	0.678337	0.721312
x = 69 mm	0.285941	0.420128	0.517176	0.606122	0.677064	0.720749
x = 70 mm	0.289339	0.422155	0.516621	0.604039	0.675560	0.720156
x = 71 mm	0.292074	0.423846	0.516120	0.601876	0.673830	0.719483
x = 72 mm	0.294366	0.425265	0.515693	0.599710	0.671894	0.718690
x = 73 mm	0.296338	0.426504	0.515362	0.597594	0.669781	0.717763
x = 74 mm	0.298080	0.427630	0.515137	0.595568	0.667530	0.716699
x = 75 mm	0.299656	0.428689	0.515013	0.593657	0.665185	0.715501
x = 76 mm	0.301111	0.429707	0.514977	0.591884	0.662790	0.714175
x = 77 mm	0.302468	0.430695	0.515014	0.590266	0.660393	0.712738
x = 78 mm	0.303719	0.431637	0.515104	0.588821	0.658052	0.711225
x = 79 mm	0.304792	0.432539	0.515219	0.587599	0.655886	0.709726
x = 80 mm	0.305488	0.432915	0.515262	0.586902	0.654583	0.708761

ตารางผนวกที่ ๔ (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.5	+0.45	+0.4	+0.35	+0.3	+0.25
x = 49 mm	0.782300	0.827600	0.827600	0.829800	0.829800	0.814100
x = 50 mm	0.805801	0.827198	0.828270	0.829077	0.821277	0.813420
x = 51 mm	0.804805	0.825362	0.826626	0.827253	0.819574	0.811788
x = 52 mm	0.801430	0.821708	0.823573	0.824239	0.816828	0.809224
x = 53 mm	0.796915	0.816924	0.819499	0.820288	0.813225	0.805872
x = 54 mm	0.792093	0.811666	0.814872	0.815755	0.809035	0.801945
x = 55 mm	0.787283	0.806289	0.810005	0.810916	0.804499	0.797648
x = 56 mm	0.782567	0.800950	0.805068	0.805955	0.799791	0.793146
x = 57 mm	0.777949	0.795714	0.800155	0.800986	0.795037	0.788566
x = 58 mm	0.773421	0.790612	0.795323	0.796087	0.790327	0.784005
x = 59 mm	0.768986	0.785672	0.790620	0.791324	0.785735	0.779545
x = 60 mm	0.764665	0.780931	0.786100	0.786761	0.781335	0.775264
x = 61 mm	0.760512	0.776450	0.781833	0.782473	0.777201	0.771236
x = 62 mm	0.756630	0.772325	0.777916	0.778549	0.773417	0.767540
x = 63 mm	0.753188	0.768692	0.774462	0.775084	0.770063	0.764249
x = 64 mm	0.750401	0.765699	0.771584	0.772162	0.767208	0.761416

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.5	+0.45	+0.4	+0.35	+0.3	+0.25
x = 65 mm	0.748385	0.763415	0.769328	0.769817	0.764877	0.759067
x = 66 mm	0.747028	0.761767	0.767650	0.768016	0.763048	0.757186
x = 67 mm	0.746129	0.760608	0.766443	0.766678	0.761660	0.755724
x = 68 mm	0.745517	0.759796	0.765592	0.765709	0.760637	0.754618
x = 69 mm	0.745073	0.759220	0.765001	0.765020	0.759902	0.753804
x = 70 mm	0.744721	0.758801	0.764592	0.764539	0.759394	0.753229
x = 71 mm	0.744403	0.758481	0.764311	0.764213	0.759060	0.752844
x = 72 mm	0.744091	0.758229	0.764123	0.764005	0.758862	0.752609
x = 73 mm	0.743768	0.758023	0.764004	0.763887	0.758770	0.752494
x = 74 mm	0.743426	0.757855	0.763938	0.763840	0.758761	0.752474
x = 75 mm	0.743060	0.757717	0.763918	0.763851	0.758819	0.752530
x = 76 mm	0.742669	0.757607	0.763940	0.763912	0.758932	0.752650
x = 77 mm	0.742257	0.757531	0.764003	0.764019	0.759091	0.752820
x = 78 mm	0.741839	0.757498	0.764111	0.764167	0.759287	0.753028
x = 79 mm	0.741456	0.757519	0.764256	0.764341	0.759504	0.753258
x = 80 mm	0.741197	0.757536	0.764360	0.764469	0.759664	0.753431

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.2	+0.15	+0.1	+0.05	0	-0.05
x = 49 mm	0.814100	0.798600	0.798600	0.794200	0.794200	0.804500
x = 50 mm	0.805660	0.797999	0.795734	0.793629	0.798696	0.803915
x = 51 mm	0.804068	0.796542	0.794248	0.792242	0.797246	0.802521
x = 52 mm	0.801612	0.794280	0.791993	0.790106	0.795063	0.800399
x = 53 mm	0.798418	0.791326	0.789075	0.787324	0.792253	0.797659
x = 54 mm	0.794665	0.787830	0.785630	0.784024	0.788940	0.794427
x = 55 mm	0.790534	0.783951	0.781804	0.780343	0.785251	0.790825
x = 56 mm	0.786180	0.779831	0.777732	0.776408	0.781307	0.786972
x = 57 mm	0.781730	0.775593	0.773530	0.772332	0.777218	0.782970
x = 58 mm	0.777284	0.771336	0.769300	0.768216	0.773082	0.778917
x = 59 mm	0.772929	0.767150	0.765131	0.764149	0.768987	0.774897
x = 60 mm	0.768743	0.763113	0.761104	0.760212	0.765014	0.770991
x = 61 mm	0.764803	0.759302	0.757292	0.756479	0.761237	0.767274
x = 62 mm	0.761181	0.755784	0.753765	0.753017	0.757723	0.763812
x = 63 mm	0.757941	0.752622	0.750578	0.749882	0.754527	0.760661
x = 64 mm	0.755132	0.749857	0.747774	0.747115	0.751690	0.757864

ตารางผนวกที่ ๔ (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.2	+0.15	+0.1	+0.05	0	-0.05
x = 65 mm	0.752774	0.747511	0.745372	0.744736	0.749235	0.755442
x = 66 mm	0.750857	0.745578	0.743371	0.742746	0.747162	0.753400
x = 67 mm	0.749344	0.744029	0.741746	0.741125	0.745456	0.751721
x = 68 mm	0.748183	0.742828	0.740463	0.739839	0.744086	0.750375
x = 69 mm	0.747321	0.741924	0.739475	0.738848	0.743013	0.749327
x = 70 mm	0.746704	0.741271	0.738740	0.738108	0.742198	0.748535
x = 71 mm	0.746287	0.740824	0.738215	0.737581	0.741603	0.747962
x = 72 mm	0.746032	0.740545	0.737863	0.737231	0.741192	0.747575
x = 73 mm	0.745905	0.740402	0.737655	0.737027	0.740936	0.747342
x = 74 mm	0.745883	0.740369	0.737563	0.736944	0.740810	0.747240
x = 75 mm	0.745945	0.740427	0.737569	0.736960	0.740792	0.747249
x = 76 mm	0.746076	0.740558	0.737654	0.737060	0.740866	0.747352
x = 77 mm	0.746262	0.740747	0.737801	0.737225	0.741016	0.747533
x = 78 mm	0.746487	0.740978	0.737996	0.737441	0.741225	0.747777
x = 79 mm	0.746736	0.741235	0.738220	0.737688	0.741472	0.748061
x = 80 mm	0.746926	0.741433	0.738401	0.737886	0.741672	0.748282

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35
x = 49 mm	0.804500	0.826200	0.826200	0.848400	0.848400	0.853200
x = 50 mm	0.814678	0.825520	0.836576	0.847532	0.849988	0.852008
x = 51 mm	0.813172	0.823976	0.834924	0.845690	0.848123	0.849695
x = 52 mm	0.810925	0.821681	0.832498	0.843060	0.845474	0.846585
x = 53 mm	0.808059	0.818774	0.829460	0.839835	0.842264	0.842950
x = 54 mm	0.804705	0.815388	0.825956	0.836165	0.838651	0.838949
x = 55 mm	0.800987	0.811645	0.822107	0.832170	0.834742	0.834676
x = 56 mm	0.797016	0.807652	0.818017	0.827947	0.830622	0.830200
x = 57 mm	0.792898	0.803505	0.813779	0.823579	0.826363	0.825585
x = 58 mm	0.788723	0.799293	0.809479	0.819147	0.822037	0.820896
x = 59 mm	0.784579	0.795102	0.805197	0.814731	0.817718	0.816202
x = 60 mm	0.780547	0.791010	0.801014	0.810409	0.813481	0.811576
x = 61 mm	0.776703	0.787095	0.797007	0.806263	0.809405	0.807097
x = 62 mm	0.773116	0.783430	0.793253	0.802370	0.805573	0.802852
x = 63 mm	0.769846	0.780077	0.789819	0.798808	0.802067	0.798931
x = 64 mm	0.766936	0.777085	0.786757	0.795635	0.798956	0.795415

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35
x = 65 mm	0.764412	0.774482	0.784098	0.792887	0.796279	0.792348
x = 66 mm	0.762277	0.772273	0.781845	0.790565	0.794037	0.789723
x = 67 mm	0.760515	0.770440	0.779976	0.788644	0.792193	0.787494
x = 68 mm	0.759095	0.768951	0.778455	0.787078	0.790695	0.785594
x = 69 mm	0.757979	0.767765	0.777237	0.785820	0.789486	0.783953
x = 70 mm	0.757126	0.766842	0.776277	0.784819	0.788511	0.782513
x = 71 mm	0.756497	0.766141	0.775534	0.784032	0.787725	0.781222
x = 72 mm	0.756056	0.765628	0.774971	0.783422	0.787087	0.780039
x = 73 mm	0.755775	0.765271	0.774559	0.782958	0.786566	0.778932
x = 74 mm	0.755628	0.765048	0.774275	0.782618	0.786137	0.777875
x = 75 mm	0.755596	0.764939	0.774099	0.782384	0.785783	0.776850
x = 76 mm	0.755662	0.764929	0.774021	0.782245	0.785491	0.775848
x = 77 mm	0.755811	0.765007	0.774031	0.782197	0.785258	0.774870
x = 78 mm	0.756029	0.765158	0.774120	0.782237	0.785088	0.773935
x = 79 mm	0.756291	0.765360	0.774269	0.782353	0.784989	0.773090
x = 80 mm	0.756496	0.765524	0.774392	0.782446	0.784926	0.772565

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.4	-0.45	-0.5	-0.55	-0.6	-0.65
x = 49 mm	0.853200	0.815700	0.815700	0.703500	0.703500	0.477200
x = 50 mm	0.833548	0.812880	0.758658	0.700326	0.590707	0.468515
x = 51 mm	0.831412	0.808234	0.756180	0.696462	0.590662	0.464174
x = 52 mm	0.828479	0.802774	0.752973	0.692760	0.591764	0.464282
x = 53 mm	0.825003	0.797150	0.749377	0.689308	0.593451	0.467217
x = 54 mm	0.821109	0.791599	0.745499	0.685904	0.594917	0.471545
x = 55 mm	0.816876	0.786172	0.741391	0.682433	0.595725	0.476381
x = 56 mm	0.812371	0.780861	0.737104	0.678845	0.595713	0.481110
x = 57 mm	0.807670	0.775652	0.732683	0.675124	0.594903	0.485314
x = 58 mm	0.802849	0.770537	0.728171	0.671268	0.593409	0.488763
x = 59 mm	0.797985	0.765522	0.723605	0.667286	0.591373	0.491383
x = 60 mm	0.793155	0.760628	0.719026	0.663196	0.588921	0.493193
x = 61 mm	0.788441	0.755890	0.714484	0.659033	0.586158	0.494261
x = 62 mm	0.783933	0.751372	0.710052	0.654867	0.583195	0.494687
x = 63 mm	0.779734	0.747168	0.705850	0.650841	0.580219	0.494657
x = 64 mm	0.775941	0.743385	0.702034	0.647191	0.577590	0.494694

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.4	-0.45	-0.5	-0.55	-0.6	-0.65
x = 65 mm	0.772609	0.740086	0.698708	0.644097	0.575647	0.495489
x = 66 mm	0.769725	0.737239	0.695827	0.641498	0.574278	0.496837
x = 67 mm	0.767223	0.734749	0.693270	0.639238	0.573277	0.498474
x = 68 mm	0.765020	0.732513	0.690922	0.637197	0.572514	0.500245
x = 69 mm	0.763037	0.730444	0.688702	0.635305	0.571919	0.502070
x = 70 mm	0.761209	0.728476	0.686560	0.633530	0.571461	0.503905
x = 71 mm	0.759484	0.726566	0.684471	0.631859	0.571121	0.505727
x = 72 mm	0.757823	0.724685	0.682425	0.630289	0.570886	0.507519
x = 73 mm	0.756194	0.722815	0.680422	0.628819	0.570744	0.509267
x = 74 mm	0.754579	0.720947	0.678465	0.627448	0.570678	0.510958
x = 75 mm	0.752965	0.719082	0.676560	0.626173	0.570676	0.512579
x = 76 mm	0.751348	0.717227	0.674718	0.624992	0.570719	0.514116
x = 77 mm	0.749742	0.715402	0.672955	0.623903	0.570794	0.515552
x = 78 mm	0.748184	0.713652	0.671307	0.622916	0.570882	0.516856
x = 79 mm	0.746763	0.712085	0.669864	0.622071	0.570965	0.517959
x = 80 mm	0.745903	0.711159	0.669037	0.621600	0.571014	0.518565

ตารางผนวกที่ ๔ (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)			
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)		
แนวท่อ	-0.7	-0.75	-0.8
x = 49 mm	0.477200	-	-
x = 50 mm	0.262400	-	-
x = 51 mm	0.295548	-	-
x = 52 mm	0.311653	-	-
x = 53 mm	0.322114	0.006961	-
x = 54 mm	0.331158	0.072566	-
x = 55 mm	0.340276	0.125790	-
x = 56 mm	0.349789	0.165364	-
x = 57 mm	0.359447	0.191625	-
x = 58 mm	0.368799	0.215352	-
x = 59 mm	0.377435	0.236821	-
x = 60 mm	0.385085	0.256060	0.040315
x = 61 mm	0.391604	0.273030	0.081118
x = 62 mm	0.396947	0.287694	0.118276
x = 63 mm	0.401170	0.299991	0.151007
x = 64 mm	0.404754	0.310614	0.177889

ตารางผนวกที่ ๔ (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)			
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)		
แนวท่อ	-0.7	-0.75	-0.8
x = 65 mm	0.409223	0.320257	0.195545
x = 66 mm	0.414384	0.330001	0.209545
x = 67 mm	0.419674	0.339005	0.220849
x = 68 mm	0.424804	0.347116	0.230254
x = 69 mm	0.429660	0.354371	0.238250
x = 70 mm	0.434207	0.360854	0.245142
x = 71 mm	0.438445	0.366657	0.251135
x = 72 mm	0.442382	0.371857	0.256372
x = 73 mm	0.446034	0.376523	0.260953
x = 74 mm	0.449411	0.380709	0.264959
x = 75 mm	0.452525	0.384455	0.268441
x = 76 mm	0.455378	0.387792	0.271434
x = 77 mm	0.457964	0.390729	0.273951
x = 78 mm	0.460258	0.393253	0.275986
x = 79 mm	0.462169	0.395366	0.277518
x = 80 mm	0.463210	0.396423	0.278466

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าความเร็วของของไหลผสมจากการจำลองการไหลโดยใช้อนุภาคผลึกเหลว
ขนาด 100 ไมครอนที่ความเข้มข้น 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลเป็นสารแขวนลอย

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.8	+0.75	+0.7	+0.65	+0.6	+0.55
x = 49 mm	-	-	0.425200	0.661400	0.661400	0.782300
x = 50 mm	-	-	0.501983	0.676485	0.730146	0.784521
x = 51 mm	-	-	0.495636	0.672460	0.731052	0.783555
x = 52 mm	-	-	0.501423	0.663188	0.726866	0.779026
x = 53 mm	-	0.012316	0.509377	0.655355	0.722209	0.773491
x = 54 mm	-	0.129066	0.516043	0.649353	0.718026	0.768042
x = 55 mm	-	0.222681	0.520896	0.644660	0.714290	0.762931
x = 56 mm	-	0.284658	0.524211	0.640786	0.710820	0.758133
x = 57 mm	-	0.314134	0.526323	0.637382	0.707462	0.753570
x = 58 mm	-	0.337435	0.527470	0.634202	0.704116	0.749173
x = 59 mm	-	0.355946	0.527795	0.631065	0.700716	0.744894
x = 60 mm	0.062184	0.370591	0.527357	0.627833	0.697225	0.740718
x = 61 mm	0.120632	0.381977	0.526157	0.624405	0.693642	0.736665
x = 62 mm	0.169703	0.390481	0.524172	0.620735	0.690024	0.732818
x = 63 mm	0.209428	0.396211	0.521402	0.616922	0.686563	0.729364
x = 64 mm	0.238624	0.400558	0.518376	0.613565	0.683706	0.726604

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.8	+0.75	+0.7	+0.65	+0.6	+0.55
x = 65 mm	0.254011	0.404711	0.516925	0.611392	0.681799	0.724724
x = 66 mm	0.264924	0.408866	0.516234	0.609711	0.680478	0.723529
x = 67 mm	0.272776	0.412367	0.515710	0.608016	0.679316	0.722721
x = 68 mm	0.278554	0.415269	0.515213	0.606154	0.678072	0.722086
x = 69 mm	0.282856	0.417755	0.514734	0.604121	0.676632	0.721489
x = 70 mm	0.286151	0.419862	0.514297	0.601963	0.674956	0.720853
x = 71 mm	0.288804	0.421596	0.513914	0.599752	0.673053	0.720123
x = 72 mm	0.291024	0.423045	0.513601	0.597563	0.670949	0.719257
x = 73 mm	0.292932	0.424309	0.513377	0.595446	0.668678	0.718242
x = 74 mm	0.294619	0.425455	0.513245	0.593437	0.666286	0.717076
x = 75 mm	0.296149	0.426528	0.513199	0.591563	0.663819	0.715762
x = 76 mm	0.297566	0.427557	0.513227	0.589841	0.661323	0.714309
x = 77 mm	0.298893	0.428552	0.513312	0.588285	0.658846	0.712738
x = 78 mm	0.300118	0.429496	0.513440	0.586911	0.656447	0.711087
x = 79 mm	0.301165	0.430394	0.513582	0.585765	0.654244	0.709457
x = 80 mm	0.301837	0.430761	0.513639	0.585116	0.652929	0.708415

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.5	+0.45	+0.4	+0.35	+0.3	+0.25
x = 49 mm	0.782300	0.827600	0.827600	0.829800	0.829800	0.814100
x = 50 mm	0.805946	0.827275	0.828335	0.829117	0.821313	0.813447
x = 51 mm	0.805120	0.825559	0.826794	0.827371	0.819677	0.811871
x = 52 mm	0.801870	0.822013	0.823845	0.824443	0.817012	0.809376
x = 53 mm	0.797448	0.817319	0.819863	0.820577	0.813490	0.806097
x = 54 mm	0.792700	0.812137	0.815316	0.816119	0.809378	0.802242
x = 55 mm	0.787952	0.806829	0.810517	0.811350	0.804913	0.798014
x = 56 mm	0.783292	0.801552	0.805642	0.806452	0.800271	0.793577
x = 57 mm	0.778724	0.796374	0.800784	0.801539	0.795577	0.789055
x = 58 mm	0.774243	0.791326	0.795999	0.796691	0.790920	0.784548
x = 59 mm	0.769850	0.786435	0.791338	0.791973	0.786378	0.780138
x = 60 mm	0.765568	0.781739	0.786856	0.787451	0.782022	0.775901
x = 61 mm	0.761450	0.777299	0.782622	0.783199	0.777927	0.771914
x = 62 mm	0.757599	0.773210	0.778732	0.779305	0.774178	0.768256
x = 63 mm	0.754183	0.769610	0.775303	0.775867	0.770856	0.764998
x = 64 mm	0.751418	0.766645	0.772445	0.772969	0.768029	0.762197

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.5	+0.45	+0.4	+0.35	+0.3	+0.25
x = 65 mm	0.749419	0.764387	0.770209	0.770646	0.765726	0.759878
x = 66 mm	0.748081	0.762766	0.768550	0.768868	0.763924	0.758027
x = 67 mm	0.747205	0.761637	0.767366	0.767553	0.762563	0.756596
x = 68 mm	0.746617	0.760858	0.766540	0.766609	0.761568	0.755522
x = 69 mm	0.746199	0.760317	0.765976	0.765946	0.760863	0.754741
x = 70 mm	0.745868	0.759933	0.765596	0.765492	0.760385	0.754201
x = 71 mm	0.745568	0.759648	0.765345	0.765194	0.760082	0.753850
x = 72 mm	0.745268	0.759428	0.765188	0.765015	0.759915	0.753651
x = 73 mm	0.744952	0.759255	0.765099	0.764925	0.759854	0.753570
x = 74 mm	0.744610	0.759117	0.765065	0.764907	0.759874	0.753585
x = 75 mm	0.744236	0.759007	0.765076	0.764946	0.759962	0.753676
x = 76 mm	0.743828	0.758923	0.765127	0.765035	0.760103	0.753828
x = 77 mm	0.743390	0.758871	0.765221	0.765169	0.760291	0.754031
x = 78 mm	0.742938	0.758860	0.765358	0.765344	0.760514	0.754270
x = 79 mm	0.742515	0.758903	0.765534	0.765545	0.760756	0.754528
x = 80 mm	0.742229	0.758934	0.765658	0.765691	0.760933	0.754721

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.2	+0.15	+0.1	+0.05	0	-0.05
x = 49 mm	0.814100	0.798600	0.798600	0.794200	0.794200	0.804500
x = 50 mm	0.805682	0.798021	0.795749	0.793649	0.798708	0.803934
x = 51 mm	0.804137	0.796608	0.794299	0.792301	0.797290	0.802575
x = 52 mm	0.801743	0.794404	0.792094	0.790216	0.795152	0.800500
x = 53 mm	0.798617	0.791515	0.789233	0.787493	0.792394	0.797815
x = 54 mm	0.794933	0.788085	0.785849	0.784255	0.789135	0.794640
x = 55 mm	0.790870	0.784271	0.782084	0.780636	0.785501	0.791096
x = 56 mm	0.786580	0.780214	0.778069	0.776760	0.781611	0.787298
x = 57 mm	0.782188	0.776033	0.773921	0.772740	0.777573	0.783349
x = 58 mm	0.777797	0.771831	0.769743	0.768676	0.773485	0.779345
x = 59 mm	0.773492	0.767695	0.765622	0.764658	0.769435	0.775372
x = 60 mm	0.769353	0.763705	0.761639	0.760767	0.765504	0.771511
x = 61 mm	0.765456	0.759936	0.757869	0.757078	0.761768	0.767836
x = 62 mm	0.761873	0.756459	0.754380	0.753657	0.758293	0.764416
x = 63 mm	0.758670	0.753335	0.751231	0.750561	0.755136	0.761306
x = 64 mm	0.755895	0.750607	0.748463	0.747832	0.752338	0.758549

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	+0.2	+0.15	+0.1	+0.05	0	-0.05
x = 65 mm	0.753572	0.748296	0.746097	0.745491	0.749922	0.756169
x = 66 mm	0.751688	0.746398	0.744131	0.743538	0.747890	0.754169
x = 67 mm	0.750209	0.744886	0.742543	0.741956	0.746225	0.752533
x = 68 mm	0.749084	0.743722	0.741297	0.740709	0.744897	0.751232
x = 69 mm	0.748257	0.742857	0.740348	0.739757	0.743868	0.750229
x = 70 mm	0.747678	0.742243	0.739651	0.739058	0.743099	0.749484
x = 71 mm	0.747299	0.741835	0.739166	0.738573	0.742550	0.748958
x = 72 mm	0.747081	0.741595	0.738855	0.738264	0.742186	0.748618
x = 73 mm	0.746993	0.741492	0.738687	0.738101	0.741977	0.748434
x = 74 mm	0.747009	0.741499	0.738636	0.738059	0.741898	0.748380
x = 75 mm	0.747109	0.741595	0.738681	0.738117	0.741927	0.748435
x = 76 mm	0.747276	0.741764	0.738804	0.738256	0.742048	0.748584
x = 77 mm	0.747497	0.741990	0.738990	0.738460	0.742243	0.748810
x = 78 mm	0.747758	0.742256	0.739220	0.738713	0.742495	0.749096
x = 79 mm	0.748038	0.742544	0.739477	0.738994	0.742783	0.749419
x = 80 mm	0.748250	0.742765	0.739681	0.739215	0.743011	0.749667

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35
x = 49 mm	0.804500	0.826200	0.826200	0.848400	0.848400	0.853200
x = 50 mm	0.814692	0.825537	0.836596	0.847549	0.850018	0.852029
x = 51 mm	0.813219	0.824027	0.834984	0.845744	0.848205	0.849762
x = 52 mm	0.811017	0.821778	0.832608	0.843164	0.845616	0.846704
x = 53 mm	0.808203	0.818922	0.829624	0.839989	0.842465	0.843114
x = 54 mm	0.804902	0.815588	0.826172	0.836367	0.838905	0.839145
x = 55 mm	0.801237	0.811895	0.822373	0.832415	0.835041	0.834891
x = 56 mm	0.797317	0.807948	0.818328	0.828229	0.830957	0.830422
x = 57 mm	0.793246	0.803843	0.814131	0.823894	0.826729	0.825804
x = 58 mm	0.789117	0.799671	0.809866	0.819491	0.822429	0.821106
x = 59 mm	0.785016	0.795516	0.805618	0.815100	0.818131	0.816398
x = 60 mm	0.781025	0.791460	0.801465	0.810803	0.813912	0.811755
x = 61 mm	0.777222	0.787578	0.797488	0.806678	0.809852	0.807257
x = 62 mm	0.773674	0.783946	0.793762	0.802809	0.806034	0.802993
x = 63 mm	0.770444	0.780627	0.790355	0.799269	0.802542	0.799053
x = 64 mm	0.767575	0.777669	0.787322	0.796120	0.799445	0.795521

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.1	-0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35
x = 65 mm	0.765092	0.775102	0.784692	0.793397	0.796782	0.792440
x = 66 mm	0.763000	0.772929	0.782469	0.791102	0.794553	0.789806
x = 67 mm	0.761282	0.771135	0.780631	0.789209	0.792723	0.787571
x = 68 mm	0.759907	0.769686	0.779143	0.787673	0.791240	0.785668
x = 69 mm	0.758838	0.768542	0.777958	0.786446	0.790045	0.784028
x = 70 mm	0.758032	0.767661	0.777033	0.785476	0.789084	0.782589
x = 71 mm	0.757451	0.767003	0.776324	0.784720	0.788309	0.781302
x = 72 mm	0.757059	0.766532	0.775796	0.784141	0.787680	0.780123
x = 73 mm	0.756826	0.766218	0.775418	0.783708	0.787166	0.779020
x = 74 mm	0.756726	0.766037	0.775167	0.783397	0.786740	0.777967
x = 75 mm	0.756740	0.765969	0.775024	0.783191	0.786386	0.776945
x = 76 mm	0.756851	0.765999	0.774977	0.783079	0.786090	0.775944
x = 77 mm	0.757043	0.766114	0.775016	0.783055	0.785848	0.774965
x = 78 mm	0.757301	0.766301	0.775134	0.783118	0.785666	0.774029
x = 79 mm	0.757600	0.766535	0.775309	0.783254	0.785550	0.773183
x = 80 mm	0.757829	0.766720	0.775450	0.783360	0.785476	0.772659

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.4	-0.45	-0.5	-0.55	-0.6	-0.65
x = 49 mm	0.853200	0.815700	0.815700	0.703500	0.703500	0.477200
x = 50 mm	0.833600	0.812819	0.758740	0.700480	0.590894	0.468589
x = 51 mm	0.831526	0.808136	0.756343	0.696827	0.590992	0.464250
x = 52 mm	0.828636	0.802667	0.753192	0.693287	0.592167	0.464293
x = 53 mm	0.825173	0.797056	0.749637	0.689927	0.593866	0.467140
x = 54 mm	0.821266	0.791533	0.745794	0.686558	0.595300	0.471383
x = 55 mm	0.817003	0.786139	0.741719	0.683081	0.596047	0.476144
x = 56 mm	0.812463	0.780864	0.737460	0.679462	0.595962	0.480808
x = 57 mm	0.807727	0.775688	0.733061	0.675694	0.595076	0.484958
x = 58 mm	0.802874	0.770606	0.728561	0.671784	0.593513	0.488367
x = 59 mm	0.797984	0.765622	0.724001	0.667744	0.591415	0.490961
x = 60 mm	0.793134	0.760755	0.719420	0.663596	0.588908	0.492759
x = 61 mm	0.788404	0.756042	0.714867	0.659374	0.586098	0.493825
x = 62 mm	0.783886	0.751546	0.710418	0.655150	0.583093	0.494255
x = 63 mm	0.779680	0.747360	0.706192	0.651067	0.580079	0.494232
x = 64 mm	0.775884	0.743593	0.702349	0.647361	0.577419	0.494279

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)						
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)					
แนวท่อ	-0.4	-0.45	-0.5	-0.55	-0.6	-0.65
x = 65 mm	0.772553	0.740307	0.698993	0.644217	0.575454	0.495092
x = 66 mm	0.769673	0.737471	0.696082	0.641574	0.574072	0.496470
x = 67 mm	0.767179	0.734989	0.693495	0.639277	0.573072	0.498148
x = 68 mm	0.764985	0.732757	0.691117	0.637208	0.572318	0.499966
x = 69 mm	0.763012	0.730687	0.688867	0.635294	0.571742	0.501838
x = 70 mm	0.761194	0.728714	0.686697	0.633505	0.571308	0.503719
x = 71 mm	0.759478	0.726795	0.684584	0.631827	0.570997	0.505583
x = 72 mm	0.757825	0.724901	0.682517	0.630257	0.570793	0.507411
x = 73 mm	0.756204	0.723016	0.680497	0.628793	0.570682	0.509189
x = 74 mm	0.754595	0.721133	0.678528	0.627433	0.570648	0.510903
x = 75 mm	0.752986	0.719251	0.676617	0.626174	0.570675	0.512540
x = 76 mm	0.751376	0.717382	0.674774	0.625013	0.570749	0.514089
x = 77 mm	0.749778	0.715544	0.673016	0.623947	0.570852	0.515531
x = 78 mm	0.748229	0.713785	0.671377	0.622985	0.570967	0.516839
x = 79 mm	0.746822	0.712212	0.669947	0.622166	0.571073	0.517942
x = 80 mm	0.745974	0.711286	0.669131	0.621710	0.571134	0.518544

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)			
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)		
แนวท่อ	-0.7	-0.75	-0.8
x = 49 mm	0.477200	-	-
x = 50 mm	0.262116	-	-
x = 51 mm	0.294608	-	-
x = 52 mm	0.310435	-	-
x = 53 mm	0.320831	0.006856	-
x = 54 mm	0.329924	0.071531	-
x = 55 mm	0.339142	0.124147	-
x = 56 mm	0.348769	0.163566	-
x = 57 mm	0.358531	0.190058	-
x = 58 mm	0.367970	0.213979	-
x = 59 mm	0.376679	0.235601	-
x = 60 mm	0.384391	0.254957	0.040007
x = 61 mm	0.390963	0.272014	0.080540
x = 62 mm	0.396350	0.286744	0.117473
x = 63 mm	0.400610	0.299085	0.150008
x = 64 mm	0.404227	0.309738	0.176715

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

ความเร็วของของไหลผสม (เมตร/วินาที)			
ตำแหน่งตาม	ตำแหน่งตามหน้าตัดท่อ (มม.)		
แนวท่อ	-0.7	-0.75	-0.8
x = 65 mm	0.408734	0.319391	0.194214
x = 66 mm	0.413944	0.329130	0.208009
x = 67 mm	0.419284	0.338105	0.219074
x = 68 mm	0.424456	0.346163	0.228220
x = 69 mm	0.429343	0.353345	0.235944
x = 70 mm	0.433909	0.359742	0.242561
x = 71 mm	0.438152	0.365445	0.248279
x = 72 mm	0.442084	0.370537	0.253246
x = 73 mm	0.445719	0.375089	0.257565
x = 74 mm	0.449070	0.379157	0.261319
x = 75 mm	0.452149	0.382784	0.264561
x = 76 mm	0.454960	0.385999	0.267327
x = 77 mm	0.457501	0.388817	0.269628
x = 78 mm	0.459748	0.391240	0.271448
x = 79 mm	0.461611	0.393268	0.272776
x = 80 mm	0.462617	0.394259	0.273589

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายชลธิศ บำรุงวัด
วัน เดือน ปี ที่เกิด	20 มกราคม พ.ศ. 2530
สถานที่เกิด	เขตพญาไท จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (เครื่องกล) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-