

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของของไหลในอ้อย
(Numerical Study of a Flow Inside Sugarcane)

นางสาวกัญญารัตน์ ศรีคำภา รหัส 58362018
นางสาวชญานิศ เรณูมัลย์ รหัส 58362131
นางสาวสุรีพร มหาวี รหัส 58362919

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2561



ใบรับรองโครงการงาน

หัวข้อโครงการงาน	การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของของไหลในอ้อย		
	Numerical Study of a Flow Inside Sugarcane		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นางสาวกัญญารัตน์	ศรีคำภา	รหัสสถิติ 58362018
	นางสาวชฎานิศ	เรณูมัลย์	รหัสสถิติ 58362131
	นางสาวสุรีพร	มหาวี	รหัสสถิติ 58362919
ที่ปรึกษาโครงการงาน ภาควิชา	รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษยา กนกजारูวิจิตร วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2561		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการงาน

.....ที่ปรึกษาโครงการงาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษยา กนกजारูวิจิตร)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนา การุญบุญญานันท์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

หัวข้อโครงการ : การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของของไหลในอ้อย

ผู้ดำเนินโครงการ : นางสาวกัญญารัตน์ ศรีคำภา รหัสนิต 58362018
 นางสาวชญาณี เรณูมาลย์ รหัสนิต 58362131
 นางสาวสุรีพร มหาวี รหัสนิต 58362919

ที่ปรึกษาโครงการ : รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษยา กนกจารุจิตร

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของของไหลในอ้อย เพื่อหาเวลาที่ของไหลใช้ในการเคลื่อนที่จากทางเข้าถึงบริเวณทางออก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดให้ท่อนอ้อยมีความยาว 50 mm ให้ของไหลที่ทำงานเป็นน้ำ ใช้ผลต่างความดัน (Δp) ในการขับเคลื่อนการไหล ซึ่งผลต่างความดันที่ทางเข้า และทางออกมีค่าเท่ากับ 1 atm การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) โดยเลือกท่อหน้าตัดของท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อนอ้อยจากงานวิจัยของ Cruz และคณะ [1] ภายใต้ข้อจำกัดความสามารถในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ และเป็นท่อที่ให้ Reynolds number มากกว่า 1 สำหรับท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.068 mm จะแสดงผลการคำนวณในรูปแบบของการกระจายความเร็ว (Velocity distribution) อัตราเฉือน (Shear rate) ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress, WSS หรือ τ_w) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction factor, f) ซึ่งสัมประสิทธิ์ความเสียดทานนี้จะปารามิเตอร์ที่นำมาแสดงผลทั้งที่สภาวะไม่คงที่ และที่สภาวะคงที่ พบว่า ที่ $t = 1.7$ ms ค่าอัตราเฉือนเฉลี่ยจะเริ่มลู่เข้าสู่ค่าหนึ่ง และให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 1.065 ในขณะที่สภาวะคงที่ $f = 1.063$ ซึ่งมีค่าแตกต่างเท่ากับ 0.19 % เมื่อพิจารณาท่อหน้าตัดไม่กลมที่มีขนาด D_n เท่ากับ 0.033, 0.0333, 0.0364 และ 0.0492 mm ซึ่งจะทำให้การคำนวณเช่นเดียวกับท่อหน้าตัดกลม พบว่า ที่สภาวะไม่คงที่อัตราเฉือนจะเริ่มลู่เข้าสู่ค่าหนึ่งที่ $t = 0.4, 0.4, 0.5$ และ 0.8 ms ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเมื่อเทียบกับที่สภาวะคงที่เท่ากับ 0.421, 0.259, 1.69 และ 0.77% ตามลำดับ

Project Title : Numerical Study of a Flow Inside Sugarcane

Name : Ms. Kanyarat Srikampa ID : 58362018
Ms. Chayanit Renumarn ID : 58362131
Ms. Sureeporn Mahawee ID : 58362919

Project Advisor : Assoc. Prof. Dr. Koonlaya Kanokjaruvijit

Academic Year : 2018

Abstract

This project is to numerically study fluid flow in a sugarcane to find the time that the fluid used to move from the entry to the exit by using the finite element method. The length of the sugarcane was fixed at 50 mm. Water was the working fluid, and the flow was caused by pressure difference (Δp), which was equal to 1 atm between the entrance and the exit. The flow was laminar. Cross-sections of the sugarcane phloems were selected from the work of Cruz et al. [1] under the conditions of the Reynolds number greater than 1 and sufficient computation memory. Starting with a circular cross section of diameter of 0.068 mm, the results in terms of velocity distribution, shear rate, wall shear stress (WSS or τ_w) and friction factor (f) as the final output were reported for both unsteady and steady conditions. At $t = 1.7$ ms, the shear rate started to converge and gave the friction factor of 1.065. However, the steady state condition also gave $f = 1.063$, which is 0.19% different from that of the aforementioned unsteady state. Irregular cross-sectional shapes of the phloems of hydraulic diameters of 0.033, 0.0333, 0.0364 and 0.0492 mm were tested in the similar manner to the circular one. The unsteady conditions also provided converged values at $t = 0.4, 0.4, 0.5$ and 0.8 ms, respectively, giving the percentage differences from the steady condition by 0.421, 0.259, 1.69 and 0.77%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงานต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนถึงติดตามผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้แก่ผู้ดำเนินงานขอขอบคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงการ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.รัตนา การุญบุญญานันท์ และ ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว ที่ได้สละเวลามาเป็นคณะกรรมการ สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินงานขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่านที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และถ้าเกิดผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ผู้ดำเนินการต้องขอกราบอภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวกัญญารัตน์ ศรีคำภา

นางสาวชฎานิศ เรณูมาลย์

นางสาวสุรีพร มหาวี

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
ลำดับสัญลักษณ์	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	7
1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์	8
2.1 ทฤษฎี	8
2.2 วรรณกรรมปริทัศน์	11
บทที่ 3 วิธีการคำนวณ	16
3.1 สมการควบคุม (Governing Equation)	17
3.2 การสร้างโดเมนการคำนวณและกำหนดสภาวะขอบเขต	18
3.3 การสร้างเมช	19
3.4 การเปรียบเทียบผล (Validation)	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการคำนวณ	26
4.1 ท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลม	27
4.2 ท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลม	32
บทที่ 5 สรุปผลการคำนวณ	49
สรุปผลการคำนวณ	49
เอกสารอ้างอิง	50
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	52



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน	6
ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่าตอบเมื่อความหนาแน่นของเมซ ในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไปของท่อ $D = 0.033 \text{ mm}$	21
ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่าตอบเมื่อความหนาแน่นของเมซ ในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไปของท่อ $D = 0.068 \text{ mm}$	22
ตารางที่ 3.3 สรุปแบบจำลองที่เลือกใช้ของความหนาแน่นของเมซในโดเมนการคำนวณ ของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม้กลม	22
ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบจาก FEM และสมการ Hagan-Poiseuille ของท่อขนาด 0.033 mm	24
ตารางที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบจาก FEM และสมการ Hagan-Poiseuille ของท่อขนาด 0.068 mm	24
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลม	32
ตารางที่ 4.2 การหาความแตกต่างของค่าอัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาใกล้เคียงกัน	36
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดบนโปรไฟล์ความเร็ววัดที่ $z = 25 \text{ mm}$	41
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้นเฉือนที่ผนังที่ ตำแหน่งต่าง ๆ	46
ตารางที่ 4.5 สรุปผลการคำนวณของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลม	48

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการคำนวณ	4
รูปที่ 1.2 การเลือกหน้าตัดของท่อน้ำเลี้ยงของอ้อยจากรูปถ่ายของ Cruz และคณะ [1]	5
รูปที่ 2.1 แบบจำลองการไหลของ Jong และคณะ	15
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการคำนวณท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อนอ้อยโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์ เอลิเมนต์	16
รูปที่ 3.2 Extrude หน้าตัดท่อที่เลือกพิจารณาให้มีความยาว 50 mm	19
รูปที่ 3.3 Lagrange element สำหรับรูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยมหรือ Tetrahedron	19
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณจาก FEM กับ Hagan-Poiseuille ของท่อขนาด เท่ากับ 0.03 mm	25
รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณจาก FEM กับ Hagan-Poiseuille ของท่อขนาด เท่ากับ 0.068 mm	25
รูปที่ 4.1 แผนภาพของเนื้อหาโดยรวมในบทที่ 4	26
รูปที่ 4.2 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดกลม	28
รูปที่ 4.3 โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity Profile) และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อหน้าตัดกลมที่ตำแหน่ง $z = 25$ mm ด้วยการคำนวณ ที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 1.7$ ms) และ ที่สภาวะคงที่ (Steady State)	29
รูปที่ 4.4 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการ คำนวณที่สภาวะ ไม่คงที่ ($t = 1.7$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	30
รูปที่ 4.5 รูปหน้าตัดของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลม	33
รูปที่ 4.6 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.033 mm	34
รูปที่ 4.7 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0333 mm	34
รูปที่ 4.8 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0364 mm	35
รูปที่ 4.9 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0492 mm	35

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 โปรไฟล์ความเร็ว และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงขนาด 0.033 mm ที่ $z = 25$ mm ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	37
รูปที่ 4.11 โปรไฟล์ความเร็ว และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงขนาด 0.0333 mm ที่ $z = 25$ mm ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	38
รูปที่ 4.12 โปรไฟล์ความเร็ว และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงขนาด 0.0364 mm ที่ $z = 25$ mm ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.5$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	39
รูปที่ 4.13 โปรไฟล์ความเร็ว และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงขนาด 0.0492 mm ที่ $z = 25$ mm ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.8$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	40
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.033 mm ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	42
รูปที่ 4.15 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0333 mm ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	43
รูปที่ 4.16 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0364 mm ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.5$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	44
รูปที่ 4.17 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0492 mm ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.8$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)	45

ลำดับสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัดท่อ
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
L	ความยาวของท่อ
L_e	Entrance length
p	ความดันของของไหล
P	เส้นรอบรูปของหน้าตัดท่อ
\dot{Q}	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล
σ	แรงตึงผิว หรือ Surface Tension (N/m)
t	เวลา
u	องค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกน x
v	องค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกน y
v	ความเร็วของของไหล
\bar{v}	ความเร็วเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัด
w	องค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกน z
ρ	ความหนาแน่น
μ	ความหนืดพลวัต
Δp	ผลต่างความดัน
γ_{av}	อัตราเฉือนเฉลี่ย
τ_w	ความเค้นเฉือนที่ผนัง
$\bar{\tau}_w$	ความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่ผนัง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากในปัจจุบันอ้อยเป็นพืชชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในด้านเศรษฐกิจซึ่งประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลเป็นอันดับที่ 2 รองจากบราซิล [2] ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดโรคจากน้ำตาทราย (สอน.) [3] แนะนำให้เกษตรกรแช่ท่อนพันธุ์อ้อยในสารเคมีกำจัดโรคพืช และสำหรับโรคเหี่ยวเน่าแดงนั้น แนะนำให้เกษตรกรแช่ท่อนพันธุ์อ้อยในสารกำจัดเชื้อราเบนโนมิล (Benomyl) 50% wettable powder โดยผสมในอัตราส่วน 20 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตรในถังเปิดขนาดใหญ่เป็นเวลา 30 นาทีก่อนปลูก หรือพ่นสารดังกล่าวเดือนละครั้งบริเวณโคนอ้อย แต่ทั้งนี้ยังไม่มีข้อมูลที่แน่ชัดว่าการแช่ท่อนพันธุ์อ้อยในสารกำจัดเชื้อราเบนโนมิลเป็นเวลา 30 นาทีนั้น จะทำให้สารกำจัดเชื้อราสามารถซึมผ่านตลอดทั้งท่อนพันธุ์อ้อย ดังนั้นเราจึงศึกษาลักษณะการไหลภายในท่อนพันธุ์อ้อย เพื่อหาเวลาที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านตลอดทั้งท่อนพันธุ์อ้อย และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเครื่องอัดยาฆ่าเชื้อราของท่อนพันธุ์อ้อย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาเปรียบเทียบวิธีเชิงตัวเลขของการไหลภายในท่อนส่งน้ำเลี้ยงของท่อนพันธุ์อ้อย
2. คำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านท่อนส่งน้ำเลี้ยงของท่อนพันธุ์อ้อย

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. โดเมนการคำนวณเป็น 3 มิติโดยที่แต่ละโดเมนเป็นท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อนพันธุ์อ้อย ซึ่งได้มาจากภาพถ่ายขนาดกำลังขยาย 750 เท่าของ Cruz และคณะ [1]
2. เลือกท่อส่งน้ำเลี้ยงเฉพาะท่อที่เห็นได้ชัดเจนจากรูปของ Cruz และคณะ [1] การไหลอยู่ในสถานะไม่คงที่ (Unsteady state)
3. เลือกขนาดของท่อที่ให้ Reynolds number มากกว่า 1
4. พื้นผิวของแต่ละท่อไม่ลื่นไหล (No-Slip Wall)
5. การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) และการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)
6. อาศัยผลต่างของความดัน (Δp) ในการขับเคลื่อนการไหล
7. ใช้ของเหลวที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำที่ $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นของไหลทำงาน
8. Specification ของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในโครงการนี้ CPU: Intel core i7-4720hq 3.6 GHz, RAM 8 GB และการ์ดจอ NVIDIA GeForce GTX 950M 4GB

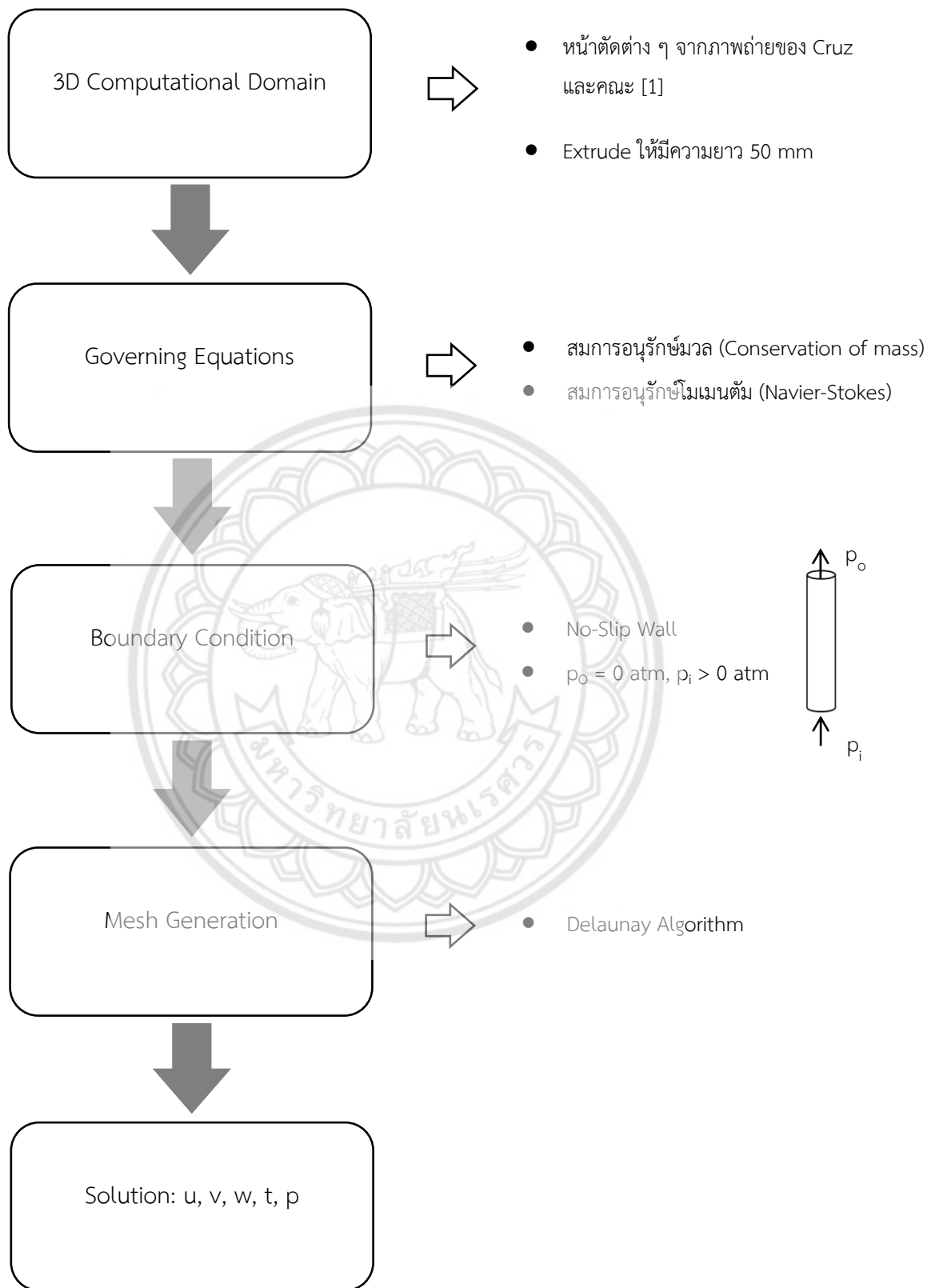
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

รูปที่ 1.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการนี้ โดยเริ่มจากการสร้างโดเมนการคำนวณจากรูปหน้าตัดของอ้อยของ Cruz และคณะ [1] ซึ่งเป็นรูปขยายขนาด 750 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (a) จากนั้นเลือกพิจารณาท่อที่โปรแกรมสามารถมองเห็นใน 2 มิติได้ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (b) แล้วจึงปรับรูปให้เป็นขนาดจริงโดยอาศัยโปรแกรม SolidWorks แล้วทำการคำนวณหา Hydraulic Diameter (D_h) ของแต่ละท่อ ดังแสดงในสมการที่ (2.5) พบว่า D_h ที่คำนวณได้จากรูปข้างต้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0038 ถึง 0.068 mm ซึ่งเราเลือกพิจารณาเฉพาะท่อที่มี $D_h \geq 0.03\text{ mm}$

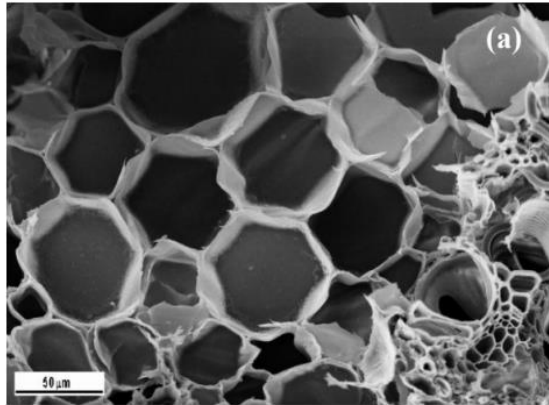
เพราะเราต้องการท่อที่ให้ Reynolds number มากกว่า 1 ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (c) แล้วสุดท้ายจึงทำการ Extrude หน้าตัดท่อที่เลือกให้มีความยาว 50 mm

เนื่องจากเราต้องการคำนวณหาเวลาในการที่ของเหลวเคลื่อนที่ในท่อ เราจึงกำหนดให้การไหลอยู่ที่สภาวะไม่คงที่ (Unsteady state) เป็นแบบ 3 มิติ และสมการที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล ดังแสดงในสมการที่ (2.1) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ดังแสดงในสมการที่ (2.2), (2.3) และ (2.4) โดยที่กำหนดการไหลภายในท่อเกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างของความดัน (Δp) จากนั้นกำหนดสภาวะขอบเขตให้แต่ละท่อ โดยกำหนดให้ผนังท่อเป็นแบบไม่ลื่นไหล (No-Slip) ในการสร้างเมชนั้นจะสร้างด้วยวิธีการ Delaunay Algorithm แล้วจึงใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL ในการคำนวณหาความเร็ว (u, v, w) ความดัน (p) และเวลา (t) ในการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในท่อ

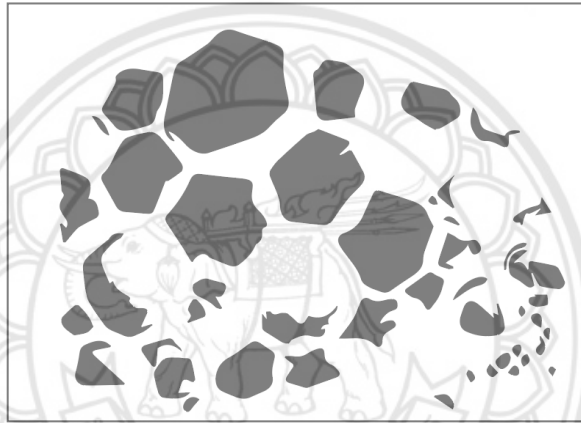




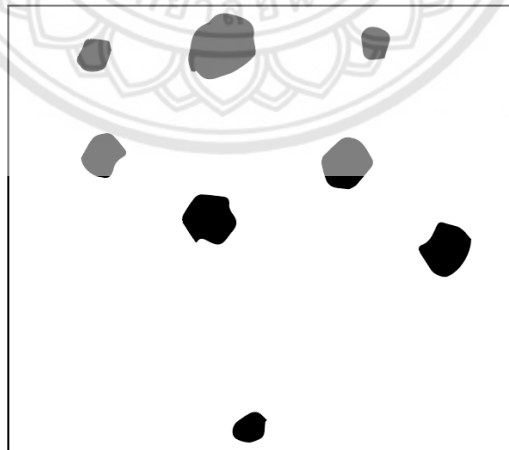
รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการคำนวณ



(a) หน้าตัดของท่อน้ำเลี้ยงที่กำลังขยาย 750 เท่า



(b) หน้าตัดของท่อน้ำเลี้ยงที่โปรแกรมสามารถมองเห็นใน 2 มิติ



(c) หน้าตัดของท่อน้ำเลี้ยงที่นำมาวิเคราะห์

รูปที่ 1.2 การเลือกหน้าตัดของท่อน้ำเลี้ยงของอ้อยจากรูปถ่ายของ Cruz และคณะ [1]

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเครื่องอัดยาฆ่าเชื้อราของท่อนพันธุ์อ้อย โดยอาศัยผลต่าง
ความดัน เช่น เวลาที่ใช้ในการเดินทางของน้ำยาและความดันที่ทางเข้าและทางออกของท่อนพันธุ์อ้อย

1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1. กระดาษ 1,000 บาท
2. จัดทำรูปเล่ม 1,000 บาท
3. ค่าอุปกรณ์อื่น ๆ 1,000 บาท



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมปริทัศน์

2.1 ทฤษฎี

2.1.1. สมการควบคุม (Governing Equations)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลของของไหลที่สภาวะไม่คงที่ (Unsteady state) เทียบกับเวลา เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) และมีการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ผ่านท่อ 3 มิติ สมการที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier-Stokes Equations)

x-component:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \rho g_x \quad (2.2)$$

y-component:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \rho g_y \quad (2.3)$$

z-component:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g_z \quad (2.4)$$

เมื่อ u, v, w คือ องค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกน x, y, z ตามลำดับ

x, y, z คือ พิกัดตามแกนอ้างอิง

p คือ ความดันของของไหล (Pa)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

μ คือ ความหนืดพลวัต (Pa-s)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

2.1.1. Hydraulic Diameter

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter, D_h) มีความสำคัญสำหรับท่อที่มีรูปร่างหน้าตัดไม่กลม และไม่เป็นรูปทรงเรขาคณิต เพื่อให้สามารถใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ เช่นเดียวกับหน้าตัดกลม สามารถคำนวณได้จาก

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2.5)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ (m^2)

P คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัดท่อ (m)

2.1.2. เลขเรย์โนลด์ (Reynold number)

เลขเรย์โนลด์ (Reynold Number, Re) เป็นตัวแปรไร้มิติที่มีความสำคัญขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ตัว ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) ความหนืดพลวัต (μ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) และความเร็วเฉลี่ยในการไหล (\bar{v}) เขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็น

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D_h}{\mu} \quad (2.6)$$

เมื่อ \bar{v} คือ ความเร็วเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัด (m/s)

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

μ คือ ความหนืดพลวัต (Pa-s)

โดยที่การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ภายในท่อจะมีเลขเรย์โนลด์ไม่เกิน 2300

2.1.1. สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) จะอาศัยผลของความเร็วจเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัด (\bar{v}) และความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่ผนัง ($\bar{\tau}_w$) ในการคำนวณ สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f = \Delta p \frac{2D_h}{\rho(\bar{v})^2 L} \quad (2.7)$$

หรือ

$$f = \frac{8\bar{\tau}_w}{\rho(\bar{v})^2} \quad (2.8)$$

เมื่อ Δp คือ ผลต่างความดัน (Pa)

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)

\bar{v} คือ ความเร็วเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัด (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

$\bar{\tau}_w$ คือ ความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่ผนัง (Pa)

L คือ ความยาวของท่อ (m)

2.2 วรรณกรรมปริทัศน์

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย [3] ได้ทำการศึกษาโรคเหี่ยวเน่าแดงที่เกิดจากเชื้อรา 2 ชนิดได้แก่ *Fusarium moniliforme* และ *Colletotrichum falcatum* ในสภาพอากาศชื้น เชื้อราจะสร้างสปอร์บริเวณรอบ ๆ ข้ออ้อย โดยสปอร์ของเชื้อราจะกระจายไปตามลมและฝน ส่งผลให้มีการระบาดของเชื้อรา อ้อยที่ติดโรคจะมีลักษณะเปลือกภายนอกเป็นรอยแผลสีน้ำตาล ใบเหลืองยอดแห้ง เมื่อผ่าลำอ้อย พบว่าเนื้ออ้อยภายในกลายเป็นสีแดงปนม่วง และสีเทา หากอาการของโรคมีความรุนแรงจะพบเนื้ออ้อยเน่าจนยุบเป็นโพรง ดังนั้นก่อนปลูกอ้อยจึงได้แนะนำให้เกษตรกรทำการแช่ท่อนพันธุ์อ้อยในสารกำจัดเชื้อราเบนอิมิล (Benomyl) 50% wettable powder โดยผสมในอัตราส่วน 20 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตรในถังเปิดขนาดใหญ่เป็นเวลา 30 นาทีก่อนปลูก หรือพ่นสารดังกล่าวบริเวณโคนอ้อย เดือนละครั้งในช่วงที่อ้อยมีอายุระหว่าง 1 ถึง 5 เดือน เพื่อลดความรุนแรงของโรคเหี่ยวเน่าแดง

เนื่องจากในโครงการนี้เราจะพิจารณาการไหลผ่านท่อน้ำเลี้ยงของท่อนอ้อยที่ละท่อ โดยที่แต่ละท่อมีรูปร่างของหน้าตัดไม่กลม และไม่เป็นที่ตรงเรขาคณิต ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Diameter) จึงมีความสำคัญ ด้วยเหตุนี้เองเราจึงทำการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการไหลเนื่องจากผลต่างความดัน (Δp) ผ่านท่อรูปร่างไม่กลม

Jiang และคณะ [4] ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำในท่อขนาดไมโครที่มีขนาด และรูปร่างของหน้าตัดต่าง ๆ ได้แก่ ท่อหน้าตัดกลม ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู และท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม โดยใช้ผลต่างความดัน (Δp) ในการขับเคลื่อนการไหล พบว่าท่อหน้าตัดกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.008 ถึง 0.042 mm ความยาวระหว่าง 1 ถึง 10 cm ค่าสัมประสิทธิ์

ความเสียดทาน (f) กับตัวเลขเรย์โนลด์มีความสัมพันธ์กัน และให้ผลสอดคล้องกับสมการ Hagen-Poiseuille ดังแสดงในสมการที่ (2.9) ในขณะที่ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมคางหมู และท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (\dot{Q}) กับผลต่างความดัน (Δp) แบบเชิงเส้นซึ่งให้ผลสอดคล้องกับสมการที่ (2.10) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าในท่อขนาดไมโครสามารถใช้ D_h แทน D ได้

$$\Delta p = \frac{fL\rho v^2}{2D} \quad (2.9)$$

$$\frac{\dot{Q}}{\Delta p} = \frac{K}{1 + \tau} \quad (2.10)$$

เมื่อ $K = \frac{\pi D^2}{128L\mu}$, $\tau = \frac{\rho D^2}{32\mu}$

Δp คือ ผลต่างความดัน (Pa)

v คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

L คือ ความยาวของท่อ (m)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

\dot{Q} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)

μ คือ ความหนืดพลวัต (Pa-s)

Sahu และคณะ [5] ศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองการไหลของของไหลที่เข้าสู่ระยะ Fully Developed flow ที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบ โดยกำหนดความยาวของท่อ (L) เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) ความเร็วที่ทางเข้า (V_i) และความดันที่ทางออก (p_o) เพื่อ เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์กับสมการ Darcy และ Weisbach ดังแสดงในสมการที่ (2.7) จากการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการคำนวณทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่

คำนวณได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะมีค่าคงที่ตลอดทั้งความยาวท่อ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0157 และที่ได้จากการคำนวณตามสมการ Darcy และ Weishach พบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.0151

Kohl และคณะ [6] ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของน้ำในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดไมโครที่ได้จากการทดลอง (f_{expt}) กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่คำนวณได้ (f_{th}) โดยอาศัยสมการ (2.7) ทำการทดลองโดยใช้ Hydraulic Diameter (D_h) ระหว่าง 25 ถึง 100 μm กำหนดให้มีช่วง Re ระหว่าง 4.9 ถึง 2068 และใช้ผลต่างความดัน (Δp) ในการขับเคลื่อนการไหล พบว่า $f_{\text{expt}}/f_{\text{th}}$ มีค่าระหว่าง 0.93 ถึง 1.15 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 แสดงให้เห็นว่า f_{expt} ในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับสมการที่ (2.7) และท่อขนาดไมโครสามารถใช้ D_h แทน D ได้

Sahar และคณะ [7] ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณเพื่อหาผลกระทบของ Hydraulic Diameter (D_h) และ Aspect Ratio (AR) ที่มีต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) โดยเปลี่ยนความกว้าง ความยาวของน้ำในท่อขนาดไมโคร กำหนดให้แบบจำลองที่ 1 ใช้ค่า D_h คงที่เท่ากับ 0.56 mm และ AR มีค่าตั้งแต่ 0.39 ถึง 10 และแบบจำลองที่ 2 ใช้ค่า D_h ระหว่าง 0.1 ถึง 10 mm และ AR มีค่าคงที่เท่ากับ 1 โดยทั้งสองแบบจำลองนี้ กำหนด Re อยู่ในช่วง 100 ถึง 2000 ผลการทดลองของแบบจำลองที่ 1 พบว่าระยะการไหลในช่วงกำลังพัฒนา (Developing) และการไหลในช่วงพัฒนาอย่างเต็มที่ (Fully developed flow) AR ที่มีค่าระหว่าง 0.39 ถึง 2 ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อ f นอกจากนั้นที่ AR = 2 และ Re = 500 ค่า f เกือบคงที่ และเมื่อ AR มีค่าระหว่าง 2 ถึง 10 และ Re = 1500 พบว่า f มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า AR สำหรับผลการทดลองของแบบจำลองที่ 2 เมื่อพิจารณา ค่า D_h ระหว่าง 0.1 ถึง 1 mm ที่ Re = 500 และ 1500 พบว่า f มีค่าสูงขึ้นตาม D_h

Akbari และคณะ [8] ทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของ Aspect Ratio (AR) ของหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดไมโครที่มีต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแสดงในรูปของเลข Poiseuille ดังแสดงในสมการที่ (2.11) โดยใช้ น้ำ เป็นของไหลทำงาน และพิจารณา AR ในช่วง 0.13 ถึง 0.76 กำหนดให้ที่ทางเข้ามีอัตราการไหลเท่ากับ 4 ถึง 240 $\mu\text{L}/\text{min}$ และที่ทางออกมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยการทดลองนี้มี Re อยู่ในช่วง 1 ถึง 35 จากผลการทดลองพบว่า Re ไม่มีผลต่อเลข Poiseuille และเลข Poiseuille จะเพิ่มขึ้นเมื่อ AR มีค่าลดลง

$$\text{Poiseuille} = f \cdot \text{Re} \quad (2.11)$$

Wang และคณะ [9] ศึกษาลักษณะการไหลในช่วงเริ่มต้นของ two phase flow ในสถานะไม่คงที่ โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการคำนวณหาอัตราการไหล (\dot{Q}) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) ในท่อหน้าตัดลดขนาด กำหนดความดันทางเข้า (p_{in}) เป็น 0.0925, 0.095, 0.10 และ 0.2 MPa พบว่าเมื่อ p_{in} เพิ่มขึ้นอัตราการไหลจะมีค่ามากขึ้น และมีแนวโน้มคงที่ตลอดระยะเวลาการไหล ในขณะที่ f มีแนวโน้มลดลงเมื่อ p_{in} เพิ่มขึ้น

Jong และคณะ [10] ศึกษาแบบจำลองเพื่อตรวจสอบระยะเวลาในการไหลจากถังผ่านท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดไมโคร และผลกระทบของแรงโน้มถ่วง (Gravity force) และแรงแคปิลลารี (Capillary force) ที่ใช้ในการขับเคลื่อนการไหลของ Silicone oil โดยกำหนดให้ความสูง (H) ของ Silicone oil ในถังมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 cm และเปลี่ยนความสูงของ Silicone oil ในท่อ (h) ที่ต่อกับถังเก็บ ให้มีค่าเท่ากับ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พบว่าระยะเวลาในการไหลที่ได้จากการทดลองให้ผลสอดคล้องกับสมการที่ (2.12) และเมื่อตรวจสอบผลกระทบของแรงโน้มถ่วงและแรงคาปิลลารี พบว่าที่ h มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.05 mm แรงโน้มถ่วงจะไม่มีผลต่อเวลาใน

การไหล ดังนั้นแรงคาปิลลารีจะมีความสำคัญในการขับเคลื่อนการไหลของของเหลวในท่อขนาดไมโคร กล่าวคือ เมื่อ h เพิ่มขึ้นจะใช้เวลาในการไหลน้อยลง

$$t = \frac{6\mu L^2}{\rho g H h^2 + 2h\sigma \cos\theta} \quad (2.12)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

H คือ ความสูงของ Silicone oil ในถัง (m)

h คือ ความสูงของ Silicone oil ในท่อ (m)

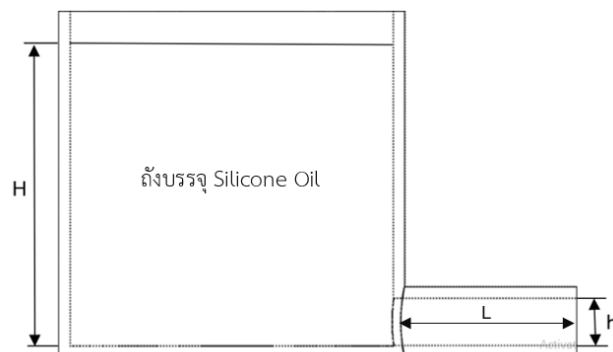
L คือ ความยาวของท่อ (m)

t คือ เวลา (s)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

μ คือ ความหนืดพลวัต (Pa-s)

σ คือ แรงตึงผิว (N/m)

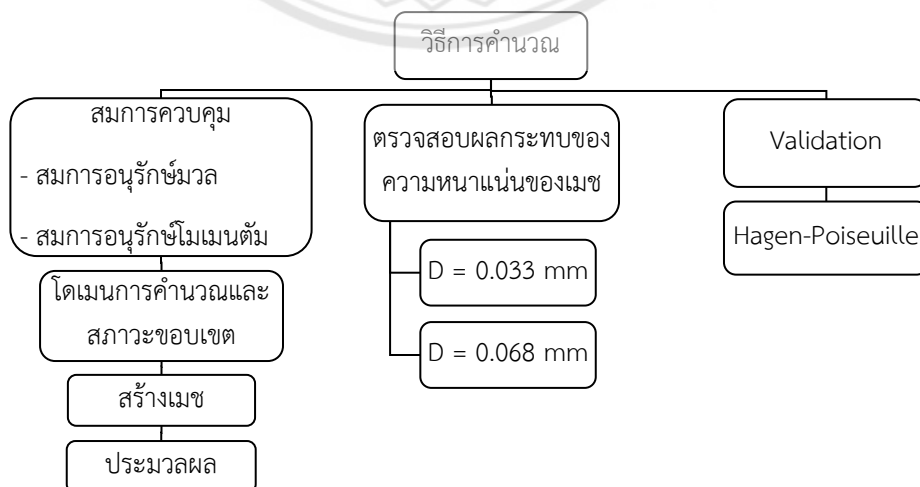


รูปที่ 2.1 แบบจำลองการไหลของ Jong และคณะ

บทที่ 3

วิธีการคำนวณ

งานวิจัยนี้อาศัยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL ในการหาคำตอบของการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อนอ้อย เพื่อหาคำตอบที่อยู่ในรูปของความเร็ว (u, v, w) ความดัน (p) และเวลา (t) ในการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในท่อ จึงจำเป็นต้องกำหนดสมการควบคุม โดเมนการคำนวณรวมถึงสภาวะขอบเขต และการสร้างเมชด้วยวิธีการ Delaunay Algorithm นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบผลกระทบของความหนาแน่นของเมชที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.033 mm และ 0.068 mm และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับสมการ Hagen-Poiseuille โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการคำนวณท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อนอ้อยโดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

3.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

ในการคำนวณหาความเร็ว (u , v , w) ความดัน (p) และเวลา (t) ในการเคลื่อนที่ของของเหลวภายในท่อ จากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องอาศัยสมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier-Stokes Equations) โดยกำหนดให้การไหลอยู่ในสถานะไม่คงที่ (Unsteady state) เทียบกับเวลา เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และเป็นกรไหลใน 3 มิติ ดังต่อไปนี้

สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Navier-Stokes Equations)

x-component:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \rho g_x \quad (3.2)$$

y-component:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \rho g_y \quad (3.3)$$

z-component:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g_z \quad (3.4)$$

เมื่อ u, v, w คือ องค์ประกอบของความเร็วในทิศทางตามแนวแกน x, y, z ตามลำดับ

x, y, z คือ พิกัดตามแกนอ้างอิง

p คือ ความดันของของไหล (Pa)

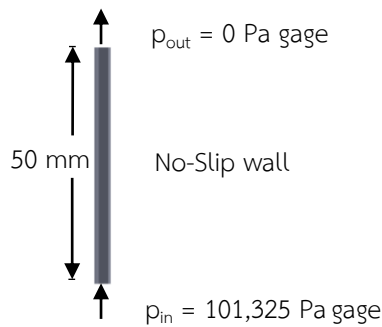
ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

μ คือ ความหนืดพลวัต (Pa-s)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

3.2 การสร้างโดเมนการคำนวณและกำหนดสภาวะขอบเขต

การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อน้อยด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการไหล โดยเริ่มจากอาศัยรูปหน้าตัดของอ้อยของ Cruz และคณะ [1] ที่มีขนาดกำลังขยาย 750 เท่าในการสร้างโดเมนการคำนวณ ใช้โปรแกรม SolidWorks ในการปรับรูปให้เป็นขนาดจริงแล้วจึงคำนวณหา Hydraulic Diameter (D_h) ของแต่ละท่อ พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.0038 ถึง 0.068 mm ในที่นี้เราเลือกพิจารณาเฉพาะท่อที่มี $D_h \geq 0.03$ mm เนื่องจากต้องการให้ $Re > 1$ มิฉะนั้นจะเป็นการไหลแบบ Creeping Flow จากนั้นจึงทำการ Extrude หน้าตัดท่อที่เลือกพิจารณาให้มีความยาวเท่ากับ 50 mm กำหนดให้ของไหลภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) โดยอาศัยผลต่างความดัน (Δp) ระหว่างทางเข้าและทางออกของท่อในการขับเคลื่อนการไหล นั่นคือ ความดันที่ทางเข้ามีค่าเท่ากับ 101,325 Pa เกจ ความดันที่ทางออกมีค่าเท่ากับ 0 Pa เกจ และผนังของท่อเป็นแบบลื่นไถล (No-Slip) ดังแสดงในรูป 3.2

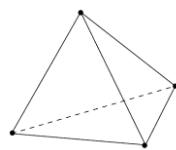


รูปที่ 3.2 Extrude หน้าตัดท่อที่เลือกพิจารณาให้มีความยาว 50 mm

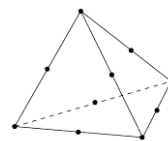
3.3 การสร้างเมช

3.3.1 ขั้นตอนในการสร้างเมช

หลังจากนำไฟล์เขียนแบบของท่อส่งน้ำเลี้ยงเข้าสู่โปรแกรม COMSOL แล้วจึงทำการสร้างเมชรูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยมหรือ Tetrahedron ด้วย Delaunay Algorithm สำหรับการสร้างโนดบนเอลิเมนต์เพื่อคำนวณ u , v , w และ p โดยใช้ Lagrange Element ซึ่งสามารถใช้ได้กับเมชทุกประเภท โดยที่ตัวแปร p เป็นเอลิเมนต์อันดับ 1 มีจำนวน 4 โนด โดยการสร้างโนดที่มุมของเมชเรียกว่า เอลิเมนต์เชิงเส้น (Linear Element) ดังรูป 3.3 (a) ส่วนตัวแปร u , v และ w เป็น Second Order Lagrange มีจำนวน 10 โนด โดยการสร้างโนดที่มุม และจุดกึ่งกลางด้านข้างของเมชเรียกว่า เอลิเมนต์อันดับที่ 2 (Quadratic Element) ดังรูป 3.3 (b) ซึ่งแต่ละโนดจะมี Degrees Of Freedom คือ $u_i = u(\mathbf{p}_i)$ และฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis functions) คือ φ_i โดยที่ $\varphi_i = 1$ ที่โนด i และ $\varphi_i = 0$ ที่โนดอื่นๆ และ φ_i มีความต่อเนื่องกัน ดังนี้ $u = \sum_i U_i \varphi_i$



(a) เอลิเมนต์เชิงเส้น (Linear Element)



(b) เอลิเมนต์อันดับที่ 2 (Quadratic Element)

รูปที่ 3.3 Lagrange element สำหรับรูปทรงพีระมิดฐานสามเหลี่ยมหรือ Tetrahedron

3.3.2 ผลกระทบของความหนาแน่นของเมฆที่มีต่อคำตอบ

ในหัวข้อนี้เราจะทำการตรวจสอบผลกระทบของความหนาแน่นของเมฆที่มีผลต่อคำตอบ รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ นอกจากนี้ข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ เช่น ความเร็วของ CPU หน่วยความจำ และการ์ดจอ ยังเป็นขีดจำกัดของความละเอียดเมฆอีกด้วย ดังนั้นเราจึงต้องมีการตรวจสอบเพื่อหาค่าความหนาแน่นของเมฆที่เหมาะสมที่จะต้องทำการคำนวณในลำดับถัดไป ทั้งนี้การทดสอบความหนาแน่นของเมฆนั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงปริมาตร ซึ่งในที่นี้แบ่งออกเป็น 2 ท่อ ได้แก่ ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.033 และ 0.068 mm เนื่องจากทั้งสองขนาดนี้เป็นท่อที่มีขนาดเล็กที่สุด และใหญ่ที่สุด ตามลำดับ อีกทั้งยังแสดงความหนาแน่นของเมฆของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลมที่เรานำมาพิจารณา

สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.033 mm เราได้เปรียบเทียบความหนาแน่นของเมฆ ออกเป็น 2 แบบจำลอง ได้แก่ (1) Model A มีความหนาแน่น 1.308×10^{16} เมฆ/ m^3 ใช้เวลา 145.7 วินาที (2) Model B มีความหนาแน่น 1.336×10^{16} เมฆ/ m^3 ใช้เวลา 149.4 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 3.1 เมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบ พบว่า Model A กับ Model B มีความแตกต่างของคำตอบ 0.0146%

และสำหรับที่ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.068 mm การตรวจสอบความหนาแน่นของเมฆ จะแบ่งเป็น 3 Model ได้แก่ (1) Model C มีความหนาแน่น 9.028×10^{14} เมฆ/ m^3 ใช้เวลา 71.2 วินาที (2) Model D มีความหนาแน่น 2.248×10^{15} เมฆ/ m^3 ใช้เวลา 189.69 วินาที (3) Model D มีความหนาแน่น 5.566×10^{15} เมฆ/ m^3 ใช้เวลา 425.13 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบของ Model C และ D เมื่อเทียบกับ Model E พบว่า Model C กับ Model E มีความแตกต่างของคำตอบเท่ากับ 4.63% และ Model D

กับ Model E มีความแตกต่างของคำตอบเท่ากับ 4.31% จากการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบจะเห็นได้ว่าผลต่างของคำตอบของทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.033 และ 0.068 mm มีค่าน้อยมากจึงสรุปได้ว่าความหนาแน่นของเมฆไม่มีผลกระทบต่อคำตอบที่ได้

ตารางที่ 3.3 แสดงความหนาแน่นของเมฆในโดเมนการคำนวณของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม้กลมที่มีขนาด D_h เท่ากับ 0.033, 0.0333, 0.0364 และ 0.0492 mm ซึ่งท่อขนาด $D_h = 0.033$ และ 0.0333 mm ใช้ model B ในการคำนวณเช่นเดียวกัน ท่อขนาด $D_h = 0.0364$ mm ใช้ model A ในการคำนวณ และท่อขนาด $D_h = 0.0492$ mm ใช้ model C ในการคำนวณ โดยจะเห็นว่า ท่อส่งน้ำเลี้ยงขนาดต่าง ๆ ใช้ model ในการคำนวณแตกต่างกัน เนื่องจากจากรูปร่าง และขนาดของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม้กลมมีความซับซ้อน ส่งผลให้การคำนวณเกินขีดจำกัดของคอมพิวเตอร์ ดังนั้นเราจึงเลือก model การคำนวณตามความเหมาะสมของรูปร่างหน้าตัด และขนาดของแต่ละท่อ

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมฆในโดเมนการคำนวณเปลี่ยนไปของท่อ $D = 0.033$ mm

Model	จำนวนเมฆ	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่นของเมฆ ($เมฆ/m^3$)	เวลาที่ใช้ (s)	อัตราการไหลที่ได้จากโปรแกรม (m^3/s)	ผลต่างจาก B (%)
A	462,406	3.534×10^{-11}	1.308×10^{16}	145.70	6.938×10^{-11}	0.0146
B	472,346	3.534×10^{-11}	1.336×10^{16}	149.04	6.939×10^{-11}	-

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของคำตอบเมื่อความหนาแน่นของเมชในโดเมนการ

คำนวณเปลี่ยนไปของท่อ $D = 0.068$ mm

Model	จำนวนเมช	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่นของเมช (เมช/ m^3)	เวลาที่ใช้ (s)	อัตราการไหลที่ได้จากโปรแกรม (m^3/s)	ผลต่างจาก E (%)
C	163,950	1.816×10^{-10}	9.028×10^{14}	71.20	1.793×10^{-9}	4.63
D	408,317	1.816×10^{-10}	2.248×10^{15}	189.69	1.799×10^{-9}	4.31
E	1,010,704	1.816×10^{-10}	5.566×10^{15}	425.13	1.880×10^{-9}	-

ตารางที่ 3.3 ความหนาแน่นของเมชในโดเมนการคำนวณของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม้กลม

D_h (mm)	Model ที่ใช้คำนวณ	จำนวนเมช	ปริมาตร (m^3)	ความหนาแน่นของเมช (เมช/ m^3)	เวลาที่ใช้ (s)
0.033	B	825,962	4.90×10^{-11}	1.69×10^{16}	566.84
0.0333	B	803,529	4.85×10^{-11}	1.66×10^{16}	507.90
0.0364	A	568,327	5.75×10^{-11}	9.88×10^{15}	3,004.71
0.0492	C	1,241,448	8.70×10^{-11}	1.43×10^{16}	706.01

3.4 การเปรียบเทียบผล (Validation)

พิจารณาอัตราการไหลจากระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และจากสมการ Hagan-Poiseuille สำหรับท่อขนาดเท่ากับ 0.033 และ 0.068 mm ซึ่งที่ท่อ $D = 0.033$ mm แบ่งออกเป็น 2 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง A และ B และที่ท่อ $D = 0.068$ mm แบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง C, D และ E โดยมีสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ ความหนาแน่น $\rho = 987.08$ kg/ m^3 ความหนืดพลวัต $\mu = 5.2994 \times 10^{-4}$ Pa-s และผลต่างความดัน

(Δp) เท่ากับ 101,325 Pa ในที่นี้เราจะแสดงการคำนวณท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.033 mm ตามแบบจำลอง A โดยเริ่มจากนำค่าอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}) ที่ได้จากโปรแกรม COMSOL มาหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร (\dot{Q}) ดังแสดงในสมการที่ (3.6) ให้เป็นผลจาก FEM

$$\dot{Q} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (3.6)$$

แทนค่า
$$\dot{Q} = \frac{6.8483 \times 10^{-8}}{987.08}$$

จะได้
$$\dot{Q} = 6.938 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$$

และคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตร (\dot{Q}) จากสมการ Hagan-Poiseuille ได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \mu L} \quad (3.7)$$

แทนค่า
$$\dot{Q} = \frac{\pi(0.015 \times 10^{-3})(101,325)}{(8)(5.2994 \times 10^{-4})(50 \times 10^{-3})}$$

จะได้
$$\dot{Q} = 7.610 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}$$

จากทั้งสองสมการดังที่กล่าวมานั้น เราสามารถนำมาใช้ในการคำนวณในแบบจำลอง B ได้เช่นเดียวกัน และสามารถสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ทั้งนี้เรายังสามารถใช้สมการดังที่กล่าวมาข้างต้นคำนวณหาค่า \dot{Q} ของท่อ $D = 0.068 \text{ mm}$ ในทั้งสามแบบจำลองได้เช่นกัน นั่นคือ แบบจำลอง C, D และ E ซึ่งสามารถสรุปผลการคำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 3.5

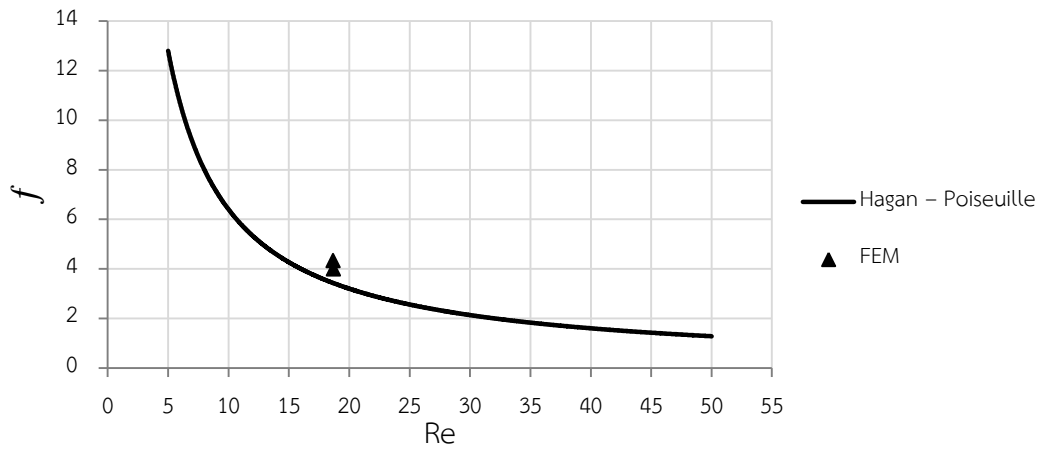
ตารางที่ 3.4 ผลการเปรียบเทียบจาก FEM และสมการ Hagan-Poiseuille ของท่อขนาด 0.033 mm

Model	อัตราการไหลที่ได้จาก FEM (m^3/s)	อัตราการไหลที่ได้จาก Hagan-Poiseuille (m^3/s)	ผลต่างของคำตอบ (%)
A	6.938×10^{-11}	7.610×10^{-11}	8.83
B	6.939×10^{-11}	7.610×10^{-11}	8.82

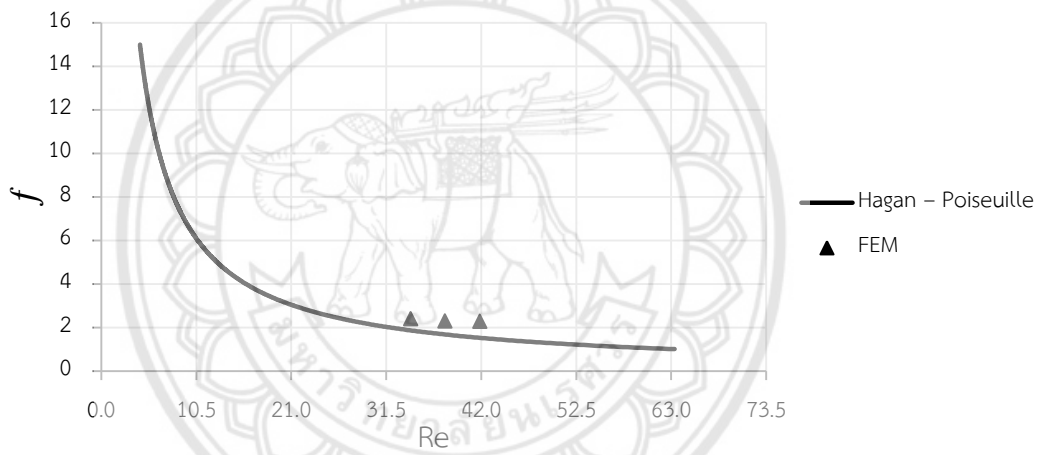
ตารางที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบจาก FEM และสมการ Hagan-Poiseuille ของท่อขนาด 0.068 mm

Model	อัตราการไหลที่ได้จาก FEM (m^3/s)	อัตราการไหลที่ได้จาก Hagan-Poiseuille (m^3/s)	ผลต่างของคำตอบ (%)
C	1.793×10^{-9}	2.034×10^{-9}	11.85
D	1.793×10^{-9}	2.034×10^{-9}	11.55
E	1.880×10^{-9}	2.034×10^{-9}	7.57

รูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณจากระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) และจากสมการ Hagan-Poiseuille ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย f กับ Re โดยอาศัยค่า Q ในการคำนวณ สังเกตได้ว่าการคำนวณทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน และมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยมากดังแสดงในตารางข้างต้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่า Q ที่คำนวณได้จาก FEM เป็นค่าซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบผลการคำนวณจาก FEM กับ Hagan-Poiseuille ของท่อขนาดเท่ากับ 0.03 mm



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณจาก FEM กับ Hagan-Poiseuille ของท่อขนาดเท่ากับ 0.068 mm

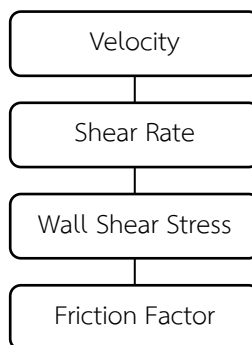
บทที่ 4

ผลการคำนวณ

ในบทนี้เราจะแบ่งผลการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลม และท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลม ซึ่งเราจะทำการคำนวณทั้งสภาวะไม่คงที่ และสภาวะคงที่ โดยพิจารณาผลการคำนวณในรูปของความเร็ว อัตราเฉือน (Shear Rate) ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress, WSS หรือ τ_w) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor, f) ตามลำดับ ดังแสดงใน Flowchart ในรูปที่ 4.1



(a) แผนผังสรุปหัวข้อการคำนวณ



b) ลำดับการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ
รูปที่ 4.1 แผนภาพของเนื้อหาโดยรวมในบทที่ 4

4.1 ท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลม

ท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.068 mm มีความยาวเท่ากับ 50 mm กำหนดให้ของเหลวมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำที่อุณหภูมิ 52°C เป็นของไหลทำงาน โดยมีสมบัติเชิงความร้อน ดังนี้ ความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 987.08 kg/m³ ความหนืดพลวัต (μ) เท่ากับ 5.2994×10^{-4} Pa-s โดยอาศัยผลต่างความดัน (Δp) ระหว่างทางเข้าและทางออกของท่อ ในการขับเคลื่อนการไหล กำหนดให้ความดันที่ทางเข้า (p_{in}) เท่ากับ 101,325 Pa เกจ ความดันที่ทางออก (p_{out}) เท่ากับ 0 Pa เกจ และผนังท่อเป็นแบบไม่ลื่นไหล (No-Slip)

พิจารณาการไหลภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อน้อย โดยเริ่มจากการหา Entrance length (L_e) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) ซึ่งเสนอโดย White [11] ดังนี้

$$\frac{L_e}{D} = 0.06Re \quad (4.1)$$

แทนค่า

$$\frac{L_e}{0.068} = 0.06 \times 62.82$$

จะได้

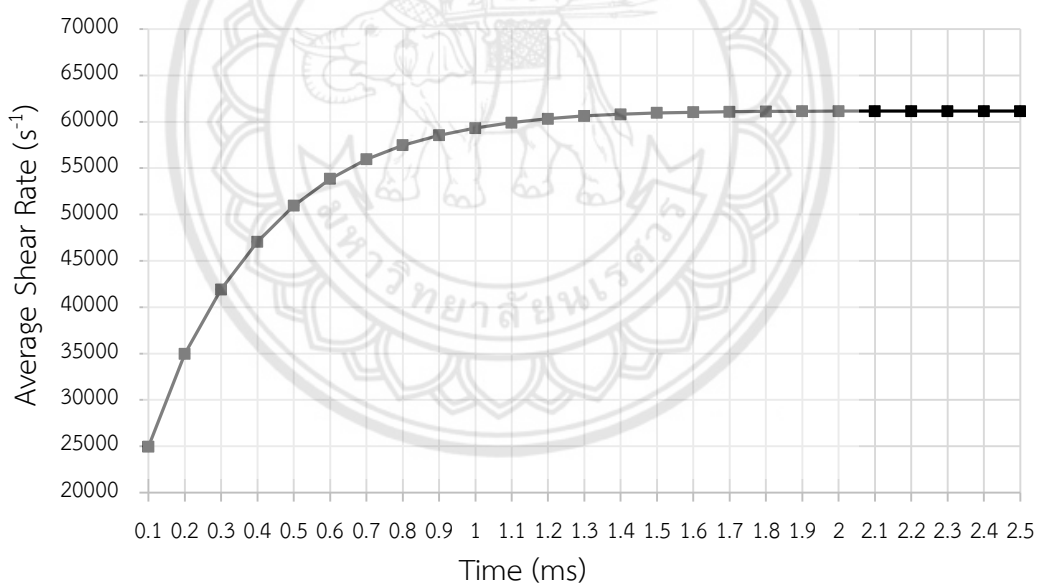
$$L_e = 0.26 \text{ mm}$$

จากผลการคำนวณทำให้ทราบว่า L_e จะสิ้นสุดที่ $z = 0.26$ mm ซึ่งคิดเป็น 0.52% ของความยาวท่อ ซึ่งเมื่อผ่านจุดนี้การไหลจะถูกพัฒนาอย่างเต็มที่ (Fully developed flow) ในที่นี้เราจึงเริ่มพิจารณาที่ $z = 0.68$ mm เนื่องจากตำแหน่งนี้ไม่มี Entrance effect

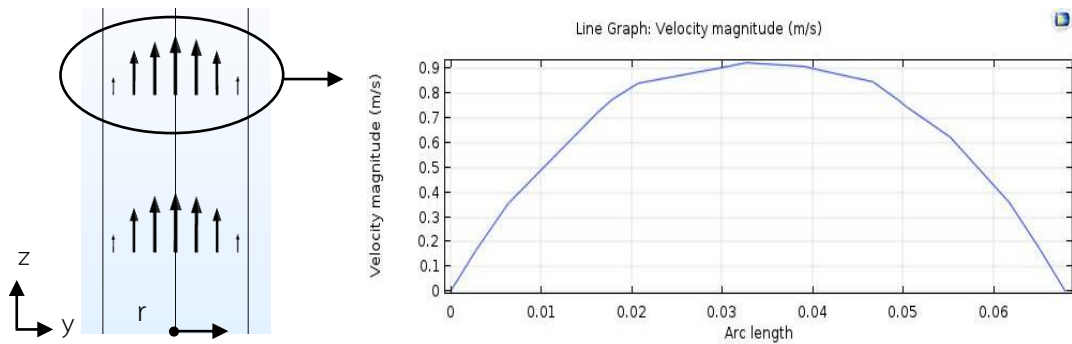
รูปที่ 4.2 แสดงอัตราเฉือนเฉลี่ย ($\dot{\gamma}_{av}$) ตลอดทั้งความยาวท่อที่เวลาต่าง ๆ โดยพิจารณาทีละ 0.1 ms พบว่า ที่สภาวะไม่คงที่อัตราเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่ง $t = 1.7$ ms อัตราเฉือนเฉลี่ยได้เข้าสู่ค่าหนึ่ง ในที่นี้เราจึงทำการเปรียบเทียบค่าอัตราเฉือนเฉลี่ยที่ $t = 1.5, 1.6, 1.7$ และ 1.8 ms ซึ่งคิดเป็น 0.13, 0.085 และ 0.05% ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์

ความแตกต่าง มีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่ $t = 1.7$ และ 1.8 ms เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเราสามารถเลือกให้ที่ $t = 1.7$ ms เป็นเวลาที่เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่

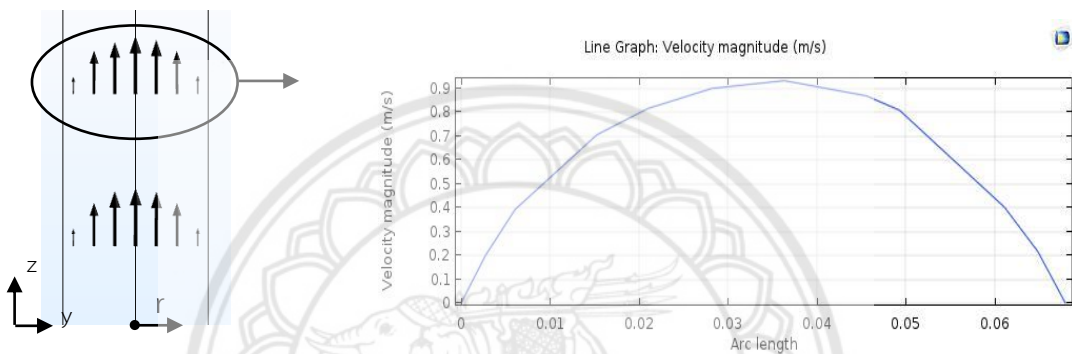
พิจารณารูปที่ 4.3 แสดงการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อนอ้อยที่ตำแหน่ง $z = 25$ mm ของทั้งกรณีสภาวะไม่คงที่ที่เวลา $t = 1.7$ ms และกรณีสภาวะคงที่ สังเกตได้ว่าโปรไฟล์ความเร็วมีรูปร่างเป็นพาราโบลาตลอดทั้งท่อ เนื่องจากที่ผนังท่อเป็นสภาวะไม่ลื่นไถล (No-Slip) ส่งผลให้มีความเร็วเป็นศูนย์ และโปรไฟล์ความเร็วมีลักษณะเป็นพาราโบลา สำหรับในกรณีสภาวะไม่คงที่ มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.934 m/s และที่สภาวะคงที่ที่มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.935 m/s โดยมีค่าความแตกต่างคิดเป็น 0.1%



รูปที่ 4.2 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อน้ำตัดกลม



(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 1.7$ ms)

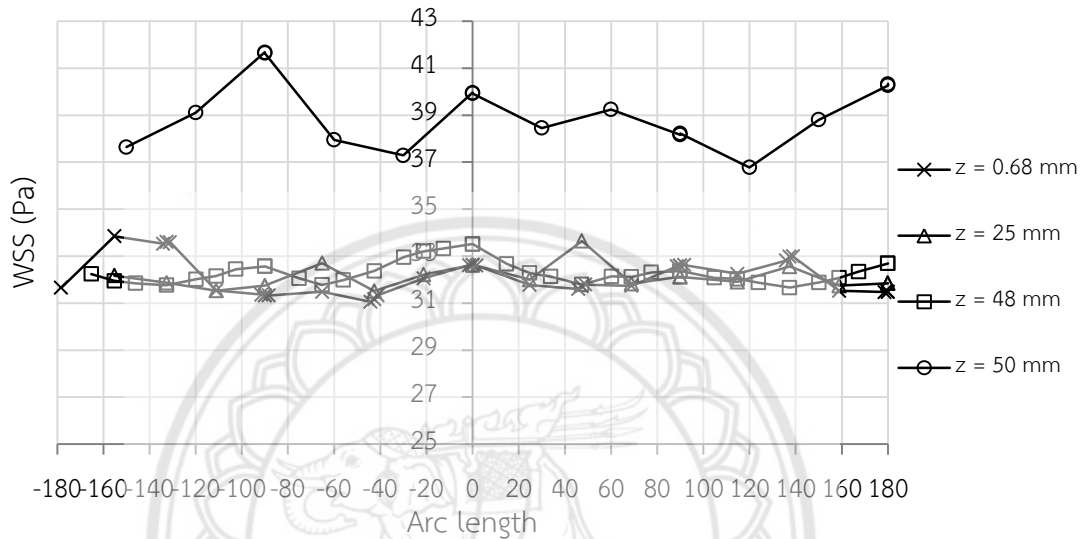


(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

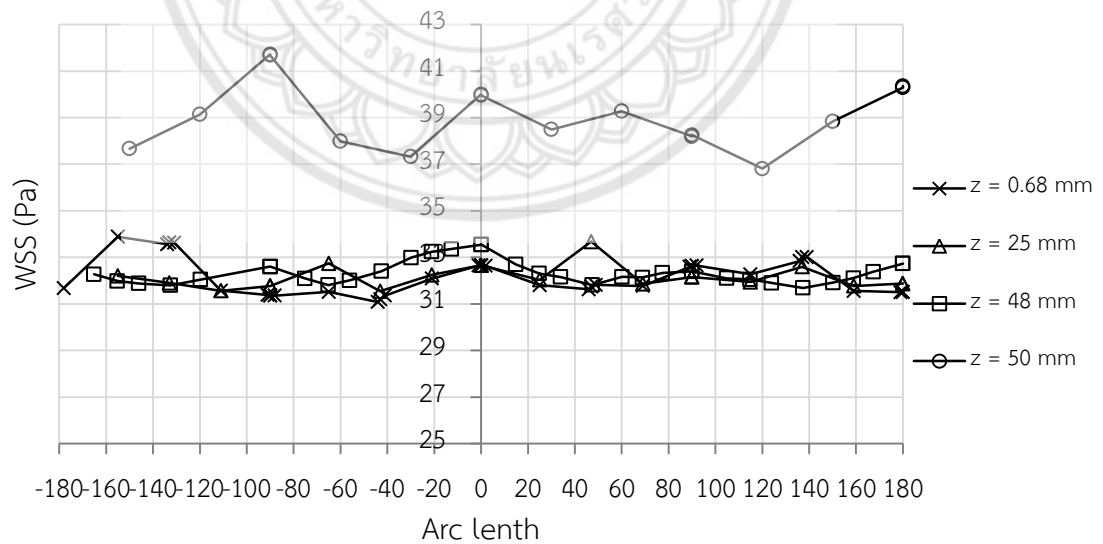
รูปที่ 4.3 โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity Profile) และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อหน้าตัดกลมที่ตำแหน่ง $z = 25$ mm ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 1.7$ ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.4 แสดงการกระจาย WSS รอบวงที่ตำแหน่ง $z = 0.68, 25, 48$ และ 50 mm สำหรับที่สภาวะไม่คงที่และที่สภาวะคงที่ พบว่า ในทั้งสองกรณี WSS ที่ $z = 0.68, 25$ และ 48 mm มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยในกรณีที่ไม่คงที่อยู่ที่ $32.13, 32.19$ และ 32.33 Pa และในกรณีที่สภาวะคงที่อยู่ที่ $32.16, 32.15$ และ 32.36 Pa ตามลำดับ และที่ $z = 50$ mm ของทั้งสองกรณีมีค่าเฉลี่ยของ WSS เท่ากับ 39.09 และ 39.13 Pa ตามลำดับ ซึ่งมีความมากกว่าอีกสามตำแหน่งดังที่กล่าวมาข้างต้น เป็นผลมาจาก End effect ทั้งนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าในทั้งสองกรณี

กราฟการกระจาย WSS มีค่าใกล้เคียงกันที่แต่ละตำแหน่ง โดยคิดเป็นค่าความแตกต่างเท่ากับ 0.09, 0.12, 0.09 และ 0.1% ตามลำดับ



(a) การคำนวณแบบสภาวะไม่คงที่ (t = 1.7 ms)



(b) การคำนวณแบบสภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.4 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ (t = 1.7 ms) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) ที่ผิวท่อ ซึ่งจะอาศัยผลของความเร็วเฉลี่ย (\bar{v}) และความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่ผนัง ($\bar{\tau}_w$) ในการคำนวณ สำหรับในกรณีของสภาวะการไหลไม่คงที่ที่ $t = 1.7 \text{ ms}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.2) ดังนี้

$$f_{1.7 \text{ ms}} = \frac{8\bar{\tau}_w}{\rho(\bar{v})^2} \quad (4.2)$$

แทนค่า

$$f_{1.7 \text{ ms}} = \frac{8 \times 32.34}{987.07 \times (0.496)^2}$$

จะได้

$$f_{1.7 \text{ ms}} = 1.065$$

และในกรณีที่สภาวะคงที่สามารถคำนวณและเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (4.3) ได้ดังนี้

$$f_{\text{steady}} = \frac{8\bar{\tau}_w}{\rho(\bar{v})^2} \quad (4.3)$$

แทนค่า

$$f_{\text{steady}} = \frac{8 \times 32.403}{987.07 \times (0.497)^2}$$

จะได้

$$f_{\text{steady}} = 1.063$$

สังเกตได้ว่าค่า f จากสมการที่ (4.2) และ (4.3) มีผลต่างกันอยู่ที่ 0.19 % ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะคงที่เริ่มต้นที่ $t = 1.7 \text{ ms}$ สำหรับการไหลภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลม อย่างไรก็ตาม White [11] ได้ระบุความไม่แน่นอน (Uncertainty) ในการคำนวณหาค่า f ของท่อหน้าตัดกลมไว้ที่ $\pm 40 \%$

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลม

รูปแบบการคำนวณ	\bar{v} (m/s)	Re	γ_{av} (s ⁻¹)	$\bar{\tau}_w$ (Pa)	f	% difference
สถานะไม่คงที่ (t = 1.7 ms)	0.496	62.82	61,038	32.34	1.065	0.19 %
สถานะคงที่ (Steady State)	0.497	62.95	61,145	32.403	1.063	

4.2 ท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลม

พิจารณาการไหลภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลม โดยเราจะเริ่มจากการคำนวณหา Hydraulic Diameter (D_h) เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกับท่อหน้าตัดกลม ซึ่งเราจะคำนวณ D_h ของแต่ละท่อได้จากสมการที่ (4.4) ดังต่อไปนี้

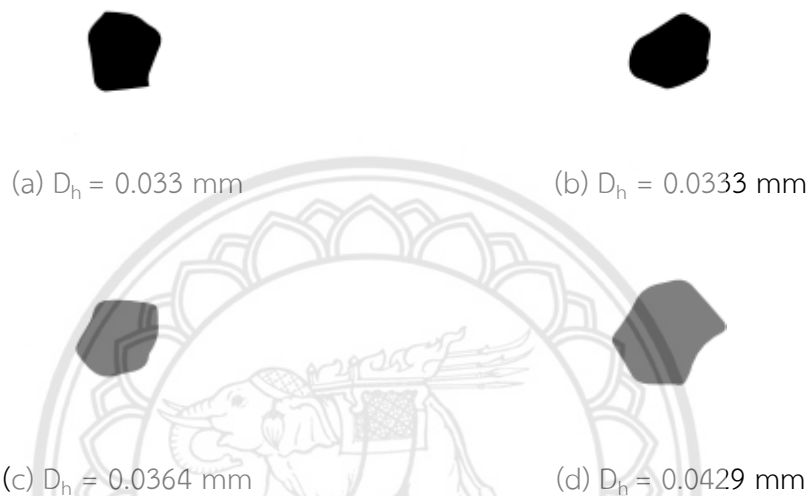
$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (4.4)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m²)

P คือ เส้นรอบรูปของหน้าตัด (m)

จากผลการคำนวณเราได้ D_h มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0038 ถึง 0.068 mm ซึ่งในที่นี้เราต้องการท่อที่ให้ Reynolds number มากกว่า 1 และเนื่องด้วยขีดจำกัดของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ เราจึงพิจารณาเฉพาะท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลมจำนวน 4 ท่อ ได้แก่ 0.033, 0.0333, 0.0364 และ 0.0492 mm ซึ่งรูปหน้าตัดของท่อดังกล่าว แสดงในรูปที่ 4.5 จากนั้นเราคำนวณ Entrance length (L_e) เพื่อหาผลกระทบเนื่องจากบริเวณทางเข้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.1) ดังที่กล่าวมา

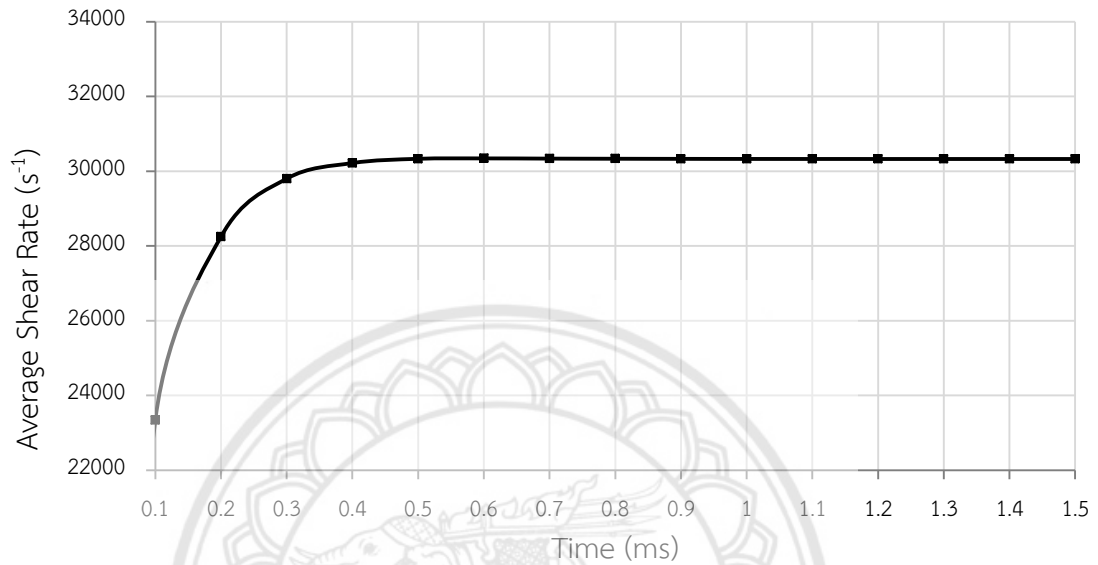
ในหัวข้อข้างต้น โดยแต่ละท่อจะได้ L_e เท่ากับ 0.0154, 0.0156, 0.023 และ 0.075 mm ตามลำดับ ซึ่งเมื่อผ่านตำแหน่งนี้การไหลจะถูกพัฒนาอย่างเต็มที่ (Fully developed flow) ดังนั้นเราจึงเลือกพิจารณาที่ตำแหน่ง $z = 0.33, 0.333, 0.364$ และ 0.492 mm ตามลำดับ เพื่อให้ไม่มีผลของ Entrance effect



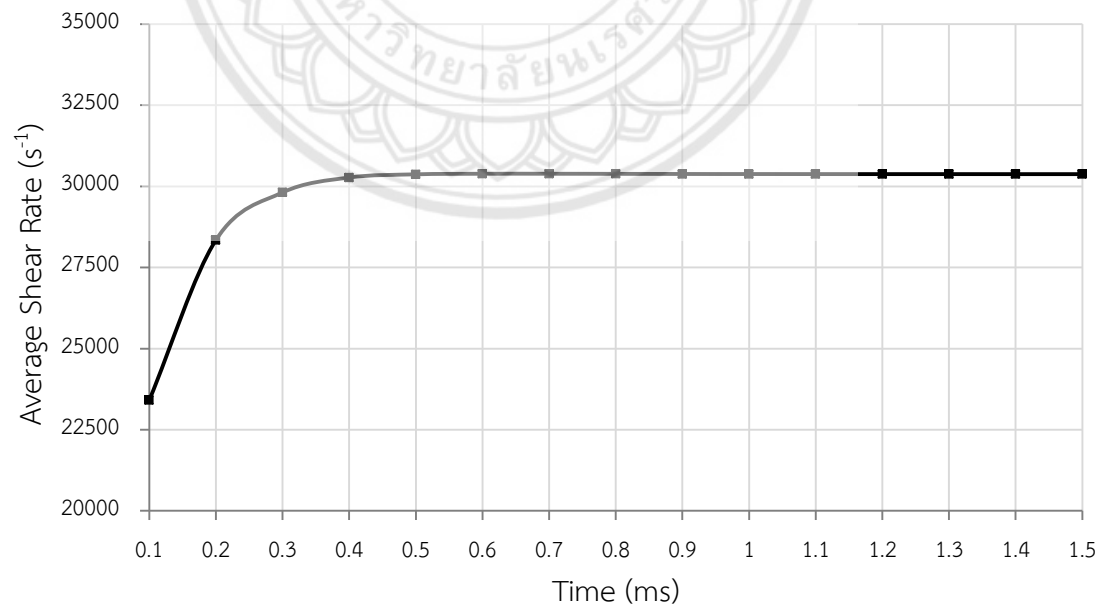
รูปที่ 4.5 รูปหน้าตัดของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลม

พิจารณารูปที่ 4.6 - 4.9 ซึ่งแสดงอัตราเฉือนเฉลี่ย ($\dot{\gamma}_{av}$) ตลอดทั้งความยาวท่อที่เวลาต่าง ๆ ของท่อหน้าตัดไม่กลมที่มีขนาดเท่ากับ 0.033, 0.0333, 0.0364 และ 0.0492 mm สำหรับสภาวะไม่คงที่ โดยพิจารณาอัตราเฉือนเฉลี่ยเทียบกับเวลาที่ของไหลเคลื่อนที่ภายในท่อที่ละ 0.1 ms พบว่า $\dot{\gamma}_{av}$ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนลู่เข้าสู่ค่าหนึ่งในระยะเวลาหนึ่ง โดยที่ท่อขนาด $D_h = 0.033$ และ 0.0333 mm ค่า $\dot{\gamma}_{av}$ ได้ลู่เข้าสู่ค่าหนึ่งที่ $t = 0.4$ ms เช่นเดียวกัน ในขณะที่ท่อขนาด $D_h = 0.0364$ และ 0.0492 mm ค่า $\dot{\gamma}_{av}$ ได้ลู่เข้าสู่ค่าหนึ่งที่ $t = 0.5$ ms และ $t = 0.8$ ms ตามลำดับ ในที่นี้เราจะใช้เวลาดังกล่าวในการพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า $\dot{\gamma}_{av}$ โดยทำการเปรียบเทียบที่เวลาก่อนหน้า และเวลาถัดไปของเวลาที่เรานำมาเลือก เพื่อหาความถูกต้องที่สามารถยอมรับได้ ณ เวลาที่เราเลือกให้เป็นเวลาที่เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าแต่ละท่อมีค่า

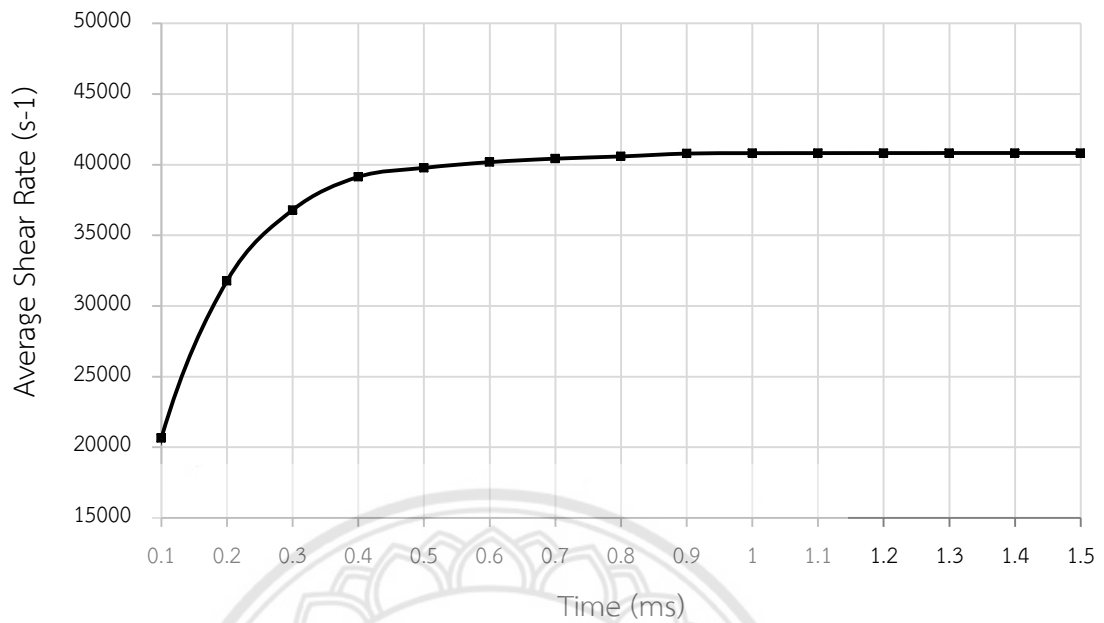
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยมาก เราจึงเลือกให้ที่ $t = 0.4, 0.4, 0.5$ และ 0.8 ms เป็นเวลาที่การไหลเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ของท่อขนาด $D_h = 0.033, 0.0333, 0.0364$ และ 0.0492 mm ตามลำดับ



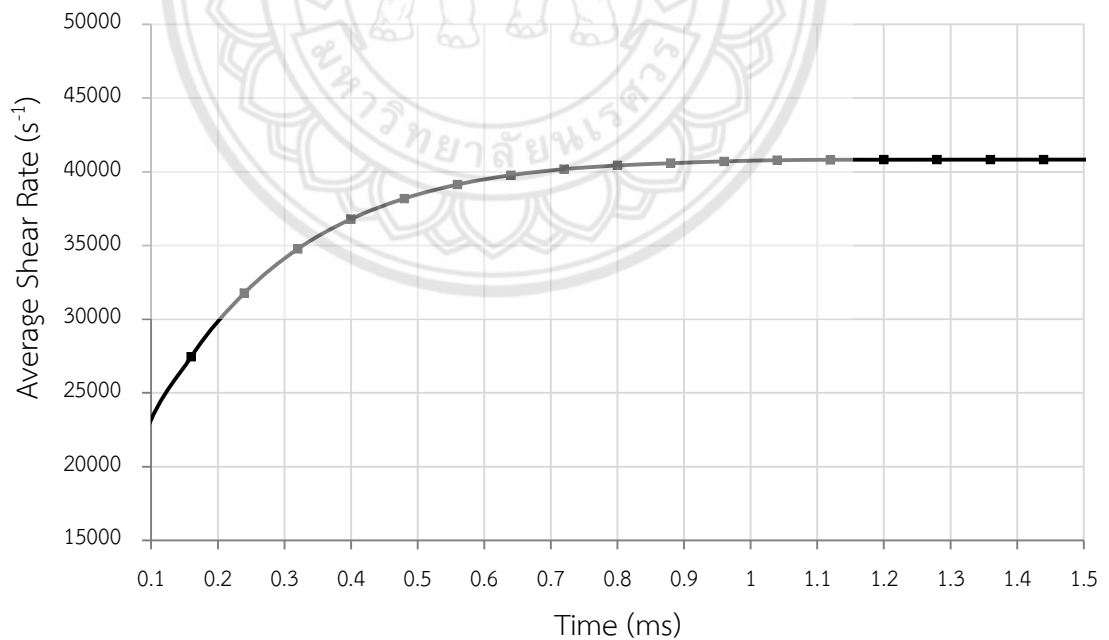
รูปที่ 4.6 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดไม้กลมขนาด 0.033 mm



รูปที่ 4.7 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดไม้กลมขนาด 0.0333 mm



รูปที่ 4.8 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0364 mm



รูปที่ 4.9 อัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ สำหรับสภาวะไม่คงที่ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0492 mm

ตารางที่ 4.2 การหาความแตกต่างของค่าอัตราเฉือนเฉลี่ยที่เวลาใกล้เคียงกัน

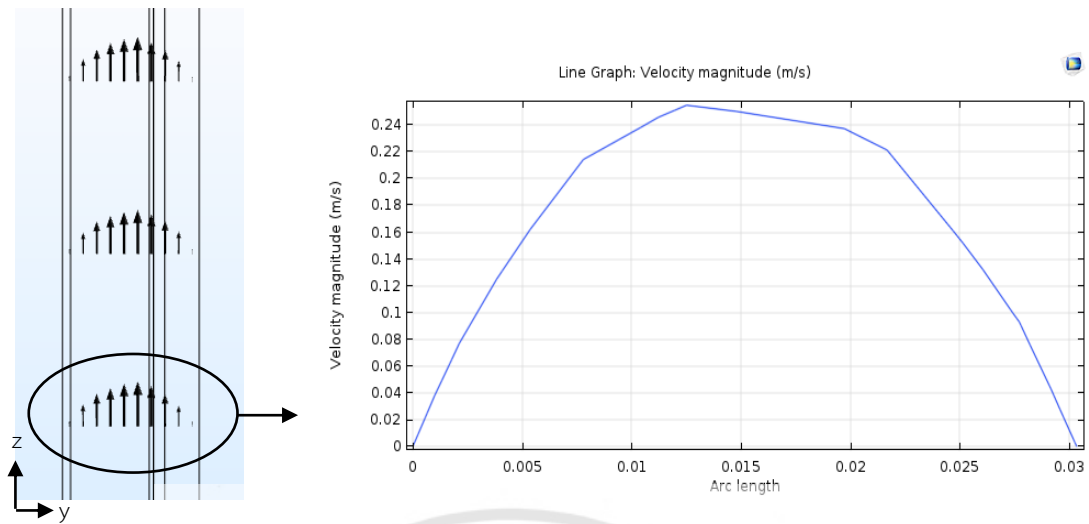
D _h (mm)	อัตราเฉือนเฉลี่ย (s ⁻¹)		% ความแตกต่าง
	t ₁ (ms)	t ₂ (ms)	
0.033	0.3	0.4	1.38
	0.4	0.5	0.37
0.0333	0.3	0.4	1.52
	0.4	0.5	0.32
0.0364	0.4	0.5	0.95
	0.5	0.6	0.33
0.0492	0.7	0.8	0.62
	0.8	0.9	0.38

รูปที่ 4.10 – 4.13 แสดงการกระจายความเร็วที่ตำแหน่ง z = 25 mm ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลมขนาดเท่ากับ 0.033, 0.0333, 0.0364 และ 0.0492 mm ตามลำดับ สำหรับที่สภาวะไม่คงที่ และที่สภาวะคงที่ (Steady State) สังเกตได้ว่าในทั้งสองกรณีของท่อหน้าตัดต่าง ๆ กราฟการกระจายความเร็วมีรูปร่างคล้ายกัน และมีค่าต่างกันน้อยมาก ในที่นี้เราจึงทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ความเร็วสูงสุดของแต่ละท่อดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยใช้สมการที่ (4.5) ในการคำนวณ พบว่า เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างในทั้งสองกรณีของท่อหน้าตัดต่าง ๆ มีค่าต่างกันน้อยมาก ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณของกรณีที่ไม่คงที่นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

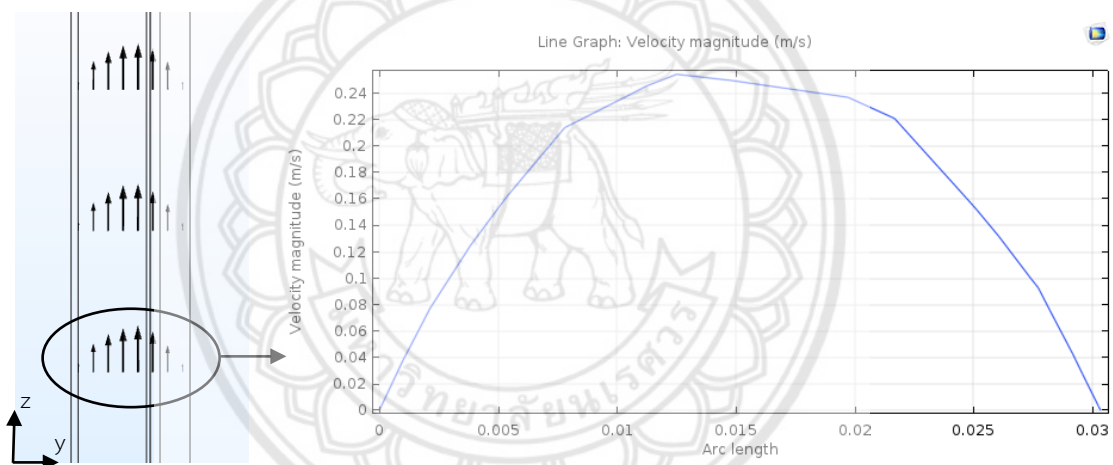
$$\% \text{ difference} = \left| \frac{A - B}{A} \right| \times 100 \quad (4.5)$$

เมื่อ A คือ การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่

B คือ การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

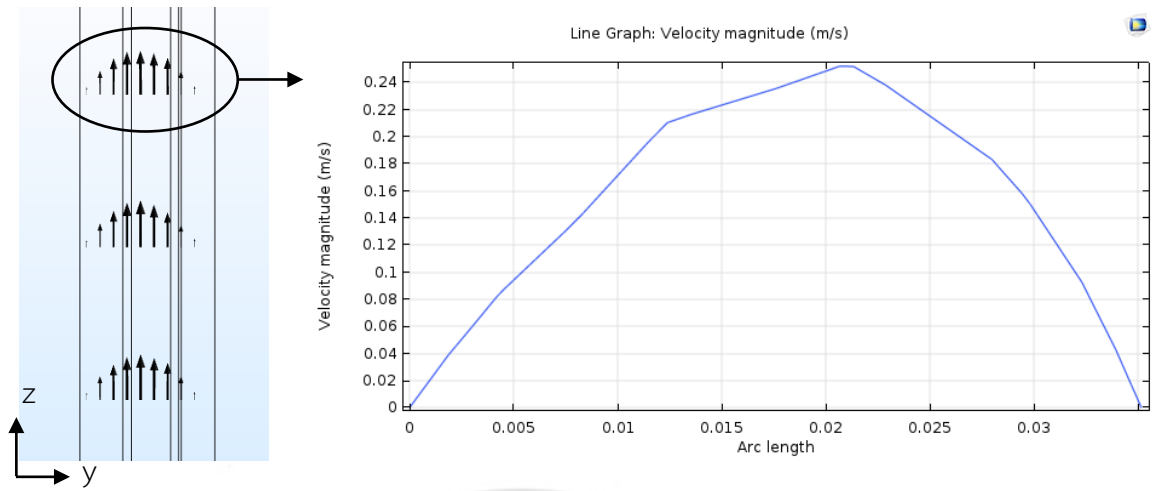


(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4 \text{ ms}$)

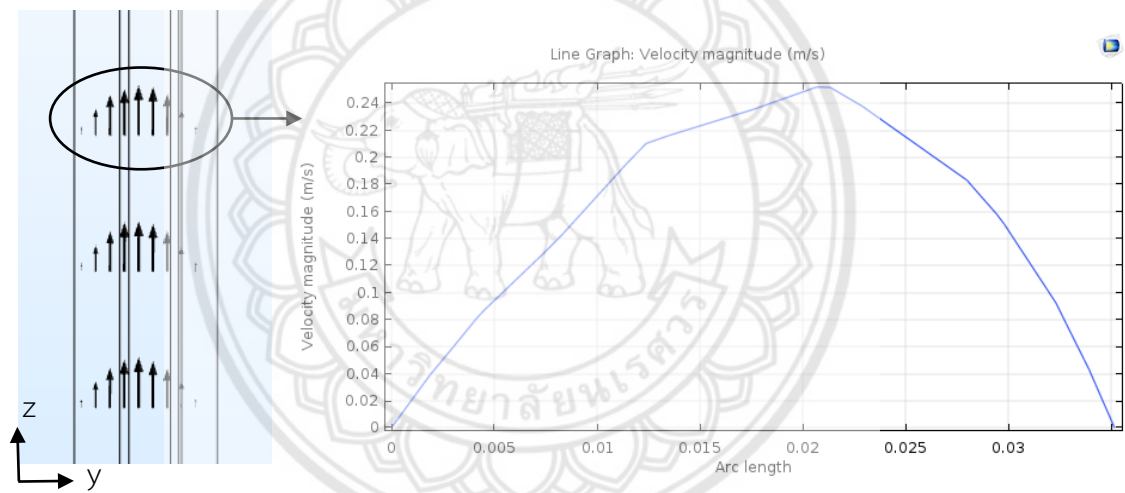


(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.10 โปรไฟล์ความเร็ว และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงขนาด 0.033 mm ที่ $z = 25 \text{ mm}$ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4 \text{ ms}$) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)

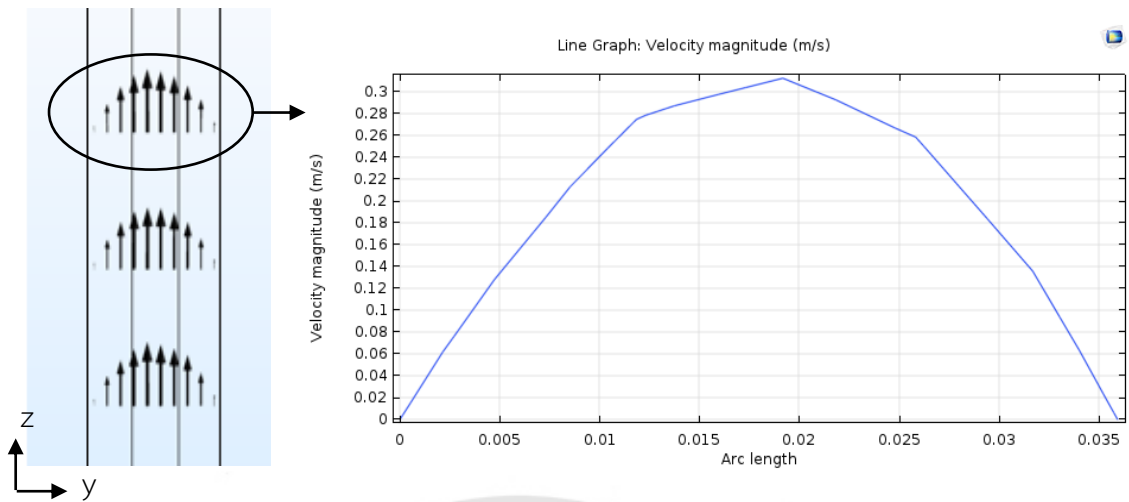


(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4 \text{ ms}$)

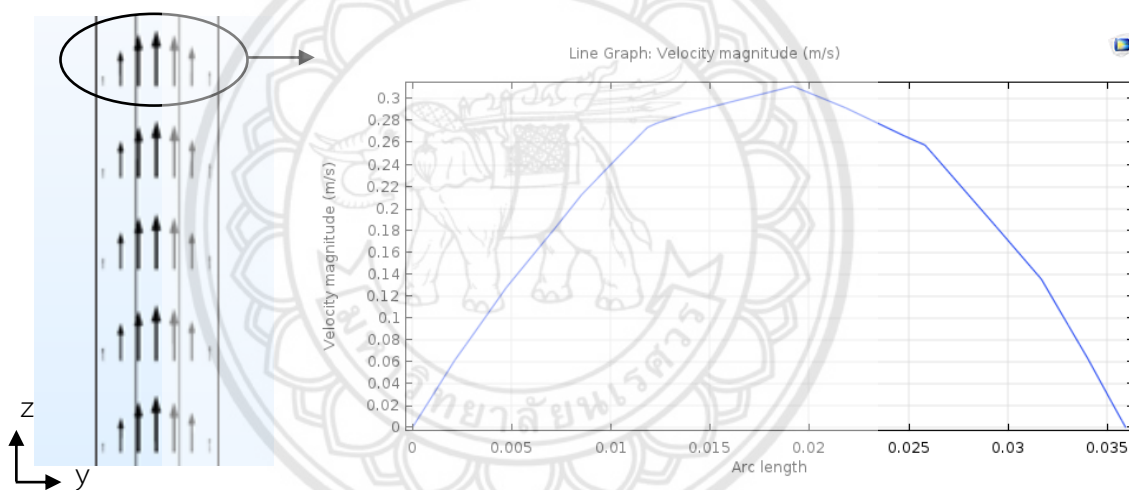


(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.11 โปรไฟล์ความเร็ว และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยง ขนาด 0.0333 mm ที่ $z = 25 \text{ mm}$ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4 \text{ ms}$) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)

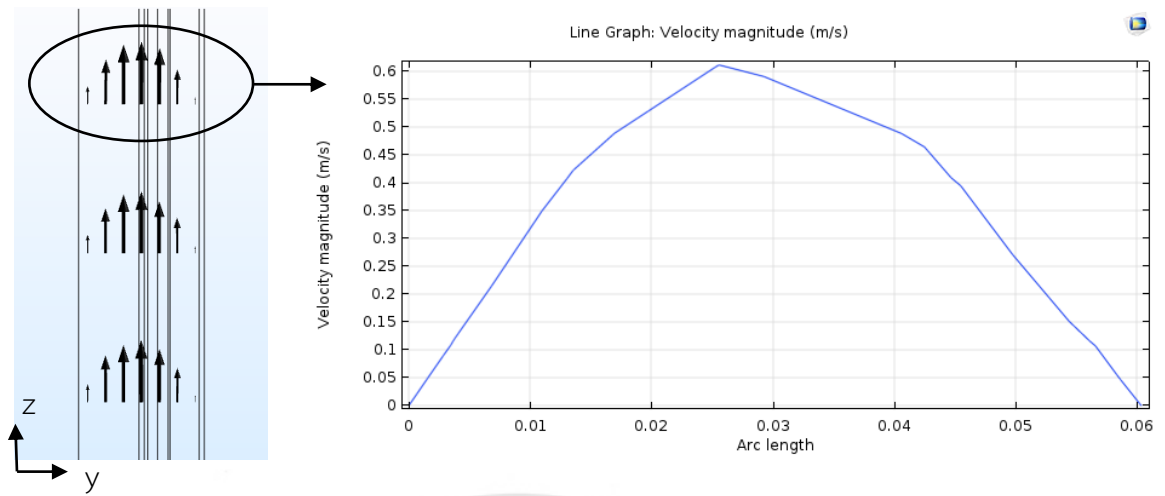


(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.5 \text{ ms}$)

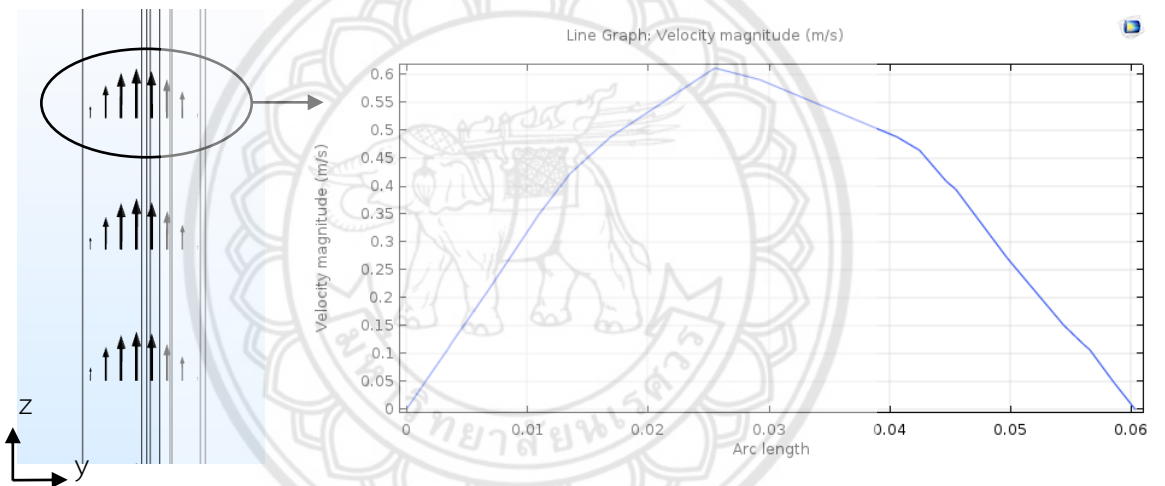


(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.12 โปรไฟล์ความเร็ว และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงขนาด 0.0364 mm ที่ $z = 25 \text{ mm}$ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.5 \text{ ms}$) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)



(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.8 \text{ ms}$)



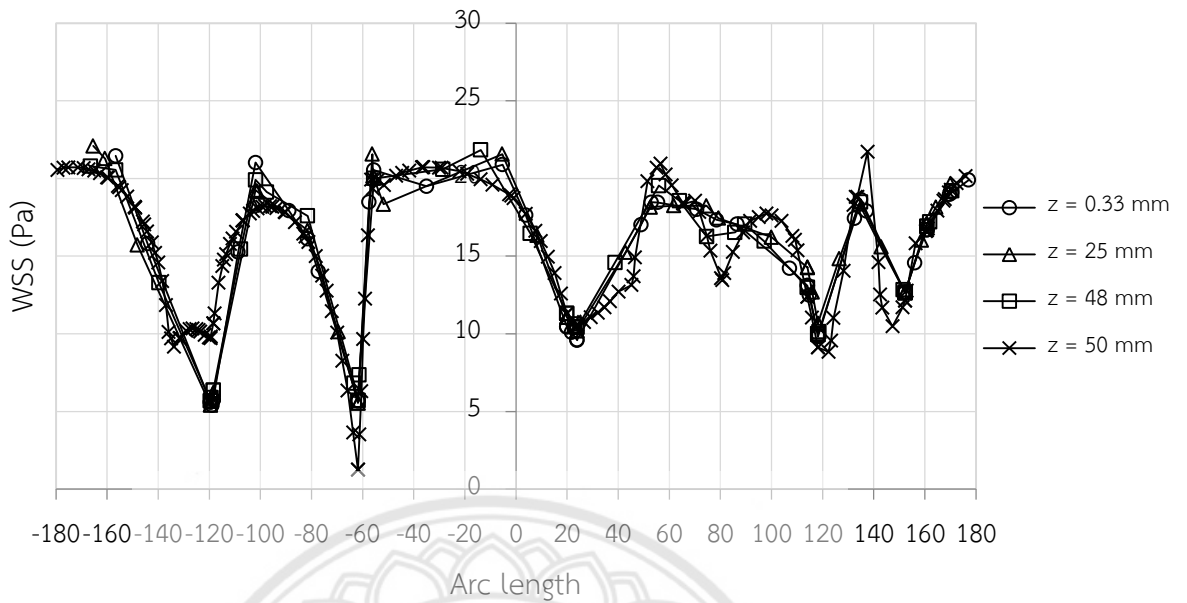
(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.13 โปรไฟล์ความเร็ว และการกระจายความเร็ว (Velocity Distribution) ภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงขนาด 0.0492 mm ที่ $z = 25 \text{ mm}$ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.8 \text{ ms}$) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)

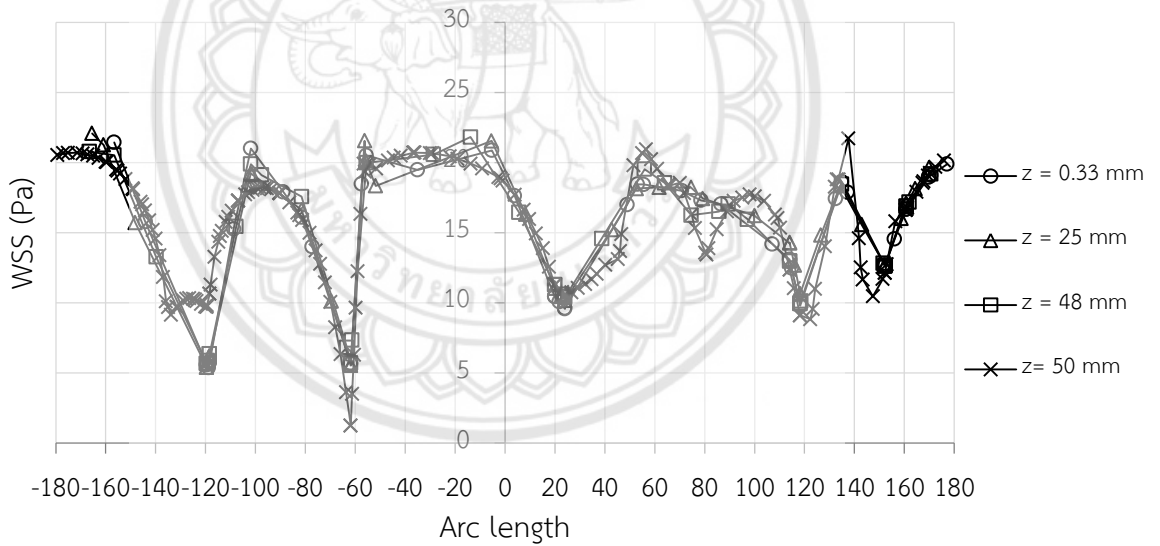
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบความเร็วสูงสุดบนโปรไฟล์ความเร็ววัดที่ $z = 25$ mm

D_h (mm)	ความเร็วสูงสุด (m/s)		% ความแตกต่าง
	สถานะไม่คงที่	สถานะคงที่	
0.033	0.2586	0.2587	0.03
0.0333	0.2545	0.2558	1.66
0.0364	0.3147	0.316	0.41
0.0492	0.625	0.633	1.20

รูปที่ 4.14 – 4.17 แสดงการกระจาย WSS ของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดไม่กลมที่มีขนาด D_h เท่ากับ 0.033, 0.0333, 0.0364 และ 0.0492 mm ของทั้งกรณีที่ไม่คงที่ และสถานะคงที่ (Steady State) โดยเริ่มพิจารณาค่าหนึ่งที่การไหลถูกพัฒนาอย่างเต็มที่ (Fully developed flow) ซึ่งก็คือที่ $z = 0.33, 0.333, 0.364$ และ 0.492 mm ตามลำดับ นอกจากนั้นจะพิจารณาที่ $z = 25, 48$ และ 50 mm ในทุก ๆ ท่อส่งน้ำเลี้ยง พบว่าความเค้นเฉือนที่ผนังในแต่ละท่อของทั้งสองกรณีมีรูปร่างคล้ายกัน เราจึงทำการเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของทั้งสองกรณี ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.4 ทั้งนี้เรากำหนดเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างได้จากสมการที่ (4.5)

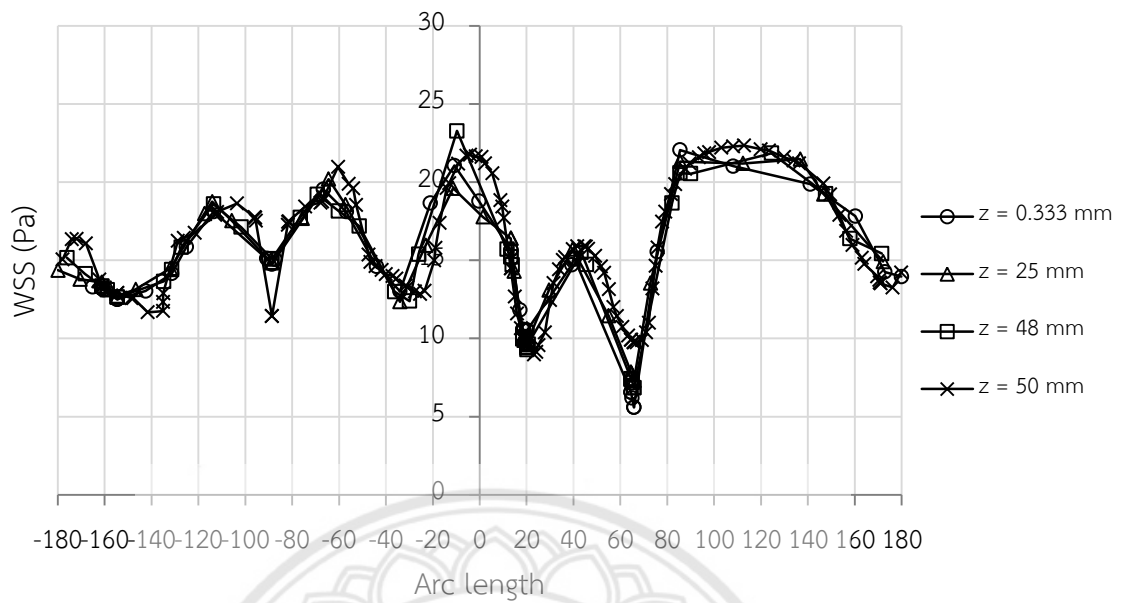


(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4 \text{ ms}$)

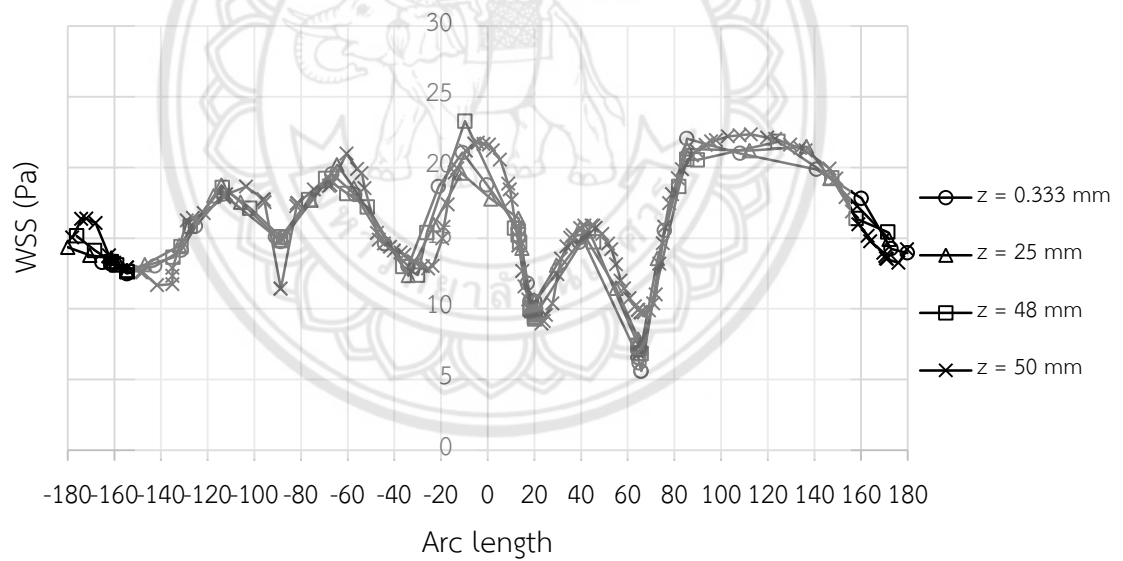


(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.14 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของท่อหน้าตัดไมกลมขนาด 0.033 mm ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4 \text{ ms}$) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)

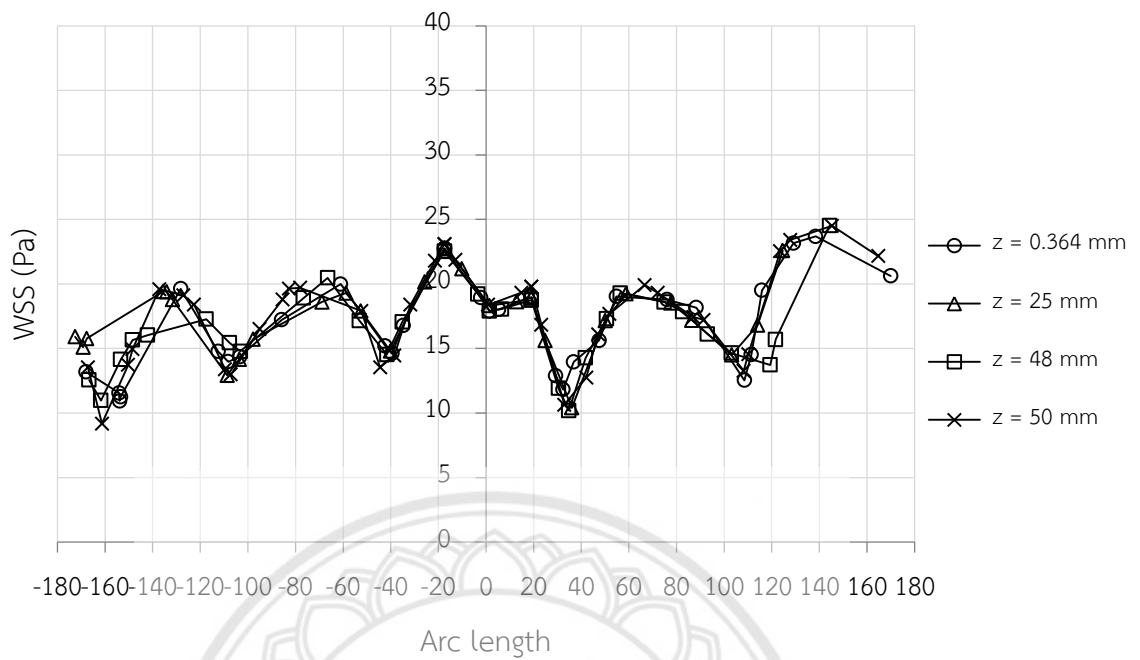


(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4 \text{ ms}$)

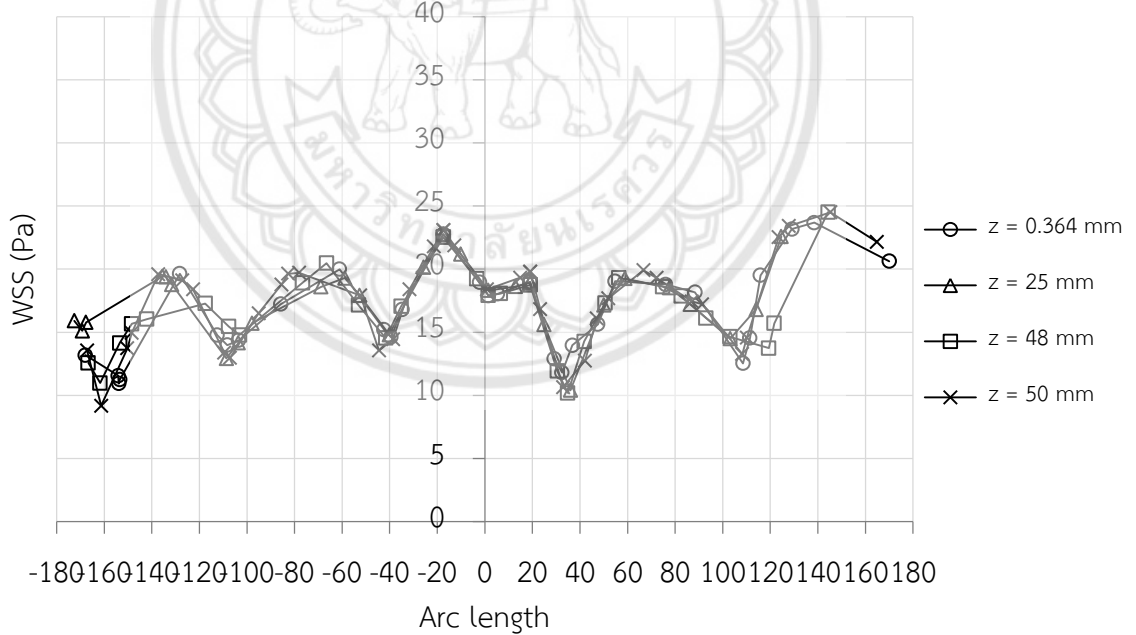


(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.15 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาด 0.0333 mm ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.4 \text{ ms}$) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)

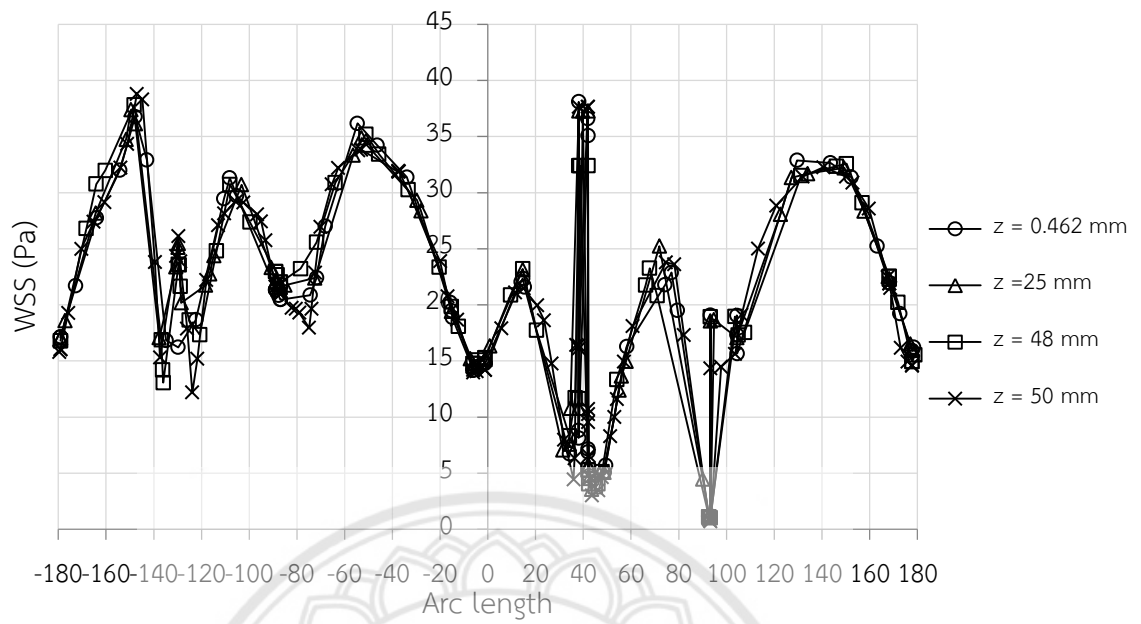


(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.5 \text{ ms}$)

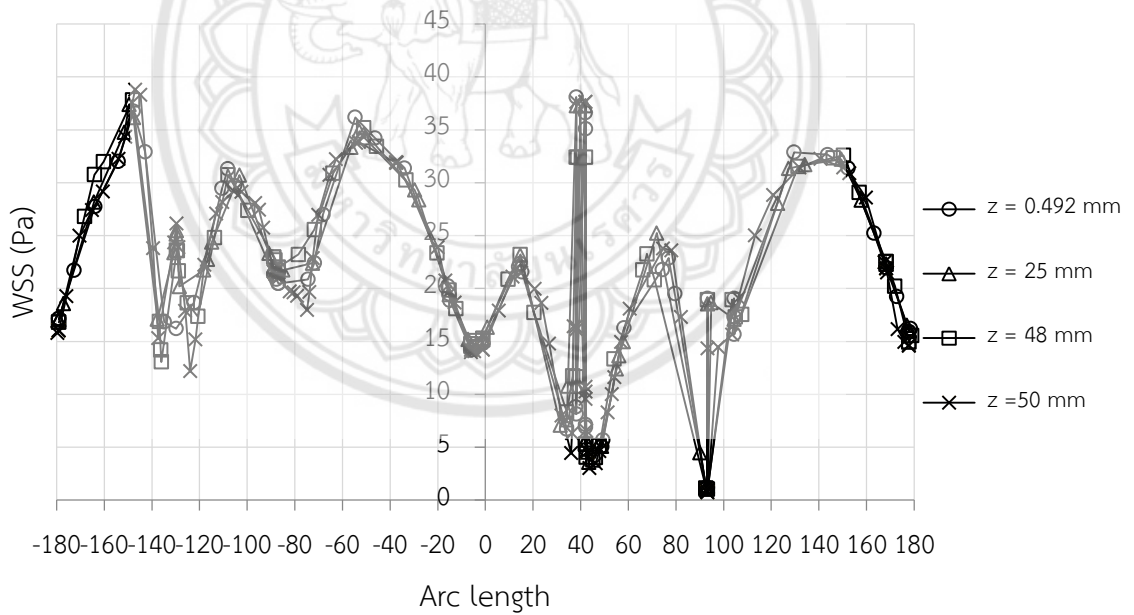


(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.16 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของท่อหน้าตัดไมกกลมขนาด 0.0364 mm ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.5 \text{ ms}$) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)



(a) การคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.8 \text{ ms}$)



(b) การคำนวณที่สภาวะคงที่ (Steady State)

รูปที่ 4.17 การกระจายความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของท่อหน้าตัดไม้กลมขนาด 0.0492 mm ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยการคำนวณที่สภาวะไม่คงที่ ($t = 0.8 \text{ ms}$) และที่สภาวะคงที่ (Steady State)

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเค้นเฉือนที่ผนังที่ตำแหน่งต่าง ๆ

D _h (mm)	ตำแหน่ง Z (mm)	$\bar{\tau}_w$ (Pa)		% ความแตกต่าง
		สถานะไม่คงที่	สถานะคงที่	
0.033	0.33	14.40	14.31	0.070
	25	14.40	14.39	0.069
	48	13.60	13.61	0.073
	50	15.23	15.22	0.056
0.0333	0.333	14.05	14.04	0.071
	25	14.28	14.27	0.070
	48	14.30	14.29	0.069
	50	15.53	15.52	0.064
0.0364	0.364	16.85	16.85	0.059
	25	17.72	17.71	0.056
	48	16.78	16.8	0.120
	50	17.74	17.73	0.060
0.0492	0.492	19.69	19.70	0.050
	25	19.80	19.84	0.200
	48	19.6	19.61	0.050
	50	20.17	20.18	0.049

เราสามารถพิจารณาสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) ของท่อหน้าตัดไม่กลมโดยอาศัยผลของความเร็ว (\bar{v}) และความเค้นเฉือนเฉลี่ยที่ผนัง ($\bar{\tau}_w$) ซึ่งในที่นี้เราจะแสดงการคำนวณค่า f ของท่อขนาด $D_h = 0.033$ mm ในสถานะที่การไหลไม่คงที่ ($t = 0.4$ ms) และที่สถานะคงที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$f_{0.4 \text{ ms}} = \frac{8\bar{\tau}_w}{\rho(\bar{v})^2} \quad (4.5)$$

แทนค่า

$$f_{0.4 \text{ ms}} = \frac{8 \times 16.014}{987.07 \times (0.1274)^2}$$

จะได้

$$f_{0.4 \text{ ms}} = 8.072$$

และในกรณีสถานะคงที่จะคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f_{\text{steady}} = \frac{8\bar{\tau}_w}{\rho(\bar{v})^2} \quad (4.6)$$

แทนค่า

$$f_{\text{steady}} = \frac{8 \times 16.071}{987.07 \times (0.1273)^2}$$

จะได้

$$f_{\text{steady}} = 8.038$$

และสำหรับการคำนวณหาค่า f ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาดเท่ากับ 0.0333, 0.0364 และ 0.0492 mm จะสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้น และจะได้ค่าสรุปดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเมื่อคิดเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ f ของท่อหน้าตัดไม่กลมขนาดต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณทั้งสองสถานะจะคิดเป็น 0.426, 0.259, 1.69 และ 0.77% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในแต่ละท่อนั้นมีค่าผลต่างน้อยมาก ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่าที่ท่อหน้าตัดไม่กลมมีสถานะคงที่เริ่มต้นที่ $t = 0.4, 0.4, 0.5$ และ 0.8 ms ตามลำดับ

จากผลการคำนวณข้างต้น สังเกตได้ว่าการไหลผ่านท่อส่งน้ำเลี้ยงของอ้อยใช้เวลาไม่นานมากใน การไหลเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยมี Order of magnitude ประมาณ 1 ms ดังนั้นหากจะทำการสร้าง เครื่องอัดยาฆ่าเชื้อราของท่อนพันธุ์อ้อยแทนการใส่ถังแช่นั้นเป็นวิธี Conventional จึงไม่น่าจะคุ้มทุน

ตารางที่ 4.5 สรุปผลการคำนวณของท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าไม่ตัดกลม

D_h (mm)	รูปแบบการคำนวณ	\bar{v} (m/s)	Re	$\dot{\gamma}_{av}$ (s ⁻¹)	$\bar{\tau}_w$ (Pa)	f	% difference
0.033	สภาวะไม่คงที่ (t = 0.4 ms)	0.1268	7.800	30,219	16.014	8.072	0.426 %
	สภาวะคงที่ (Steady state)	0.1273	7.825	30,326	16.071	8.038	
0.0333	สภาวะไม่คงที่ (t = 0.4 ms)	0.1257	7.800	30,272	16.042	8.200	0.259%
	สภาวะคงที่ (Steady state)	0.1263	7.834	30,376	16.098	8.179	
0.0364	สภาวะไม่คงที่ (t = 0.5 ms)	0.1543	10.460	32,838	17.400	5.900	1.690%
	สภาวะคงที่ (Steady state)	0.155	10.509	32,430	17.186	5.800	
0.0492	สภาวะไม่คงที่ (t = 0.8 ms)	0.295	27.034	40,427	21.420	1.990	0.770%
	สภาวะคงที่ (Steady state)	0.298	27.309	40,827	21.636	1.975	

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง


ในการศึกษาลักษณะการไหลภายในท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อน้อยเพื่อหาเวลาที่ของไหลใช้ในการเคลื่อนที่จากทางเข้าถึงบริเวณทางออก ซึ่งทำการศึกษาท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลม และหน้าตัดไม่กลม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในการวิเคราะห์ และจะแสดงผลการคำนวณในรูปแบบของความเร็ว อัตราเฉือน (Shear Rate) ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress, WSS หรือ τ_w) รวมทั้งสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor, f) ซึ่งจะมีรูปร่าง และขนาดของท่อส่งน้ำเลี้ยงที่เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การไหลภายในท่อใช้เวลาต่างกัน ซึ่งท่อส่งน้ำเลี้ยงหน้าตัดกลมที่มีขนาด 0.068 mm ใช้เวลาในการไหลเท่ากับ 1.7 ms ให้ค่า f เท่ากับ 1.065 และสังเกตได้ว่าที่ท่อหน้าตัดไม่กลมสามารถเรียงลำดับเวลาที่ใช้ในการไหลได้ ดังนี้ ท่อที่มีขนาด $D_h = 0.0492$ mm ใช้เวลาในการไหลมากที่สุดเท่ากับ 0.8 ms ถัดมาเป็นท่อขนาด $D_h = 0.0364$ mm ใช้เวลาเท่ากับ 0.5 ms และลำดับสุดท้ายที่ท่อขนาด $D_h = 0.0333$ และ 0.033 mm อยู่ที่ $t = 0.5$ ms เท่ากัน โดยที่ท่อขนาด $D_h = 0.033$ mm มี f มากที่สุด ต่อมาเป็นท่อขนาด $D_h = 0.0333$, 0.0492 และ 0.0364 mm ซึ่งมีค่า f อยู่ที่ 8.200, 8.072, 5.900 และ 1.990 ตามลำดับ จากผลการคำนวณข้างต้น สังเกตได้ว่าใช้เวลาในการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านท่อส่งน้ำเลี้ยงของท่อน้อยน้อยมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่จำเป็นต้องแช่ท่อนพันธุ์อ้อยในสารกำจัดเชื้อราเบนโนมิลเป็นเวลา 30 นาที และไม่คุ้มค่าในการสร้างเครื่องอัดยาฆ่าเชื้อราของท่อนพันธุ์อ้อย

เอกสารอ้างอิง

- [1] G.r. Cruz, P.A.S. Monteiro, C.E.M. Braz, P.S. Jr. and I.P.P.M. Crnkovic, (2013), "Investigation of porosity, wettability and morphological of the chemically pretreated sugarcane bagasse," *22nd International Congress of Mechanical Engineering*, Ribeirao Preto, SP, Brazil, 3-7 November 2013.
- [2] นายธวัช หะหมาน, (2560), *คนรักรัษอ้อย*, สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [3] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม, (2559), *คู่มือวินิจฉัยโรคอ้อย*, (พิมพ์ครั้งที่ 2).
- [4] X.N. Jiang, Z.Y. Zhou, J. Yao, Y. Li and X.Y. Ye, (1995), "Micro-fluid flow in microchannel," *Proc. Transducers*, 95, 317-320.
- [5] M. Sahu, K.K. Khatua, K.C Patra and T. Naik, (2009), "Developed laminar flow in pipe using computational fluid dynamics," *7th International R&D conference*, Bhubaneswar, India, 4-6 February 2009.
- [6] M.J. Kohl, S.I.A. Khalik, S.M. Jeter and D.L. Sadowski, (2005). "An experiment investigation of microchannel flow with internal pressure measurements," *International Journal of Heat and Mass Transfer Heat and Mass Transfer*, 48, 1518-1533.
- [7] A.M. Sahar, J. Wissink, M.M. Mahmoud, T.G. Karayiannis and M.S.A. Ishak, (2017), "Effect of hydraulic diameter and aspect ratio on single phase flow and heat transfer in a rectangular microchannel," *Applied Thermal Engineering*, 115, 793-814.

- [8] M. Akbari, M. Bahrami and D. Sinton. (2009). "Pressure drop in rectangular microchannels as compared with theory based on arbitrary cross section," *Journal of Fluids Engineering*, 131.
- [9] X. Wang, J. Zhang, G. Tian, L. Xue and W. Cao, (2014), "The unsteady flow characteristic research on the initial period flow of micro channel," *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6, 2020-2024.
- [10] W.R. Jong, T.H. Kuo, S.w. Ho, H.H. Chiu and S.H. Peng, (2006), "Flow in rectangular microchannels driven by capillary force and gravity," *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 34, 186-196.
- [11] Frank M. White, (2008), Fluid Mechanics, 6th edition, McGraw Hill.



	ชื่อ	นางสาวสุรีพร มหาวี
	เกิดเมื่อ	27 สิงหาคม พ.ศ. 2539
	ภูมิลำเนา	81 หมู่ 4 ตำบลบ้านกลาง อำเภอสอง จังหวัดแพร่ 54120
	ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนสองพิทยาคม อำเภอสอง จังหวัดแพร่ ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
E-mail	std.sureeporn@gmail.com	

