



การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของเลือดผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน  
Numerical study of blood flow through occluded bifurcations

นายรัชชัย ดอนไพรัตน์ รหัส 54360636  
นางสาวนันท์ทิศา พันธุระ รหัส 54360667  
นางสาวเพ็ญพิชชา น้อยเดช รหัส 54360759

ชื่อผู้ลงทะเบียน	รัชชัย ดอนไพรัตน์
วันที่รับ	3.0.ก.ย. 2558
เลขทะเบียน	16914573
ชื่อผู้ลงทะเบียน	ร.ร.
ชื่อผู้ลงทะเบียน	ธ 394 ก

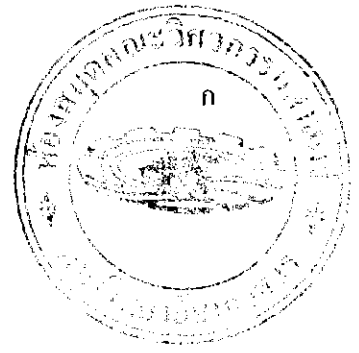
2697

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอโยธยา

ปีการศึกษา 2557



## ใบรับรองโครงการงาน

หัวข้อโครงการงาน : การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของเลือดผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน  
Numerical study of blood flow through occluded bifurcations

ผู้ดำเนินโครงการงาน : นายธวัชชัย ดอนไพระอ่อน รหัสนิต 54360636  
นางสาวนันทิตา พันธุระ รหัสนิต 54360667  
นางสาวเพ็ญพิชชา น้อยเดช รหัสนิต 54360759

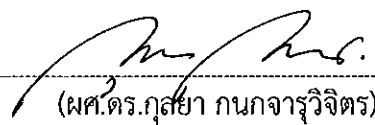
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

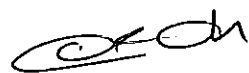
ปีการศึกษา : 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการงาน

  
(ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारูจิตร)

ประธานกรรมการ



กรรมการ

(ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)



กรรมการ

(รศ.ดร. มัทนี สงวนเสริมศรี)

หัวข้อโครงการ : การศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของเลือดผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน

ผู้ดำเนินโครงการ : นายธวัชชัย ดอนไพรอ่อน รหัสนิต 54360636  
 นางสาวนันทิตา พันธูระ รหัสนิต 54360667  
 นางสาวเพ็ญพิชชา น้อยเดช รหัสนิต 54360759

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.กฤษยา กนกजारุจิตร

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2557

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไหลเชิงตัวเลขของเลือดแบบ Non-Newtonian ที่สภาวะคงที่ผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามของหลอดเลือดแดงที่หัวใจด้านขวาที่อุดตันในกรณีต่างๆ โดยการจำแนกของ Movahed [1] โดยกำหนดให้เลือดประพฤติตนตามแบบจำลอง Carreau-Yasuda ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยหลอดเลือดหลักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร หลอดเลือดแขนงหลักมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร และหลอดเลือดแขนงรองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 มิลลิเมตร ซึ่งลักษณะของหลอดเลือดมี 2 แบบ คือแบบ Y หลอดเลือดแขนงทำมุมกัน 60 องศาและแบบ T หลอดเลือดแขนงทำมุมกัน 110 องศา โดยลักษณะการอุดตันจะมีทั้งแบบการอุดตันแขนงเดียวและการอุดตันทั้งสองแขนง โดยมี  $Re_D$  คัดที่ทางเข้าหลอดเลือดหลักเท่ากับ 233 ตรงกับจังหวะคลายตัว (diastole) ของหัวใจ โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน คือ (1) ศึกษาการกระจาย WSS ของหลอดเลือดปกติแบบ Y และ T พบว่า WSS มีลักษณะคล้ายกันคือ ที่บริเวณหลอดเลือดหลัก WSS จะมีค่าปกติ (1-1.5 Pa) จากนั้นลดลงเล็กน้อยที่บริเวณ Bifurcation เนื่องจากพื้นที่การไหลขยายใหญ่ขึ้นและการไหลแยกเข้าสู่หลอดเลือดแขนง จากนั้นเมื่อเข้าสู่หลอดเลือดแขนงค่า WSS จะค่อยๆเข้าสู่ค่าปกติ (2) ศึกษาการกระจาย WSS ของหลอดเลือดที่มีการอุดตันที่ระดับการอุดตัน 60% พบว่าที่บริเวณหลอดเลือดหลัก WSS มีลักษณะคล้ายกับหลอดเลือดปกติ แต่เมื่อเข้าสู่บริเวณ Bifurcation ค่า WSS จะลดต่ำกว่าระดับปกติ เมื่อเข้าสู่บริเวณที่เกิดการอุดตัน WSS จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณที่มีพื้นที่การ

ไหลน้อยที่สุด จากนั้นเมื่อออกจากบริเวณที่มีพื้นที่การไหลน้อย WSS จะลดลงอย่างรวดเร็วจนเข้าใกล้ 0 เป็นผลมาจากเกิด Flow Separation และ/หรือ Back Flow และสุดท้าย (3) ศึกษาผลของระดับการอุดตันที่ 30%, 40%, 50% และ 60% พบว่ากรณีการอุดตันแบบ 1m ให้ค่า WSS สูงสุดที่ระดับการอุดตัน 60% ส่วนกรณีการอุดตันแบบ 1s และ T ให้ค่า WSS สูงสุดที่ระดับการอุดตัน 40% แต่เมื่อการไหลออกจากบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุด ที่ระดับการอุดตันสูงที่สุด WSS จะลดลงต่ำที่สุด (WSS: 60% < 50% < 40% < 30%)





Project Title : Numerical study of blood flow through occluded bifurcations  
Name : Mr. Thawatchai Donprai-on  
Ms. Nanthita Phanthura  
Ms. Penphitcha Noidet  
Project Advisor : Assist. Prof. Dr. Koonlaya Kanokjaruvijit  
Academic Year : 2014

---

### Abstracts

This project is to numerically study about non-Newtonian blood flow through occluded bifurcations of right coronary artery in various cases by using the classification of Movahed [1]. The blood behaves in accordance with Carreau-Yasuda model. The finite element method was used. The artery, itself, was divided into 3 parts: main artery of 4 mm diameter, main branch artery of 3.2 mm diameter and secondary branch artery of 2.8 mm diameter. Two artery shapes were examined: Y-shape with  $60^\circ$  bifurcation angle and T-shape of  $110^\circ$ . The occlusions were found at either internal or external wall or both and either one branch or both branches. Reynolds number of 233 based on the main artery diameter was fixed throughout the study, which corresponds to the diastole. The computational results of the flow through the normal Y-types and T-types showed that, at the beginning WSS distribution gave normal values around 1-1.5 Pa. Then it decreased slightly at bifurcation region, because the flow area was expanded. The blood flow through branch arteries, WSS showed that slowly increased back to the normal values. In addition, the WSS distribution of 60% occlusion case presented the normal values in the main artery, lower than normal in the bifurcation and rapidly increased at the

occluded regions, the WSS was reduced rapidly and approached zero. This could be explained by the fact that the flow separation and/or back flow occurred at the end of occlusion. Finally, different levels of occlusion of 30%, 40%, 50% and 60% were investigated, 1m-type of occlusion gave the highest WSS at 60% level. 1s- and T-type of occlusion presented the highest WSS at 40% level. However, once the flow escaped from the narrowest flow area, the 60% occlusion level showed the most reduction in WSS, followed by 50%, 40% and 30%, respectively.



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.กุลยา กนกจาร์วิจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนถึงติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้แก่ผู้ดำเนินงาน ขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงการ ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและสั่งสอนจนกระทั่งสามารถเติบโตมาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนช่วยอุปการะทางการเงินและคอยให้กำลังใจ จนกระทั่งโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว และ รศ.ดร.มัทนี สงวนเสริมศรี ที่เสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการ ขอขอบพระคุณพีจีระพันธ์ พิมพ์ภา และ พื่อภิลิทธิ พงษ์จันทร์ สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอขอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการนี้ แต่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ ผู้ดำเนินงานต้องกราบขอภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายรัชชัย                      ตอนไพเราะอ่อน

นางสาวนันทิตา                พันธุ์ระ

นางสาวเพ็ญพิชชา            น้อยเดช

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ง
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
ลำดับสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 วิธีการดำเนินโครงการ	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	7
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ	7
1.7 งบประมาณที่ใช้	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	9
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.2 ทฤษฎีการไหลชั้นขอบเขต (Boundary Layer Theory)	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 วรรณกรรมปริทัศน์	12
บทที่ 3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน	20
3.1 หลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ (ไม่มีส่วนที่อุดตัน)	20
3.2 หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน	24
3.3 หลอดเลือดแยกสองง่ามกรณีรูปตัว T (ไม่มีส่วนที่อุดตัน)	38
3.4 หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันรูปตัว T	42
บทที่ 4 ขั้นตอนการคำนวณ	48
4.1 โดเมนการคำนวณ (Computational Domain)	48
4.2 สมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณการไหลของเลือด	50
4.3 การนำไฟล์เขียนแบบเข้าไปใน COMSOL	53
4.4 การสร้างเมชและการตรวจสอบผลของความหนาแน่นของเมช	53
บทที่ 5 ผลการคำนวณและอภิปรายผล	58
5.1 หลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ	58
5.2 หลอดเลือดแยกสองง่ามกรณีการอุดตันรูปแบบต่างๆ	68
5.3 ผลของระดับการอุดตันที่มีผลต่อค่า WSS	96
5.4 การเปรียบเทียบ WSS ของหลอดเลือดอุดตันรูปตัว Y และ T	101
บทที่ 6 สรุปผลการคำนวณ	104

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	106
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของส่วนที่อุดตัน	108
ภาคผนวก ข การ Import file การสร้างเมชและการคำนวณในโปรแกรม COMSOL	113
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	120



## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	7
ตารางที่ 4.1	ความหนาแน่นของเมชที่ใช้ในการทดสอบ	55
ตารางที่ 4.2	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า WSS ที่หน้าตัด X-X'	56
ตารางที่ 4.3	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า WSS ที่หน้าตัด Y-Y'	57
ตารางที่ ก.1	พื้นที่การอุดตัน มุม และความสูงของหลอดเลือดแขนงหลักและแขนงรองที่ ระดับการอุดตันต่างๆ	111



## สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 1.1	แบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่าม	3
รูปที่ 1.2	รูปทรง tetrahedral	4
รูปที่ 1.3	ขั้นตอนการดำเนินงานและ Data Reduction	6
รูปที่ 2.1	ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อลักษณะชั้นขอบเขตการไหล [6]	12
รูปที่ 2.2	ขดลวด [7]	13
รูปที่ 2.3	การแสดงตัวของขดลวดบนแผ่นเรียบ	13
รูปที่ 2.4	แสดงพื้นที่ในการไหลภายในขดลวด	14
รูปที่ 2.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Apparent Blood Viscosity [3]	16
รูปที่ 2.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Shear Stress [3]	16
รูปที่ 2.7	ลักษณะท่อโค้ง $90^{\circ}$ [5]	17
รูปที่ 2.8	โปรไฟล์ความเร็ว Dean vortex และลักษณะเส้นเค้าโคจรความเร็วที่ begin diastole [5]	18
รูปที่ 2.9	ลักษณะของหลอดเลือดที่คอค [6]	19
รูปที่ 2.10	โปรไฟล์ความเร็วและลักษณะเส้นเค้าโคจรความเร็วของการไหล Newtonian เทียบกับ non-Newtonian [6]	19
รูปที่ 3.1	กรณีการอุดตันของหลอดเลือดแยกสองง่าม	20
รูปที่ 3.2	สรุปขั้นตอนแนวคิดการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ	21
รูปที่ 3.3	การกำหนดพื้นที่เบื้องต้นในการเขียนแบบ	21
รูปที่ 3.4	การกำหนดขนาดและสร้างแกนของแบบร่างหลอดเลือด	22
รูปที่ 3.5	การสร้างวงกลมในระนาบเพื่อเตรียมสร้างหลอดเลือดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ	22
รูปที่ 3.6	แบบร่างของหลอดเลือดทั้งสามที่มีลักษณะเป็นทรงตัน	23



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.7	แบบจำลองของหลอดเลือดแยกสองง่ามที่เสร็จสมบูรณ์หลังจากใส่ส่วน Bifurcation เชื่อมกระบอกทั้งสาม	24
รูปที่ 3.8	สรุปขั้นตอนแนวคิดการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน	24
รูปที่ 3.9	ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	25
รูปที่ 3.10	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	26
รูปที่ 3.11	พื้นที่การอุดตันส่วนที่จะตัดออก	26
รูปที่ 3.12	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก	27
รูปที่ 3.13	หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณี 1m ที่มีระดับการอุดตัน 50%	27
รูปที่ 3.14	ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงรอง	28
รูปที่ 3.15	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	29
รูปที่ 3.16	พื้นที่การอุดตันส่วนที่จะตัดออก	29
รูปที่ 3.17	หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณี 1s ที่มีระดับการอุดตัน 50%	30
รูปที่ 3.18	ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงรอง	30
รูปที่ 3.19	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	31
รูปที่ 3.20	พื้นที่การอุดตันส่วนที่จะตัดออก	31
รูปที่ 3.21	ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	32
รูปที่ 3.22	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.23	หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณี S ที่มีระดับการอุดตัน 50%	33
รูปที่ 3.24	ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	34
รูปที่ 3.25	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	34
รูปที่ 3.26	พื้นที่การอุดตันส่วนที่จะตัดออก	35
รูปที่ 3.27	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก	35
รูปที่ 3.28	ลักษณะการอุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก	36
รูปที่ 3.29	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงรอง	37
รูปที่ 3.30	หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณี L-2-V ที่มีระดับการอุดตัน 50%	37
รูปที่ 3.31	สรุปขั้นตอนแนวคิดการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติกรณีตัว T	38
รูปที่ 3.32	การกำหนดพื้นที่เบื้องต้นในการเขียนแบบ	39
รูปที่ 3.33	การกำหนดขนาดและสร้างแกนของแบบร่างหลอดเลือด	39
รูปที่ 3.34	การสร้างวงกลมในระนาบเพื่อเตรียมสร้างหลอดเลือดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ	40
รูปที่ 3.35	แบบร่างของหลอดเลือดทั้งสามที่มีลักษณะเป็นทรงตัน	40
รูปที่ 3.36	แบบจำลองของหลอดเลือดแยกสองง่ามที่เสร็จสมบูรณ์หลังจากใส่ส่วน Bifurcation เชื่อมกระบอกทั้งสาม	41
รูปที่ 3.37	สรุปขั้นตอนแนวคิดการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณีตัว T	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.38	ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	43
รูปที่ 3.39	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	43
รูปที่ 3.40	พื้นที่การอุดตันส่วนที่จะตัดออก	44
รูปที่ 3.41	ลักษณะการอุดตันของหลอดเลือดแขนงกรณี T	44
รูปที่ 3.42	ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	45
รูปที่ 3.43	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก	45
รูปที่ 3.44	พื้นที่การอุดตันส่วนที่จะตัดออก	46
รูปที่ 3.45	ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก	46
รูปที่ 3.46	หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณี T ที่มีระดับการอุดตัน 50%	47
รูปที่ 4.1	โดเมนการคำนวณของหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ (ไม่มีส่วนอุดตัน)	49
รูปที่ 4.2	โดเมนการคำนวณหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันแบบต่างๆที่การอุดตัน 50%	50
รูปที่ 4.3	แผนภาพแสดงการคำนวณ (Flowchart)	52
รูปที่ 4.4	รูปทรง tetrahedral	53
รูปที่ 4.5	การสร้างเมชในโดเมนการคำนวณ	54
รูปที่ 4.6	หน้าตัดของหลอดเลือดที่นำมาคำนวณ	54
รูปที่ 4.7	การกระจายของค่าความเค้นเฉือนที่ผนังตามผนังหลอดเลือดหลัก X-X'	56
รูปที่ 4.8	การกระจายของค่าความเค้นเฉือนที่ผนังตามผนังหลอดเลือดหลัก Y-Y'	57
รูปที่ 5.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนงทั้งสองของหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.2	สนามความเร็วของหลอดเลือดหลักที่หน้าตัดต่างๆ ของหลอดเลือดปกติ 59
รูปที่ 5.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือด แขนงทั้งสองของหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติแบบตัว T 60
รูปที่ 5.4	สนามความเร็วของหลอดเลือดหลักที่หน้าตัดต่างๆ ของหลอดเลือดปกติแบบ ตัว T 61
รูปที่ 5.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือด แขนงหลัก (พื้นที่อุดตัน 60%) 62
รูปที่ 5.6	Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ 1m 63
รูปที่ 5.7	WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก กรณีการอุดตัน รูปแบบ 1m 65
รูปที่ 5.8	สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ 1m 65
รูปที่ 5.9	สนามความเร็วของหลอดเลือดหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ 1m 66
รูปที่ 5.10	สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ 1m 67
รูปที่ 5.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือด แขนงรอง (พื้นที่อุดตัน 60%) 68
รูปที่ 5.12	Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ 1s 69
รูปที่ 5.13	WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง กรณีการอุดตัน รูปแบบ 1s 70
รูปที่ 5.14	สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ 1s 71

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.15	สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรอง ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ 1s	72
รูปที่ 5.16	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนง (พื้นที่อุดตัน 40%)	73
รูปที่ 5.17	Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ S	73
รูปที่ 5.18	WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก (ด้านนอก) กรณีการอุดตันรูปแบบ S	74
รูปที่ 5.19	สนามความเร็วของหลอดเลือดหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ S	75
รูปที่ 5.20	สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ S	76
รูปที่ 5.21	สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ S	76
รูปที่ 5.22	WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง (ด้านใน) กรณีการอุดตันรูปแบบ S	77
รูปที่ 5.23	สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรอง ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ S	78
รูปที่ 5.24	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนง (พื้นที่อุดตัน 60%)	79
รูปที่ 5.25	Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ L-2-V	80
รูปที่ 5.26	WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 5.27	สนามความเร็วของหลอดเลือดหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V	83
รูปที่ 5.28	สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V	83
รูปที่ 5.29	สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ L-2-V	84
รูปที่ 5.30	WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง กรณีการอุดตัน รูปแบบ L-2-V	86
รูปที่ 5.31	สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรอง ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V	87
รูปที่ 5.32	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือด แขนงหลัก (พื้นที่อุดตัน 60%)	88
รูปที่ 5.33	Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ T	88
รูปที่ 5.34	WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก กรณีการอุดตัน รูปแบบ T	90
รูปที่ 5.35	สนามความเร็วของหลอดเลือดหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ T	91
รูปที่ 5.36	สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ T	91
รูปที่ 5.37	สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ T	92
รูปที่ 5.38	WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง กรณีการอุดตัน รูปแบบ T	94

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 5.39	สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรอง ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ T	95
รูปที่ 5.40	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS หลอดเลือดแขนงรองที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60% กรณีการอุดตันรูปแบบ 1m	97
รูปที่ 5.41	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS หลอดเลือดแขนงรองที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60% กรณีการอุดตันรูปแบบ 1s	98
รูปที่ 5.42	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS หลอดเลือดแขนงหลักที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60% กรณีการอุดตันรูปแบบ T	99
รูปที่ 5.43	ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS หลอดเลือดแขนงรองที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60% กรณีการอุดตันรูปแบบ T	100
รูปที่ 5.44	เปรียบเทียบ WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลักรูปตัว Y และตัว T	102
รูปที่ 5.45	เปรียบเทียบ WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรูปตัว Y และตัว T	103
รูปที่ ก.1	cross section บริเวณที่เกิดโรค 1 ด้าน และ 2 ด้าน	109
รูปที่ ก.2	พื้นที่หน้าตัดของหลอดเลือดกรณีการเกิดการอุดตัน 1 ด้าน	109
รูปที่ ก.3	พื้นที่หน้าตัดของหลอดเลือดกรณีการเกิดการอุดตัน 2 ด้าน	109
รูปที่ ก.4	ลักษณะของเซกเมนต์ของวงกลม	110
รูปที่ ก.5	หลอดเลือดหลังทำการตัดให้เหลือพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่จะตรวจสอบ	112
รูปที่ ก.6	การตรวจสอบพื้นที่การไหลของเลือดโดยการใช้โปรแกรม Solidworks	112
รูปที่ ข.1	การเข้าโปรแกรม COMSOL	114
รูปที่ ข.2	การ Import file เข้า COMSOL	114

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ ข.3	การแสดงผลแบบจำลองที่ Import file เข้า COMSOL	115
รูปที่ ข.4	แบบจำลองที่มีการสร้างเมช	115
รูปที่ ข.5	วิธีคำนวณข้อมูลใน COMSOL	116
รูปที่ ข.6	วิธีคำนวณข้อมูลใน COMSOL เมื่อใส่ค่า	116
รูปที่ ข.7	หน้าต่างการกำหนดพื้นผิวของแบบจำลอง	117
รูปที่ ข.8	การกำหนดพื้นผิวของแบบจำลอง	117
รูปที่ ข.9	การเข้าสู่การคำนวณใน COMSOL	118
รูปที่ ข.10	หน้าต่างแสดงความคืบหน้าของการคำนวณ	118
รูปที่ ข.11	ผลการคำนวณแบบจำลองของโปรแกรม COMSOL	119





## ลำดับสัญลักษณ์

$D$	เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดเลือดหลัก
$d$	เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดเลือดแขนง
$v_0$	ความเร็วที่ทางเข้าหลอดเลือดหลัก
$\mu$	ความหนืด
$p$	ความดัน
$u$	ความเร็วการไหลในแนวแกน $x$
$v$	ความเร็วการไหลในแนวแกน $y$
$w$	ความเร็วการไหลในแนวแกน $z$
$\alpha$	มุม Bifurcation
$\dot{\gamma}$	อัตราเฉือน
$n$	ค่าคงที่ของแบบจำลอง
$\mu_0$	ความหนืดเนื่องจากความเค้นเฉือนศูนย์
$\mu_\infty$	ความหนืดเนื่องจากความเค้นเฉือนอนันต์
$\rho$	ความหนาแน่น
$\tau_w$	ความเค้นเฉือนที่ผนัง
$\tau_0$	ความเค้นเฉือนที่จุดคราก
$\lambda$	ค่าคงที่เวลา
$A$	พื้นที่หน้าตัดส่วนที่อุดตัน
$h$	ความสูงของส่วนที่อุดตัน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

จากข้อมูลสถิติขององค์การอนามัยโลกในปี 2553 พบว่ามีผู้เสียชีวิตจากโรคหลอดเลือดหัวใจ 7.2 ล้านคน หรือคิดเป็น 12.2 % ของสาเหตุการเสียชีวิตทั้งหมด ปี 2548-2552 คนไทยป่วยเป็นโรคหัวใจต้องนอนโรงพยาบาล วันละ 1,185 ราย โดยเป็นโรคกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดประมาณ 450 รายต่อวัน เสียชีวิตชั่วโมงละ 2 คน ผู้ป่วยโรคกล้ามเนื้อหัวใจตายเฉียบพลันจะมีอัตราการตายเฉียบพลันสูงกว่าโรคอื่นประมาณ 4-6 เท่า พื้นที่ที่มีอัตราการเสียชีวิตเกิน 23 คนต่อประชากรแสนคน จำนวน 38 จังหวัด [2] โรคเส้นเลือดหัวใจตีบตันเกิดจากภาวะเส้นเลือดตีบแข็งที่เรียกว่า Atherosclerosis ซึ่งเริ่มก่อตัวตั้งแต่วัยเด็กและค่อยๆ พอกตัวบริเวณผนังภายใน เส้นเลือดทั่วร่างกาย จนทำให้เส้นเลือดตีบตัน ส่งผลให้มีอาการเจ็บแน่นหน้าอกตรงกลางร้าวไปไหล่ซ้ายและแขนซ้าย ปวดร้าวขึ้นไปตามคอ อาการเป็นมากขึ้นเวลาออกแรง นั่งพักจะดีขึ้น ถ้ามีเส้นเลือดหัวใจตีบมากจนตัน จะทำให้มีการขาดเลือดอย่างรุนแรงของกล้ามเนื้อหัวใจ จนเกิดภาวะ กล้ามเนื้อหัวใจตาย (Heart failure) ซึ่งจะมีอาการเจ็บแน่นหน้าอกรุนแรง กระสับกระส่าย เหงื่อออกตัวเย็น

โครงการนี้จึงมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันในกรณีต่างๆไปเป็นข้อมูลทางการแพทย์ โดยอาจจะนำไปใช้ประเมินความรุนแรงของภาวะไขมันอุดตันในหลอดเลือด และนำไปใช้ประกอบการวางแผนการรักษาของแพทย์เพื่อการรักษาที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาการไหลของเลือดแบบ Non-Newtonian ที่ไหลผ่านหลอดเลือดหัวใจแยกสองง่ามที่อุดตันในกรณีต่างๆโดยใช้แบบจำลอง Carreau-Yasuda โดยพิจารณาการกระจายความเร็วและความเค้นเฉือนที่ผนังหลอดเลือดด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.2 เปรียบเทียบการไหลของเลือดที่ไหลผ่านหลอดเลือดหัวใจแยกสองง่ามระหว่างหลอดเลือดที่อุดตันกับหลอดเลือดปกติ

1.2.3 ศึกษาผลของระดับการอุดตันที่ระดับ 30%, 40% 50% และ 60% ว่ามีผลอย่างไรต่อค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1.3.1 การไหลของเลือดผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณีต่างๆตามการจำแนกของ Movahed [1]

1.3.2 การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

1.3.3 เป็นการไหลใน 3 มิติ

1.3.4 สภาวะคงที่ (Steady State)

1.3.5 เลือดเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow)

1.3.6 เลือดเป็นของไหลแบบ non-Newtonian และประพฤติตนตามแบบจำลอง Carreau-Yasuda

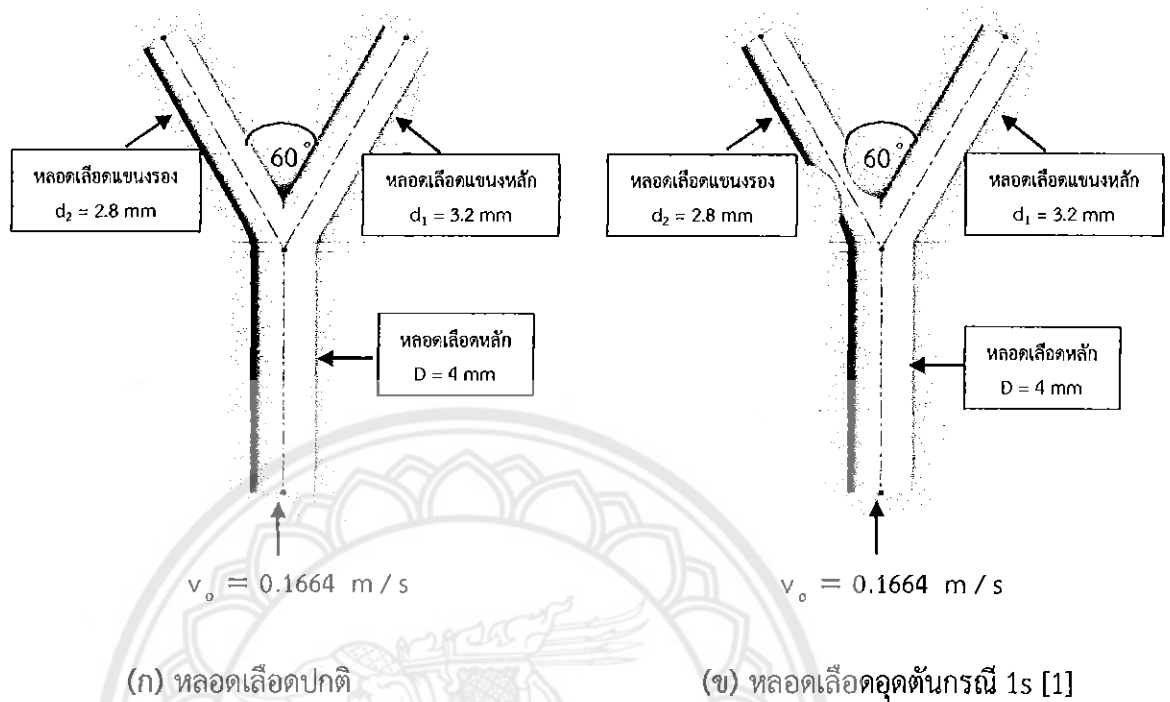
1.3.7 ผนังหลอดเลือดแข็งเกร็ง (Rigid Vessel Wall) กล่าวคือ ของไหลที่ผนังท่ออยู่ที่สภาวะไม่ลื่นไถล (No-Slip condition)

1.3.8 ความหนาแน่นของเลือดมีค่า  $1050 \text{ kg/m}^3$  [3]

### 1.4 วิธีการดำเนินโครงการงาน

1.4.1 ทำวรรณกรรมปริทัศน์ที่เกี่ยวกับการไหลของเลือด

1.4.2 เขียนแบบหลอดเลือดแยกสองง่าม 3 มิติ ทั้งแบบหลอดเลือดปกติและหลอดเลือดอุดตันที่ระดับต่างๆ ได้แก่ 30%, 40%, 50% และ 60% ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่าม

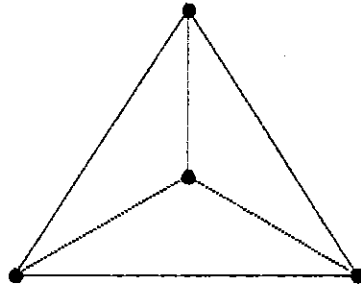
1.4.3 Import File เขียนแบบของจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามเข้าโปรแกรม COMSOL โดยบันทึกข้อมูลในรูปแบบของ File STEP AP203

1.4.4 กำหนดความเร็วที่ทางเข้าของหลอดเลือดหลักโดยใช้  $Re = 233$  [4], ความหนืดของเลือดที่อุณหภูมิ  $37^{\circ}C$   $\mu = 3 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$  [4] ซึ่งตรงกับจังหวะคายตัวของหัวใจ (Diastole) [5] จะทำให้ได้อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ขาเข้า ( $Q_0$ ) เป็น  $2.0914 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  และความเร็ว ( $v_0$ ) เป็น  $0.1664 \text{ m/s}$

1.4.5 กำหนดให้เลือดไหลออกที่ทางออกของหลอดเลือดสาขาทั้งสอง โดยไหลสู่บรรยากาศที่ความดันเกจเป็นศูนย์

1.4.6 ความเร็วของของไหลที่ผนังมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากสถานะไม่ลื่นไถล (No-Slip condition)

1.4.7 สร้างเมช (Mesh) ในโดเมนการคำนวณของการไหลโดยเป็นรูปทรง tetrahedral ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 รูปทรง tetrahedral

1.4.8 ดำเนินการคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้สมการ (Governing Equations)

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.1)$$

สมการโมเมนตัม (Navier-Stokes Equations)

โมเมนตัมในแนวแกน x :

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (1.2)$$

โมเมนตัมในแนวแกน y :

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (1.3)$$

โมเมนตัมในแนวแกน z :

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (1.4)$$

โดยกำหนดให้ค่าความหนืดพลวัตในสมการโมเมนตัมเป็นไปตามสมการแบบจำลอง Carreau-Yasuda [3]

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2} \quad (1.5)$$

เมื่อ

$\mu_{\infty}$  คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นอนันต์ ในกรณีของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.00345 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$

$\mu_0$  คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์ ในกรณีของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.056 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$

$\lambda$  คือ ค่าคงที่ ในกรณีของไหลเป็นเลือดมีค่า  $3.313 \text{ s}$

$\dot{\gamma}$  คือ อัตราเฉือน (Shear rate) มีหน่วย ต่อวินาที

$n$  คือ ค่าคงที่ไร้หน่วย ในกรณีของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.3568$

ผลลัพธ์จะอยู่ในรูปของ  $u$  (ความเร็วในแนวแกน  $x$ ),  $v$  (ความเร็วในแนวแกน  $y$ ),  $w$  (ความเร็วในแนวแกน  $z$ ),  $p$  (ความดัน) และ  $\mu$  (ความหนืดพลวัต) สำหรับการแสดงผลจะอยู่ในรูปของอัตราเฉือน (Shear rate) และ/หรือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress) ดังนี้

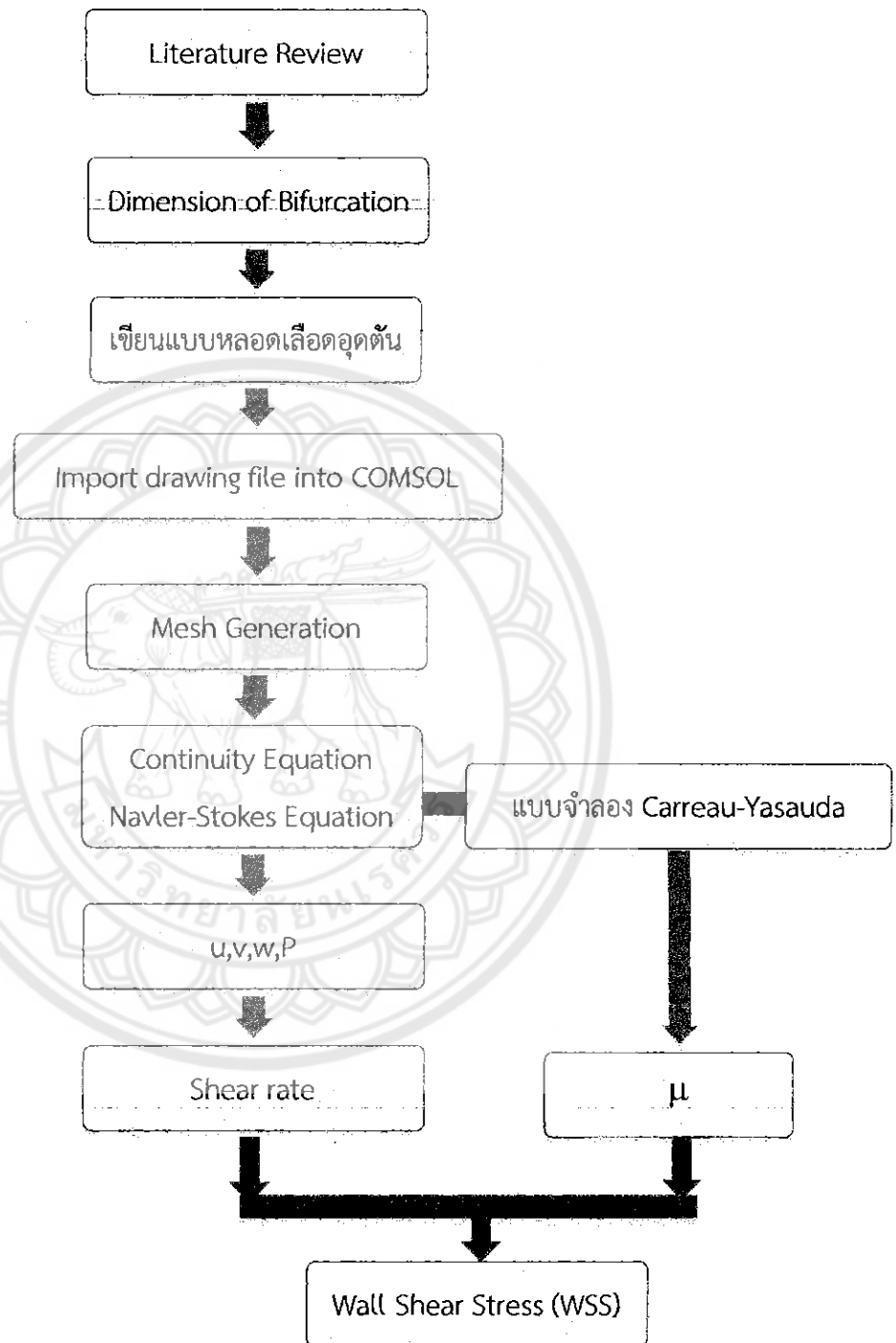
อัตราเฉือน (Shear rate)

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (1.6)$$

และความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress)

$$\text{WSS} = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (1.7)$$

โดยที่ขั้นตอนการดำเนินโครงการทั้งหมดได้สรุปเป็นแผนผังของ Data Reduction ในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานและ Data Reduction





## 1.7 งบประมาณที่ใช้

1.7.1 ค่ากระดาษ	500	บาท
1.7.2 ค่าจัดทำรูปเล่ม	1000	บาท
1.7.3 ค่าวัสดุอุปกรณ์อื่นๆ	1500	บาท



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณในที่นี้เป็นสมการควบคุม (Governing Equations) ซึ่งใน  
โครงการนี้จะประกอบไปด้วย 2 สมการ คือ

##### 2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) หรือ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equations)

สำหรับการไหลใน 3 มิติ ที่สภาวะคงที่ (Steady State) และอัดตัวไม่ได้ (Incompressible  
Flow) จะได้สมการความต่อเนื่องเป็นดังนี้

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

##### 2.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equations) หรือสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations)

โมเมนตัมในแนวแกน x :

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

โมเมนตัมในแนวแกน y :

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

โมเมนตัมในแนวแกน  $z$  :

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

โดยที่กำหนดให้เลือดประพฤติตามสมการแบบจำลอง Carreau-Yasuda [3] ดังนี้

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$\mu_{\infty}$  คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นอนันต์ ในกรณีนี้ของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.00345 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$

$\mu_0$  คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์ ในกรณีนี้ของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.056 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$

$\lambda$  คือ ค่าคงที่ ในกรณีนี้ของไหลเป็นเลือดมีค่า  $3.313 \text{ s}$

$\dot{\gamma}$  คือ อัตราเฉือน (Shear rate) มีหน่วย ต่อวินาที

$n$  คือ ค่าคงที่ไร้หน่วย ในกรณีนี้ของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.3568$

ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะอยู่ในรูปของ  $u$  (ความเร็วในแนวแกน  $x$ ),  $v$  (ความเร็วในแนวแกน  $y$ ),  $w$  (ความเร็วในแนวแกน  $z$ ) และ  $P$  (ความดัน) สำหรับการแสดงผลจะอยู่ในรูปของอัตราเฉือน (Shear rate) และ/หรือ ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress) ดังนี้

อัตราเฉือน (Shear rate) :

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress) :

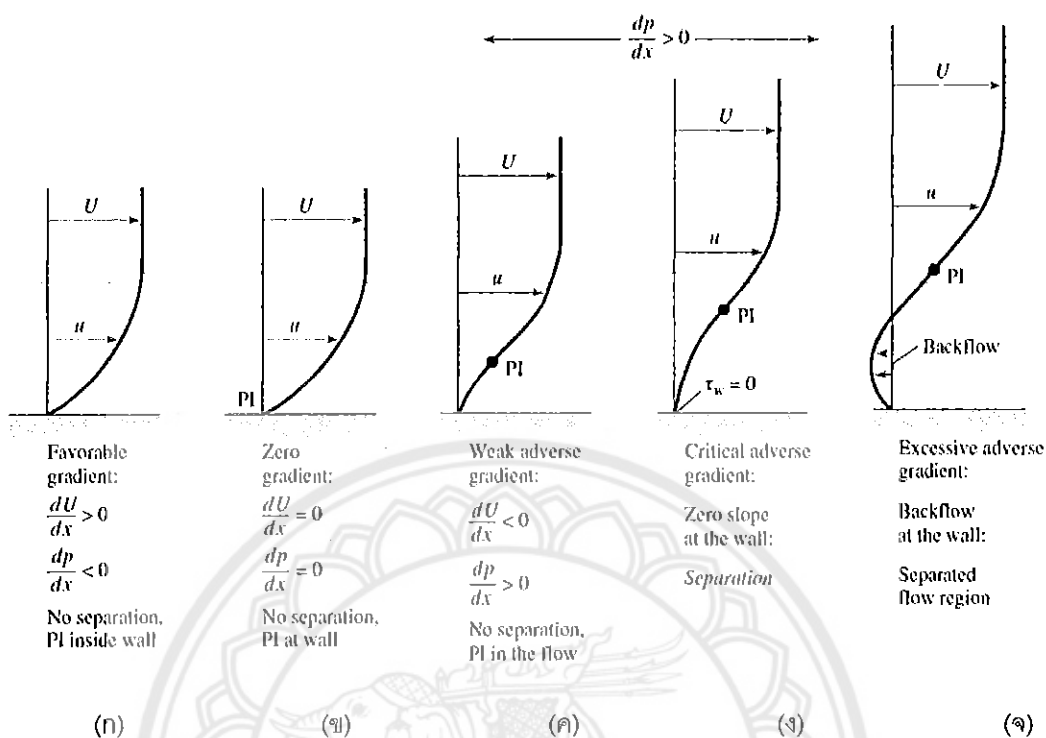
$$\text{WSS} = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{du_x}{dx_x} \quad (2.7)$$

## 2.2 ทฤษฎีการไหลชั้นขอบเขต (Boundary Layer Theory)

การไหลผ่านพื้นที่ผิวโค้ง (Flow Over Curved Boundary) เป็นการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันในตำแหน่งต่างๆของการไหล โดยสามารถอธิบายลำดับขั้นตอนในรูปที่ 2.1 ซึ่งเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ชั้นขอบเขตของการไหล  $\left(\frac{dU}{dx}\right)$  มีค่ามากกว่าศูนย์

และความดัน  $\left(\frac{dP}{dx}\right)$  มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ส่งผลให้แรงที่เกิดจากความดันจะมีทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลและมีจุดเปลี่ยนโค้ง (Point of Inflection: PI) จะอยู่ในผนัง ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) เรียกลักษณะแบบนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงความดันอย่างพึงประสงค์ (Favorable Gradient) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) ต่อมาเมื่อ  $\frac{dU}{dx}$  และความดัน  $\frac{dP}{dx}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้มี PI จะอยู่บนผนัง ซึ่งการไหลเริ่มอยู่ในช่วง Transition เรียกลักษณะแบบนี้ว่า Zero Gradient ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) แต่เมื่อ  $\frac{dU}{dx}$  มีค่าน้อยกว่าศูนย์ และความดัน  $\frac{dP}{dx}$  มีค่ามากกว่าศูนย์ แรงที่เกิดจากความดันจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการไหลและมี PI จะอยู่ในการไหล เรียกลักษณะแบบนี้ว่า การเปลี่ยนแปลงความดันอย่างไม่พึงประสงค์ (Adverse Gradient)

สำหรับรูปที่ 2.1 (ค) เป็นการไหลที่เตรียมเปลี่ยนเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ไหล เรียกลักษณะแบบนี้ว่า Weak Adverse Gradient โดยมี PI อยู่บนโปรไฟล์ความเร็ว สำหรับรูปที่ 2.1 (ง) จะมี PI อยู่สูงกว่าแบบ Weak Adverse Gradient และมีจุดเกิดการแยกตัวของการไหล (Separation point:  $\tau_w = 0$ ) ที่ผนัง เรียกลักษณะแบบนี้ว่า เกรเดียนต์ไม่พึงประสงค์วิกฤต (Critical Adverse Gradient) สำหรับรูปที่ 2.1 (จ) จะมี PI อยู่สูงกว่าแบบ Critical adverse gradient และเกิดการไหลย้อนกลับ (Backflow) ที่ผนัง

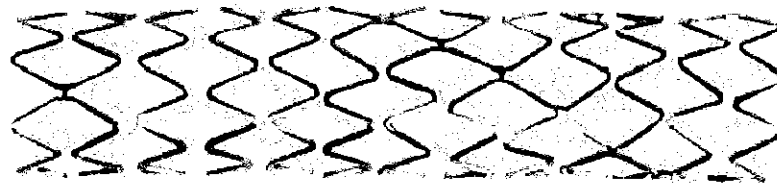


รูปที่ 2.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันที่มีต่อลักษณะชั้นขอบเขตการไหล [6]

### 2.3 วรรณกรรมปริทัศน์

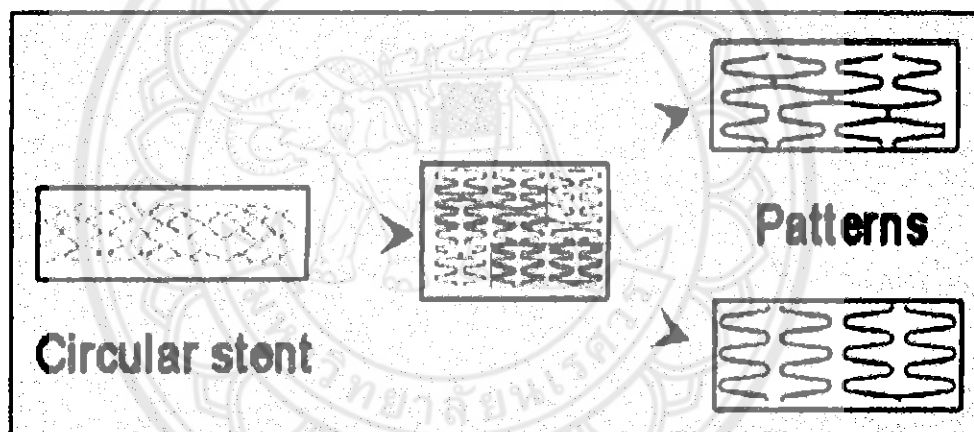
Benard และคณะ[7] ศึกษาผลของการกระตุ้น Endothelial Cell โดย Wall Shear Stress (WSS) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกลับมาตีบอีกครั้งของหลอดเลือด (Restenosis) การเปลี่ยนแปลงการไหลของเลือดและขดลวดส่งผลต่อลักษณะการเปลี่ยนแปลงของของไหล โดยเฉพาะผลกระทบของ Stent Struts พวกเขาศึกษาการไหลผ่านขดลวด Helistent<sup>®</sup> โดยวิธีการทดลอง (in vitro model) ของ Stent Struts ของหลอดเลือดเทียม (intra-vascular prothesis) เพื่อศึกษาการไหลของเลือดผ่านส่วนของ Stent Struts

จากการศึกษาการไหลของเลือดผ่านหลอดเลือดโดยการใส่ขดลวด ภายใต้สภาวะการไหลคงที่ โดยกำหนดให้ผนังหลอดเลือดมีความแข็งเกร็ง (rigid model) ซึ่งใช้วิธี PIV (Particle image velocimetry) ในการวัดการไหลของเลือด เพื่อระบุและอธิบายลักษณะพฤติกรรมความแตกต่างของการไหล จากวิธีการทดลองใช้ขดลวดซึ่งประกอบด้วย sinusoidal rings และถูกเชื่อมโดย Helicoid of bonds ในรูปแบบตัว H กำหนดให้ขดลวดมีความยาว 10 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขดลวด [7]

จากวิธีการทดลอง Bernard และคณะ ได้นำขดลวดที่จะใช้ในการทดลองมาแพร์บนแผ่นเรียบและทำให้ขดลวดมีการนูนขึ้นมาจากแผ่นเรียบโดยที่ขดลวดทำมาจาก อะครีลิก ลักษณะของขดลวดที่พบในการทดลองจะมีสองลักษณะคือ ลักษณะแรกจะเป็นการแสดงตัวของขดลวดที่เชื่อมติดกันและลักษณะที่สองเป็นการแสดงตัวของขดลวดที่ไม่ได้เชื่อมติดกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแสดงตัวของขดลวดบนแผ่นเรียบ

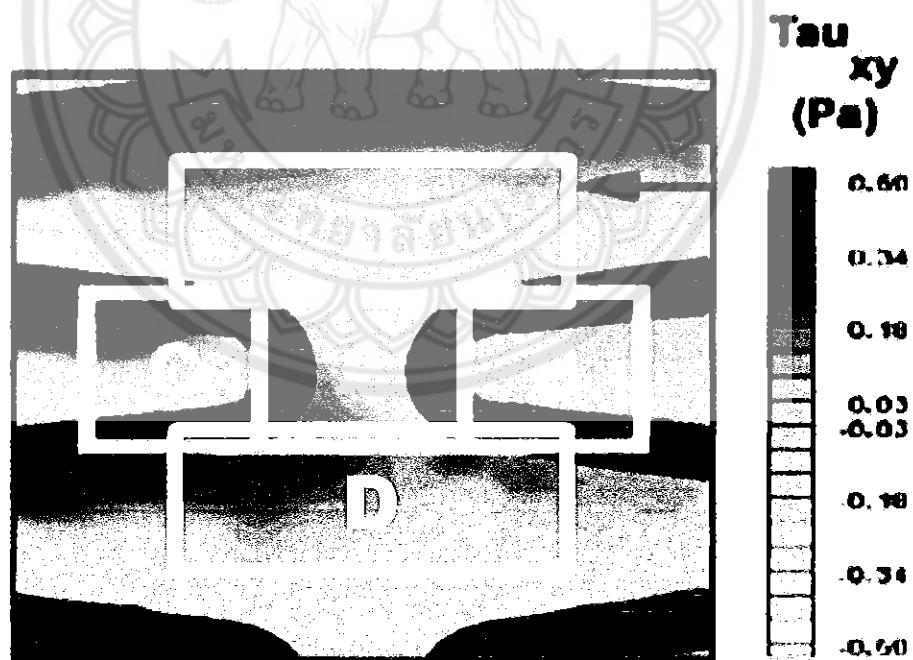
ในการทดลองใช้สารผสมของ water-glycerin 50.6% โดยปริมาตร เพื่อทำการทดลอง กำหนดให้อัตราการไหลมีค่าเท่ากับ 60 , 88 , 102 , 108 และ 144 ml/min และจากการศึกษาการไหลผ่านขดลวดนี้ขึ้นอยู่กับค่าของ WSS ค่าของ WSS จะส่งผลโดยตรงต่อเซลล์เยื่อบุผิวของผนังหลอดเลือดที่สัมผัสกับการไหล โดยที่ค่าคงที่มาตรฐานกำหนดว่า เมื่อค่าของ WSS มีค่าน้อยกว่า 0.5 Pa Endothelial Cell จะเกิดการแบ่งตัวและทำให้มีแนวโน้มของการกลับมาตีบอีกครั้งของหลอดเลือดและเมื่อค่าของ WSS มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.5 Pa Endothelial Cell จะผลิตไนตริกออกไซด์ (NO) โดยไนตริกออกไซด์จะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์เยื่อบุผิว

ผลจากการศึกษาพบว่าในพื้นที่ A,B และ C จะให้ค่า WSS ต่ำเนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวอยู่ใกล้กับ Stent struts และจากที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า WSS ที่มีค่าต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าเซลล์เยื่อบุผิวจะมีการพัฒนาขึ้น หรือมีแนวโน้มว่าจะเกิดการกลับมาตีบอีกครั้ง

พื้นที่ A เราจะเรียก พื้นที่นี้ว่า Slow eddy คือมีของไหลเคลื่อนที่มาจาก พื้นที่ D ปริมาณน้อยๆและเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ให้ค่า WSS ต่ำ ทำให้ในโซนนี้ก็มีแนวโน้มที่จะเกิดการกลับมาตีบอีกครั้ง ดังรูปที่ 2.4

ส่วนพื้นที่ B และ C เราจะเรียกพื้นที่นี้ว่า Dead Flow Zone คือพื้นที่ B เมื่อของไหลมีการไหลมาที่พื้นที่ B ของไหลจะเข้าประทะกับ Stent struts ทำให้เกิดการหมุนวนภายในพื้นที่ B และของไหลส่วนหนึ่งจะมีการ Eject ออกจากพื้นที่ B ส่วนพื้นที่ C มีของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่นี้น้อยมาก และพื้นที่นี้มีแนวโน้มว่าจะมีความเสี่ยงต่อการกลับมาตีบอีกครั้งมากที่สุด ดังรูปที่ 2.4

พื้นที่ D ไม่มีการเปลี่ยนแปลง WSS มากนัก แต่มีแรงเฉือนที่สูงกว่าพื้นที่อื่นเพราะในพื้นที่ D ไม่มี Stent struts ที่จะเข้ามาขัดขวางการไหล ของของไหล ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงพื้นที่ในการไหลภายในหลอดเลือด

Johnston และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการไหลของเลือดแบบ Non-Newtonian ผ่านหลอดเลือดหัวใจด้านขวา (Right Coronary Arteries – RCA) ที่แตกต่างกัน 4 หลอดเลือด ที่สภาวะคงที่ โดยกำหนดให้ผนังหลอดเลือดแข็งเกร็ง เป็นของไหลชนิดอัดตัวไม่ได้ และมีความหนาแน่น  $1050 \text{ kg/m}^3$  เพื่อเปรียบเทียบความเค้นเฉือน (wall shear stress – WSS) ของหลอดเลือดแต่ละหลอดเลือดในรอบการเต้นของหัวใจ ซึ่งจะใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์โวลุ่มในการศึกษาโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบ Newtonian และใช้แบบจำลองการไหลแบบ non-Newtonian 5 แบบจำลอง ซึ่งมีรูปแบบสมการที่แตกต่างกันดังนี้

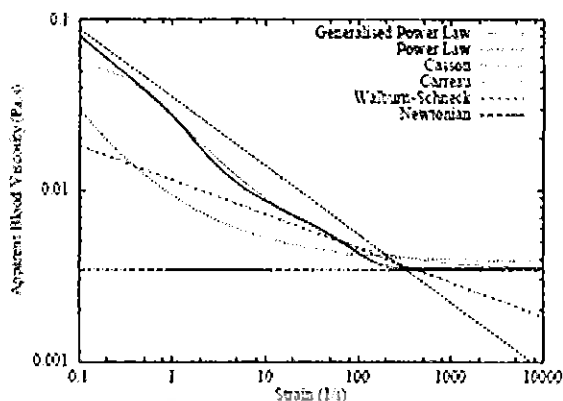
แบบจำลองการไหลแบบ Newtonian  $\mu = 0.0345P$

แบบจำลองการไหลแบบ non-Newtonian

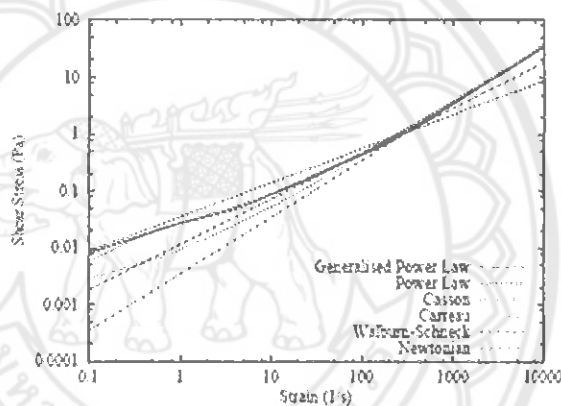
1. แบบจำลอง Carreau  $\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2}$
2. แบบจำลอง Walburn–Schneck  $\mu = C_1 e^{C_2 H} \left[ e^{C_3 (TFMA/H^2)} \right] (\lambda)^{-C_4 H}$
3. แบบจำลอง Power Law  $\mu = \mu_0 (\dot{\gamma})^{n-1}$
4. แบบจำลอง Casson  $\mu = \left[ (\eta^2 J_2)^{1/4} + 2^{-1/2} \tau_y^{1/2} \right]^2 J_2^{-1/2}$
5. แบบจำลอง Generalised Power Law  $\mu = \lambda |\dot{\gamma}|^{n-1}$

เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Viscosity กับ Apparent Blood Viscosity ดังรูปที่ 2.5 และความสัมพันธ์ระหว่าง Shear Stress กับ Shear Stress ดังรูปที่ 2.6 พบว่าที่อัตราเฉือนมากกว่า  $100 \text{ s}^{-1}$  แบบจำลองการไหลแบบ non-Newtonian ที่ไม่ประพฤติตนตามแบบจำลองการไหลแบบ Newtonian คือ แบบจำลอง Walburn–Schneck และแบบจำลอง Power Law ซึ่งแบบจำลองการไหลแบบ non-Newtonian ที่ประพฤติตนตามแบบจำลองการไหลแบบ Newtonian คือ แบบจำลอง Carreau แบบจำลอง Casson และแบบจำลอง Generalised Power นั้นหมายความว่า แบบจำลอง Walburn–Schneck และแบบจำลอง Power Law ไม่สามารถใช้แทนพฤติกรรมของการไหลของเลือดได้ แต่สามารถใช้แบบจำลอง Carreau แบบจำลอง Casson และแบบจำลอง Generalised Power แทนพฤติกรรมของการไหลของเลือดได้ ซึ่งทั้ง 3 แบบจำลองที่ใช้แทนพฤติกรรมของการไหลของเลือดได้นั้นไม่มีแบบจำลองใดที่ดีที่สุด





รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Apparent Blood Viscosity [3]



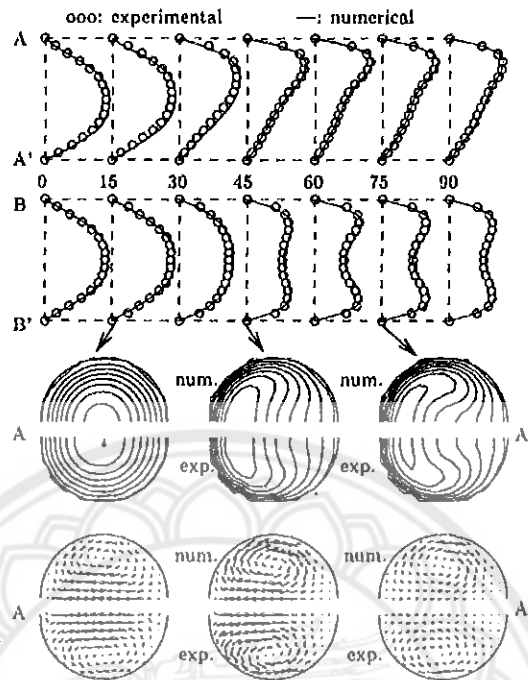
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strain กับ Shear Stress [3]

Gijsen และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการไหลของเลือดที่สภาวะไม่คงที่ผ่านท่อโค้ง  $90^\circ$  ดังรูป 2.7 เพื่อเลียนแบบการไหลของเลือดผ่านส่วนโค้งของหลอดเลือดหัวใจขนาดใหญ่ โดยกำหนดให้ผนังท่อแข็งเกร็ง และทำการศึกษการไหลแบบ Newtonian และ non-Newtonian ที่ diastole ( $Re = 300$ ), peak systole ( $Re = 750$ ) และ begin diastole สำหรับการทดลองจะใช้ Potassium thiocyanate (KSCN) แทนการไหลแบบ Newtonian และใช้ Potassium thiocyanate ผสมกับ Xantan gum (KSCN-X) แทนการไหลแบบ non-Newtonian ส่วนระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จะเป็นการไหล Newtonian ( $\mu$  คงที่) และการไหลแบบ non-Newtonian โดยใช้แบบจำลอง Carreau-Yasuda โดยวิธีการศึกษาจะทำการเปรียบเทียบการไหลของเลือดแบบ non-Newtonian ระหว่างผลการทดลองกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่า โปรไฟล์ความเร็วจะ skewed ออกจากด้านในท่อโค้งไปยังด้านนอกท่อโค้ง เนื่องจากอิทธิพลของความโค้งของท่อซึ่งจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงสู่ศูนย์กลางของท่อโค้ง เกิด secondary velocity ที่แสดงให้เห็นถึง Dean vortex บริเวณ

ส่วนกลางของท่อโค้งที่ begin diastole เส้นเค้าโคจรความเร็วส่วนกลางของท่อโค้งเริ่มขยับมาทางด้านนอกของท่อโค้ง และขยับมากขึ้นจนเป็นรูปตัวซี (C) ดังรูปที่ 2.8 ที่บริเวณทางออกของท่อโค้ง เนื่องจากอิทธิพลของแรงเหวี่ยงสู่ศูนย์กลางของท่อโค้ง ซึ่งจะเห็นว่าผลเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีลักษณะคล้ายกัน นั้นหมายความว่าแบบจำลอง Carreau-Yasuda สามารถใช้เปรียบเทียบการไหลของเลือดแบบ non-Newtonian ได้ นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบการไหลของเลือดแบบ Newtonian และการไหลแบบ non-Newtonian โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งพบว่าที่ begin diastole โปรไฟล์ความเร็วของการไหลแบบ Newtonian จะเกิดการไหลแยกตั้งแต่ส่วนกลางของท่อโค้งไปจนถึงส่วนปลายของท่อโค้ง แต่จะไม่พบในการไหลแบบ non-Newtonian แต่ที่ peak systole และที่ diastole มีลักษณะของโปรไฟล์ความเร็วไปในทิศทางทางเดียวแต่ที่ peak systole จะมีค่าความเร็วมากกว่า เนื่องจากที่ peak systole มี  $Re = 750$  แต่ที่ diastole มี  $Re = 300$



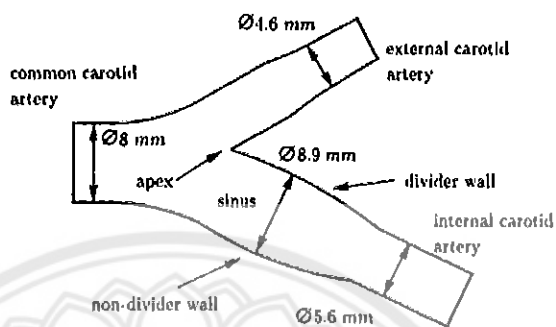
รูปที่ 2.7 ลักษณะท่อโค้ง  $90^\circ$  [5]



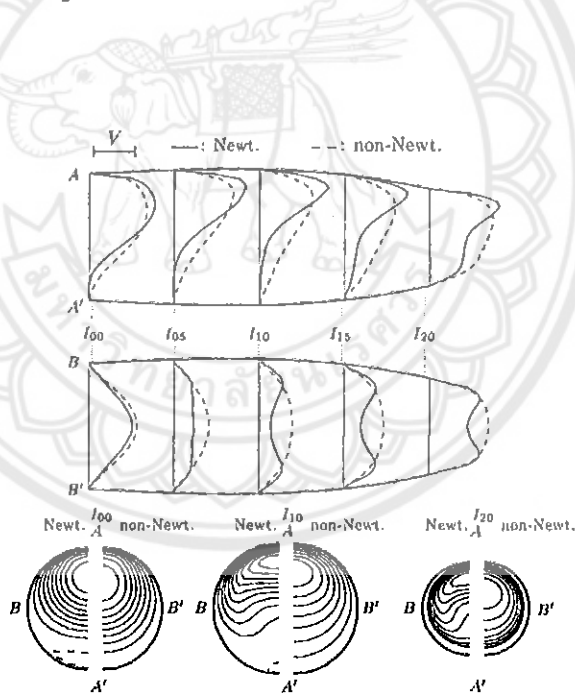
รูปที่ 2.8 โปรไฟล์ความเร็ว Dean vortex และลักษณะเส้นเค้าโครงความเร็วที่ begin diastole [5]

Gijsen และคณะ [8] จากการศึกษาการไหลหลอดเลือดแดงที่อุดตันที่คอตั้งรูปที่ 2.9 ภายใต้สภาวะการไหลคงที่ โดยกำหนดให้ผนังหลอดเลือดมีความแข็งเกร็งเปรียบเทียบระหว่างของไหล Newtonian กับ non-Newtonian โดยวิธีการทดลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข สำหรับการทดลองใช้สารละลายเข้มข้น 71% ของ Potassium thiocyanate (KSCN) แทนของไหล Newtonian และใช้สารละลาย Potassium thiocyanate ผสมกับ Xanthan gum (KSCN-X) แทนของไหล Non-Newtonian ใช้แบบจำลองของ Carreau-Yasuda ในการศึกษาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของของไหล Non-Newtonian พบว่าการวัดการกระจายความเร็วใน Common Carotid Artery โปรไฟล์ความเร็วของของไหล Newtonian เป็นแบบ พาราโบลา และโปรไฟล์ความเร็วของของไหล non-Newtonian มีลักษณะแบนตรงกลาง ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก shear thinning สำหรับผลจากการเปรียบเทียบการวัดการกระจายความเร็วจากวิธีการทดลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในทางเข้าของหลอดเลือดแดงที่คอ ผลจากความโค้งของท่อ ส่งผลให้เกิด velocity gradient สูงที่ divider wall ของไหลที่อยู่ใกล้กับ divider wall จะเคลื่อนที่เป็นแบบรอบวงไปสู่ non-divider wall ซึ่งมีผลทำให้เกิด secondary flow ที่แสดงให้เห็นใน Dean vortex ส่งผลให้เส้นเค้าโครงความเร็วเป็นรูปตัว(C) นอกจากนี้การแบ่งแยกพื้นที่ความเร็วต่ำกับพื้นที่ความเร็วสูงที่อยู่ใกล้บริเวณ divider wall ที่กึ่งกลางท่อเป็นการปรากฏของ Shear Layer สำหรับของไหล non-Newtonian ส่งผลให้เกิด velocity gradient สูงที่ Divider Wall ดังรูปที่ 2.10 เนื่องจากของไหลที่ไหลจาก Common Carotid Artery

ได้แยกไหลเข้าสู่ Internal Carotid Artery โดยถูกแยกออกที่จุด apex การเบนออกของ Internal Carotid Artery จาก Common Carotid Artery ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดลดลง ส่งผลให้ความเร็วมีค่าลดลงที่บริเวณใกล้กับ non-divider wall



รูปที่ 2.9 ลักษณะของหลอดเลือดที่คอคอ [8]



รูปที่ 2.10 โปรไฟล์ความเร็วและลักษณะเส้นเคาโครงความเร็วของการไหล Newtonian เทียบกับ non-Newtonian [8]

### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน

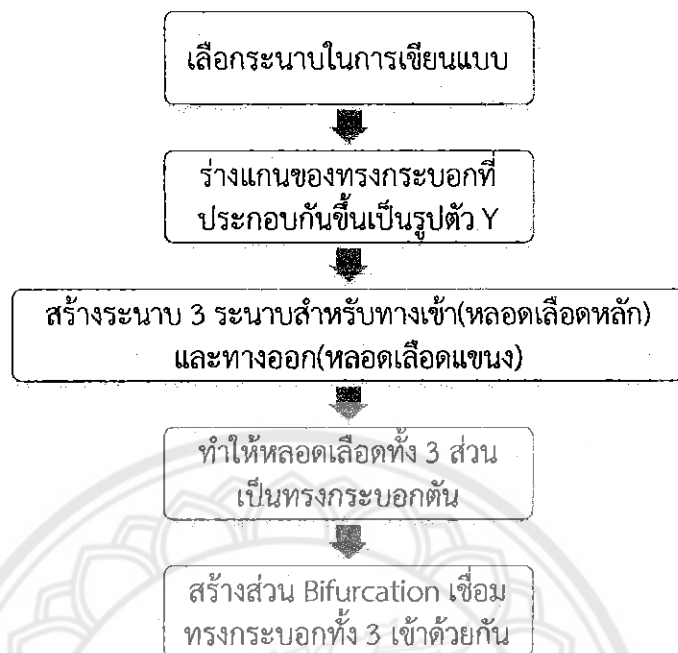
แบบจำลองของหลอดเลือดสร้างขึ้นจากการโปรแกรมเขียนแบบ Solidworks ตามการจำแนกกรณีการอุดตันของหลอดเลือดแยกสองง่ามของ Movahed [1] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วย 5 กรณี ได้แก่ 1m, 1s, S, L-2-V (เนื่องจากตำแหน่งการเกิดการอุดตันของทั้ง 3 กรณีมีลักษณะที่เหมือนกันจึงรวมเป็นกรณีเดียว) และ T ทั้งนี้ขั้นตอนการเขียนแบบของแบบ 1m, 1s, S, และ L-2-V จะเป็นการอุดตันในหลอดเลือดแยกสองง่ามรูปตัว Y ซึ่งแตกต่างจากหลอดเลือดแยกสองง่ามรูปตัว T



รูปที่ 3.1 กรณีการอุดตันของหลอดเลือดแยกสองง่าม

#### 3.1 หลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ (ไม่มีส่วนที่อุดตัน)

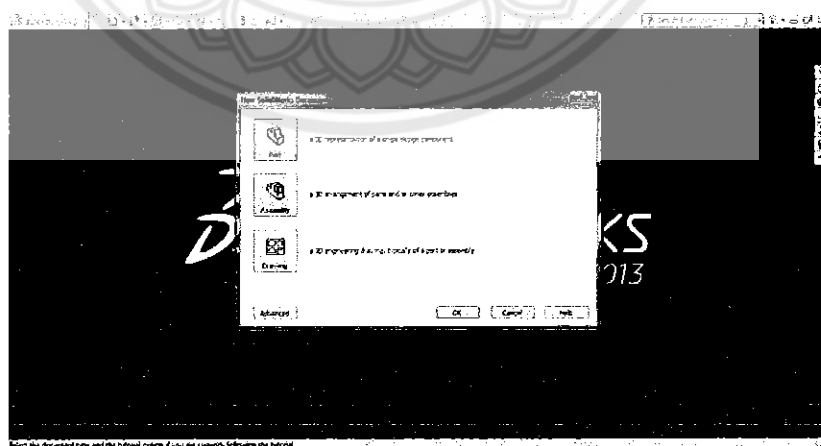
สำหรับหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ จะเริ่มต้นจากการเลือกระนาบในการเขียนแบบ การร่างแกนของทรงกระบอกที่จะประกอบเป็นหลอดเลือดรูปตัว Y การสร้างระนาบสำหรับทางเข้าของหลอดเลือดหลัก ทางออกของหลอดเลือดแขนงหลัก และทางออกของหลอดเลือดแขนงรอง การเพิ่มมิติของหลอดเลือดให้เป็นทรงกระบอก สูดท้ายเชื่อมหลอดเลือดทรงกระบอก (ส่วน Bifurcation) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สรุปลขั้นตอนแนวคิดการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ

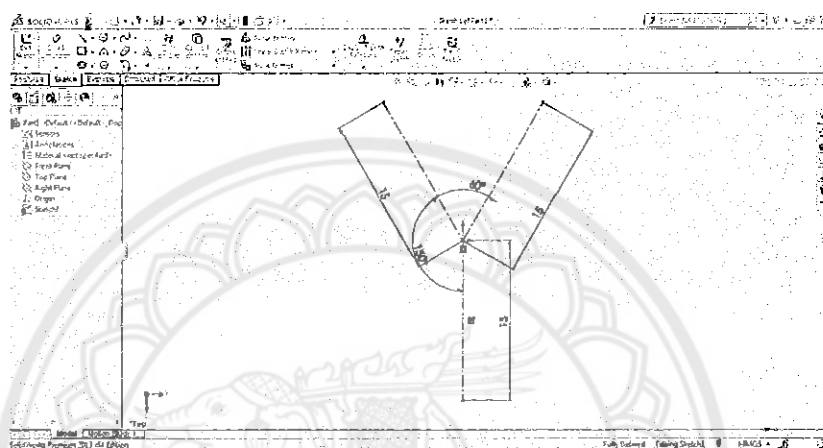
รายละเอียดขั้นตอนในการเขียนแบบหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติเป็นดังต่อไปนี้

3.1.1 เปิดโปรแกรม Solidwork ขึ้นมา จากนั้นเลือกคำสั่ง New ที่เมนู File เมื่อหน้าต่าง (New Solidworks Document) ปรากฏ ให้เลือกคำสั่ง Part กด OK ดังแสดงในรูปที่ 3.3



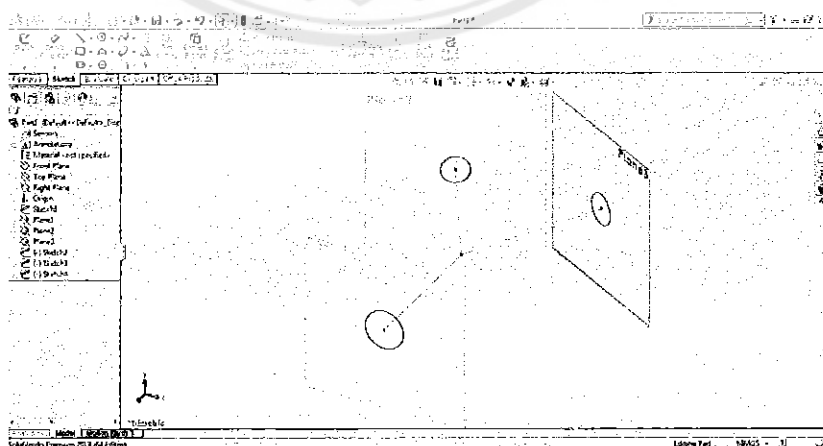
รูปที่ 3.3 การกำหนดพื้นที่เบื้องต้นในการเขียนแบบ

3.1.2 เลือกคำสั่ง Top Plane ให้เป็นระนาบในการเขียนแบบ จากนั้นเลือกคำสั่ง Sketch เพื่อทำการเขียนแบบร่างของหลอดเลือด โดยใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นร่างและใช้คำสั่ง Smart Dimension กำหนดขนาด ซึ่งความยาวของหลอดเลือดหลักและหลอดเลือดทั้งสองแขนงมีขนาด 15 mm และมุมระหว่างหลอดเลือดสาขา มีขนาด  $60^\circ$  จากนั้นออกจากคำสั่ง Sketch เพื่อร่างแกนสำหรับหลอดเลือด ดังแสดงในรูปที่ 3.4



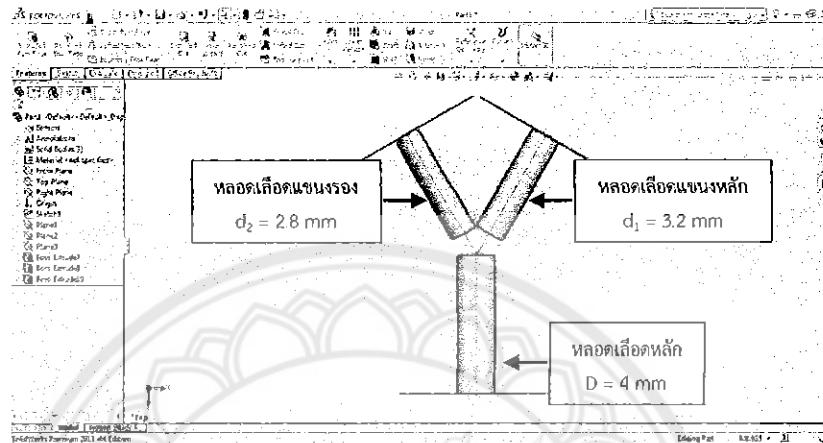
รูปที่ 3.4 การกำหนดขนาดและสร้างแกนของแบบร่างหลอดเลือด

3.1.3 เลือกคำสั่ง Reference Geometry ภายใต้เมนูของ Features โดยเลือกคำสั่งย่อย Plane เพื่อทำการสร้างระนาบที่ส่วนปลายของหลอดเลือด จากนั้นใช้คำสั่ง Circle วาดวงกลมใน Plane ที่สร้างขึ้น โดยให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดเลือดหลัก หลอดเลือดแขนงหลัก และหลอดเลือดแขนงรอง มีขนาด 4 mm 3.2 mm และ 2.8 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



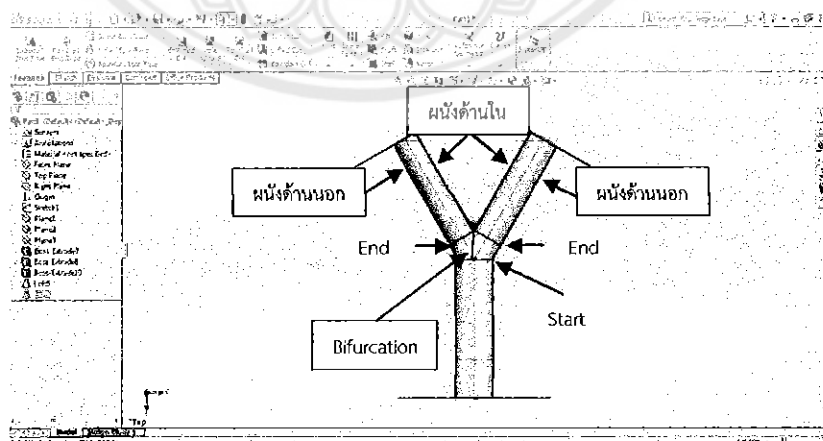
รูปที่ 3.5 การสร้างวงกลมในระนาบเพื่อเตรียมสร้างหลอดเลือดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ

3.1.4 เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base ภายใต้เมนูของ Features เพื่อให้แบบร่างในรูปที่ 3.2 และ 3.3 เป็นท่อนตัน โดยกำหนดขนาดความยาวของท่อหลอดเลือดหลัก และหลอดเลือดแขนทั้งสองเป็น 15 mm และ 12.25 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบร่างของหลอดเลือดทั้งสามที่มีลักษณะเป็นทรงตัน

3.1.5 เลือกคำสั่ง Lofted Boss/Base ภายใต้เมนูของ Features เพื่อเชื่อมหลอดเลือดหลักและหลอดเลือดแขนเข้าด้วยกัน (ส่วน Bifurcation) เป็นแบบจำลองของหลอดเลือดแยกสองง่าม ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยกำหนดให้การเชื่อมเป็นแบบ Tangency to Face ทั้งส่วน Start และส่วน End จากนั้นทำการบันทึกโดย save เป็นทั้ง SolidWorks Part Document (.SLDPRT) และ STEP File (.STEP)

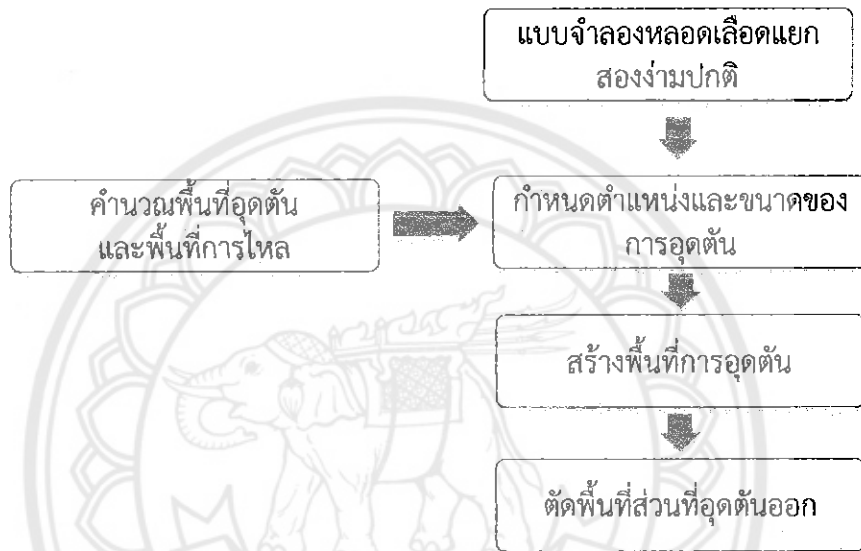


รูปที่ 3.7 แบบจำลองของหลอดเลือดแยกสองง่ามที่เสร็จสมบูรณ์หลังจากใส่ส่วน Bifurcation เชื่อมกระบอกทั้งสาม



### 3.2 หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน

สำหรับหลอดเลือดแยกสองง่ามที่อุดตันกรณี 1m, 1s, S และ L-2-V ตามการจำแนกของ Movahed [1] จะเริ่มต้นจากการนำแบบจำลองของหลอดเลือดแยกสองง่ามแบบปกติที่ได้จากหัวข้อที่ 3.1 มาตัดส่วนโค้งที่ตำแหน่งต่างๆ โดยความหนาของส่วนโค้งจะมีขนาดขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การอุดตัน ซึ่งสุดท้ายจะได้ช่องทางการไหลของเลือดผ่านช่องทางอุดตันหลอดเลือด ดังแสดงในรูปที่ 3.8



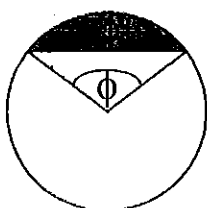
รูปที่ 3.8 สรุปขั้นตอนแนวคิดการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตัน

ตัวอย่าง การอุดตันหลอดเลือดแขนงหลัก 50%

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของหลอดเลือดแขนงรองปกติ (ไม่อุดตัน)} = \frac{\pi}{4} \times 3.2^2 = 8.042 \text{ mm}^2$$

$$\text{พื้นที่ของการไหลของเลือดเหลือ 50% คิดเป็น} = 0.5 \times \frac{\pi}{4} \times 3.2^2 = 4.021 \text{ mm}^2$$

กรณีพื้นที่การอุดตัน 2 ด้าน



$$\text{พื้นที่หน้าตัดส่วนที่อุดตันด้านละ A} = \frac{8.042 - 4.021}{2} = 2.0105 \text{ mm}^2$$

$$\phi = 2.309 \text{ rad}$$

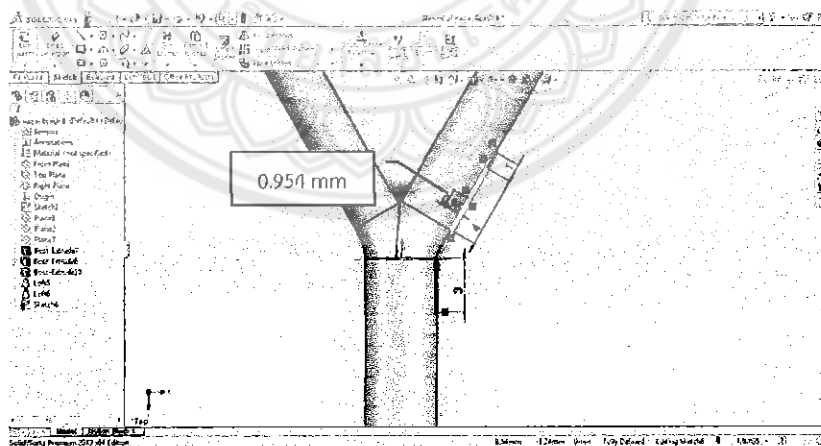
$$\text{ความสูงของส่วนที่อดตัน} \quad h = 1.6 \left( 1 - \cos \left( \frac{2.309}{2} \right) \right) = 0.954 \text{ mm}$$

หมายเหตุ : รายละเอียดการคำนวณพื้นที่อดตันและพื้นที่ของการไหลแสดงในภาคผนวก ก

### 3.2.1 กรณี 1m

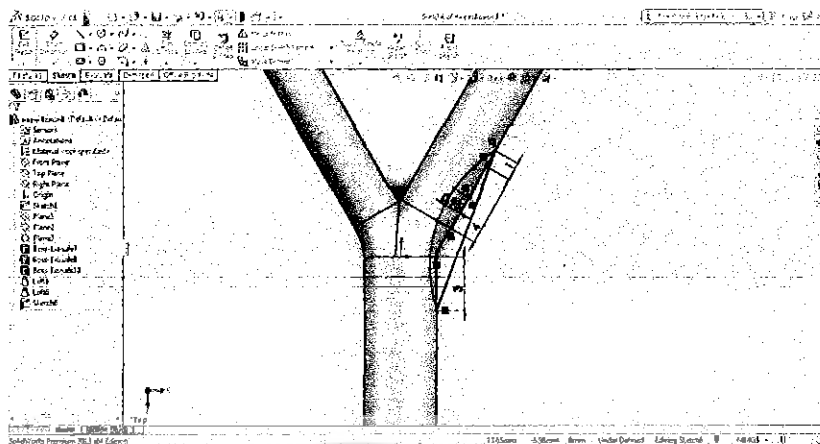
หลอดเลือดแยกสองง่ามอดตันแบบ 1m [1] จะเกิด การอดตันที่บริเวณหลอดเลือดแขนงหลักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm ทั้ง 2 ด้าน โดยการอดตันที่ผนังด้านนอกจะครอบคลุมเข้าไปในบริเวณหลอดเลือดหลัก บริเวณ Bifurcation และหลอดเลือดแขนงหลัก ในขณะที่การอดตันของผนังด้านในจะครอบคลุมเข้าไปในหลอดเลือดแขนงหลักเท่านั้น

1. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบ จากนั้นเลือกคำสั่ง Sketch เพื่อทำการเขียนแบบร่างของรอยอดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก โดยใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานยาว 3 mm ทับเส้นหลอดเลือดหลักโดยเริ่มจากทางเข้าส่วน Bifurcation ลงมา และสร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่ทางเข้าหลอดเลือดแขนงหลักขึ้นไป ยาว 4 mm และ 1 mm ติดกัน และสร้างเส้นความหนาของการอดตัน เป็นตัวอย่างการสร้างเส้นโค้งจากผนังหลอดเลือดแขนงหลักลึกเข้าไป 0.954 mm ที่การอดตัน 50% ดังแสดงในรูปที่ 3.9



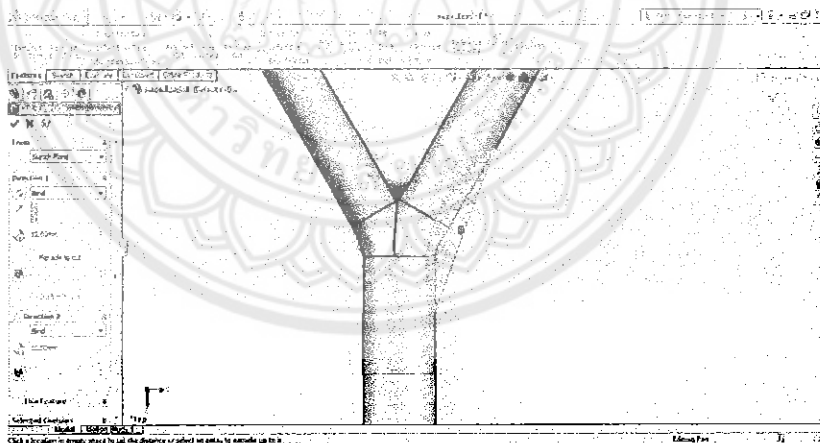
รูปที่ 3.9 ขนาดของรอยอดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

2. สร้างส่วนโค้งของวงกลมจากตำแหน่งที่กำหนดในรูปที่ 3.9 โดยใช้คำสั่ง 3 Point Arc และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การอดตันดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



รูปที่ 3.10 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดต้นที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

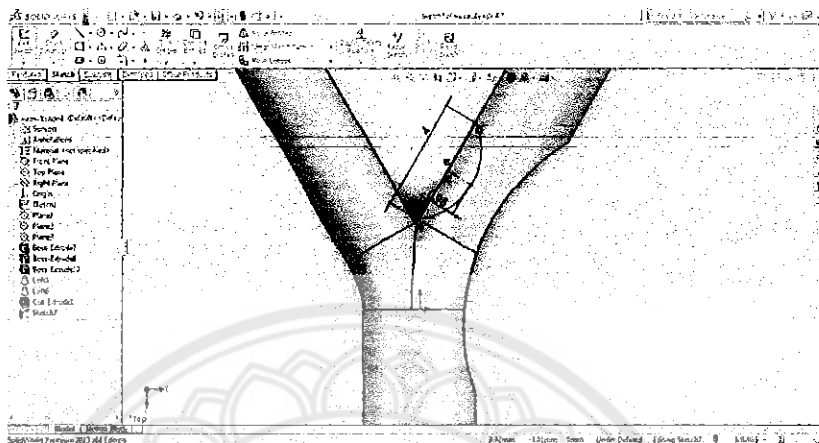
3. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เพื่อทำการตัดส่วนที่ถอดต้นออก



รูปที่ 3.11 พื้นที่การถอดต้นส่วนที่จะตัดออก

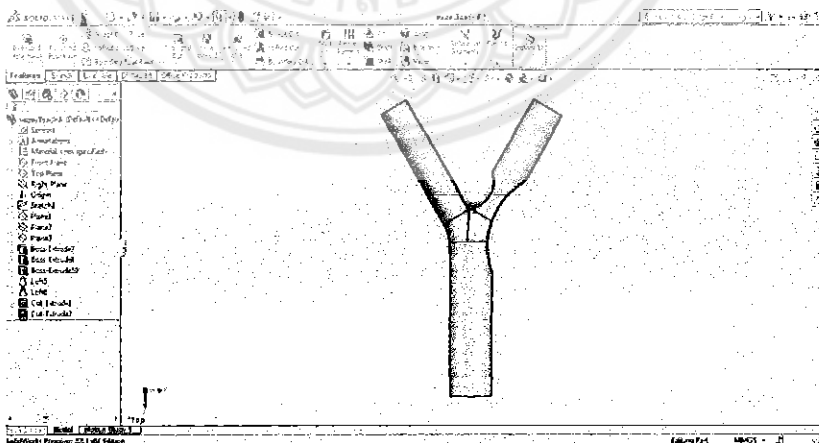
4. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบเช่นเดิม แต่ทำการ Sketch ภาพแบบร่างของรอยถอดต้นจากผนังด้านนอกเปลี่ยนเป็นผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก จากนั้นใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่จุด Apex ของทางแยกขึ้นไปทางหลอดเลือดแขนงหลักยาว 4 และสร้างเส้นความหนาของการถอดต้นขนาด 0.954 mm จากนั้น

ใช้สร้างคำสั่ง 3 Point Arc สร้างส่วนโค้งของวงกลม และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การถอดตัด แสดงในรูปที่ 3.12 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



รูปที่ 3.12 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดตัดที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก

5. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เพื่อทำการตัดส่วนที่ถอดตัดออก ซึ่งจะทำให้ได้หลอดเลือดแยกสองง่ามที่มีการถอดตัดที่ 50% ที่กรณีการถอดตัด 1m ตามการจำแนกของ Movahed [1]

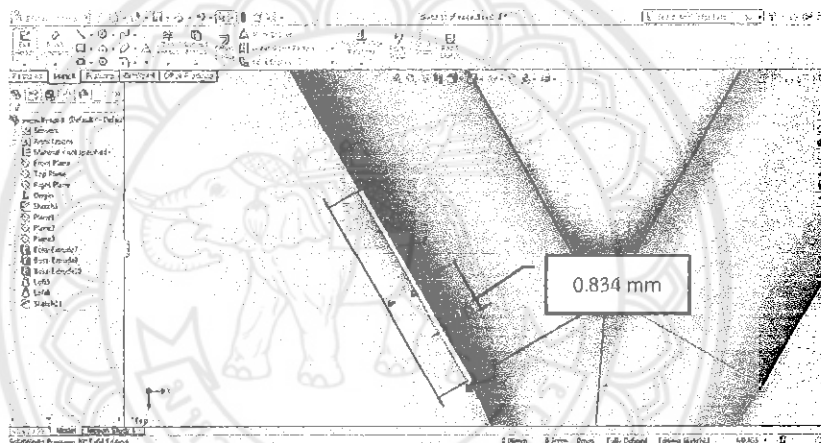


รูปที่ 3.13 หลอดเลือดแยกสองง่ามถอดตัดกรณี 1m ที่มีระดับการถอดตัด 50%

### 3.2.2 กรณี 1s

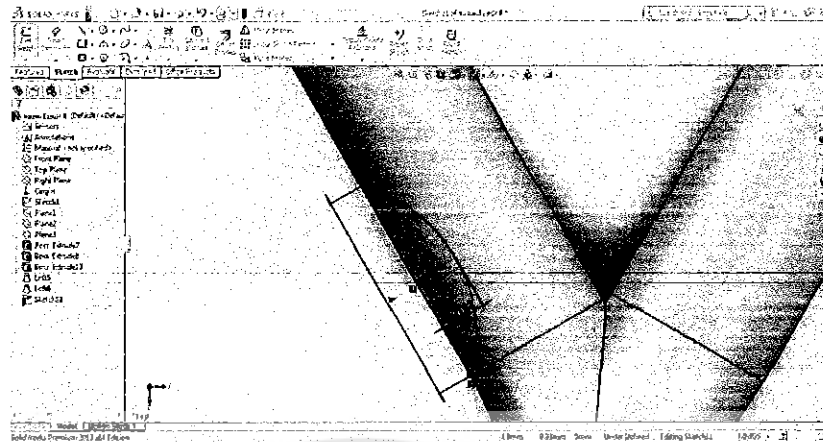
หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดต้นแบบ 1s [1] จะเกิดการอุดต้นที่บริเวณหลอดเลือดแขนงรองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 mm โดยผนังด้านในและผนังด้านนอกจะครอบคลุมเข้าไปหลอดเลือดแขนงรองเท่านั้น

1. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบ จากนั้นเลือกคำสั่ง Sketch เพื่อทำการเขียนแบบร่างของรอยอุดต้นที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงรอง โดยใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่ทางเข้าหลอดเลือดแขนงหลักขึ้นไปยาว 4 และสร้างเส้นความหนาของการอุดต้นขนาด 0.834 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.14



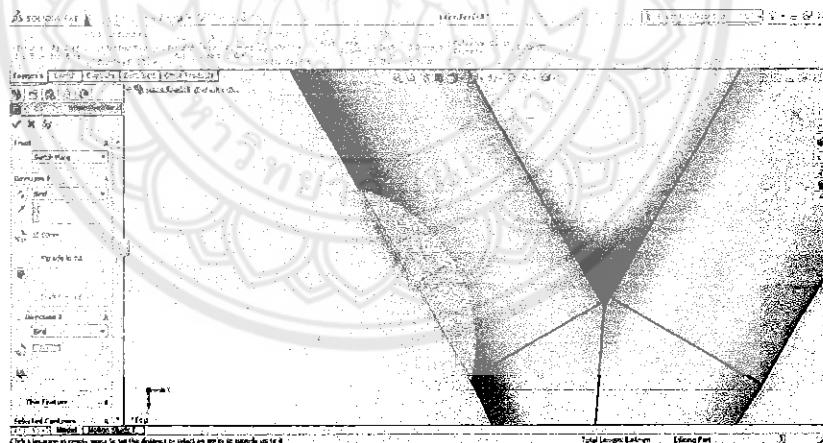
รูปที่ 3.14 ขนาดของรอยอุดต้นที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงรอง

2. สร้างส่วนโค้งของวงกลมจากตำแหน่งที่กำหนดในรูปที่ 3.14 โดยใช้คำสั่ง 3 Point Arc และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การอุดต้นดังแสดงในรูปที่ 3.15 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



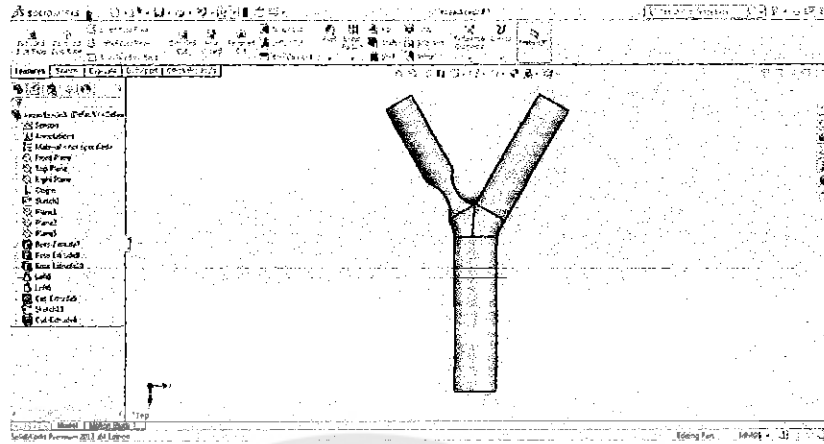
รูปที่ 3.15 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดต้นที่มีนึ่งด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

3. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เพื่อทำการตัดส่วนที่ถอดนอก



รูปที่ 3.16 พื้นที่การถอดต้นส่วนที่จะตัดออก

4. ทำการ Sketch ภาพการถอดต้นของหลอดเลือดแขนงรองด้านใน โดยใช้ตามคำสั่งและขนาดตามข้อที่ 2 และทำการตัดพื้นที่ที่ถอดต้นออกโดยใช้คำสั่งตามข้อที่ 3 ซึ่งจะให้ได้หลอดเลือดแยกสองง่ามถอดต้นที่มีการถอดต้นที่ 50% ที่กรณีการถอดต้น 1s ตามการจำแนกของ Movahed [1] ดังแสดงในรูปที่ 3.17

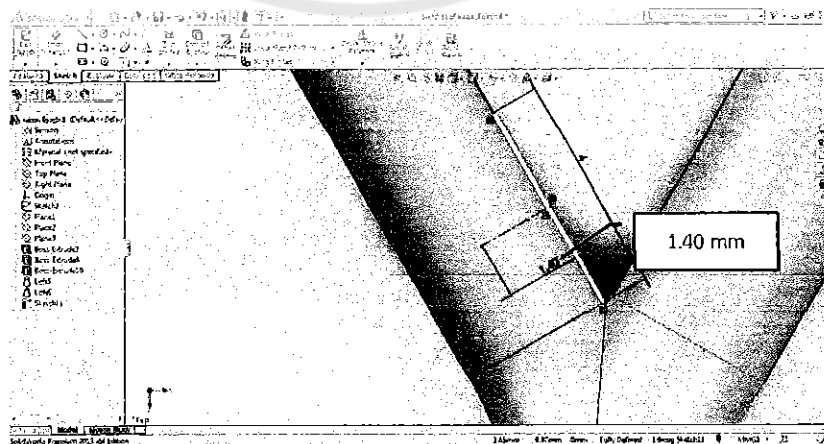


รูปที่ 3.17 หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดต้นกรณี 1s ที่มีระดับการอุดต้น 50%

### 3.2.3 กรณี S

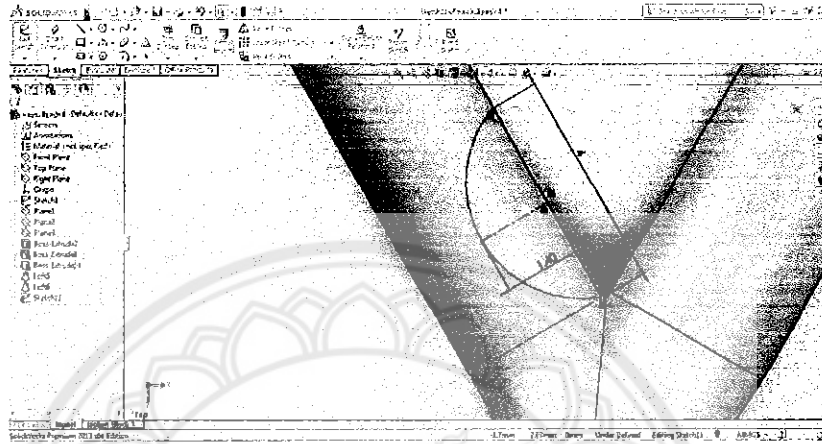
หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดต้นแบบ S [1] จะมีการอุดต้นในทั้ง 2 แขนง เช่นเดียวกับแบบ L-2-V แต่มีการอุดต้นที่ด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลักครอบคลุมไปจนถึงหลอดเลือดหลัก และการอุดต้นที่ด้านในของหลอดเลือดแขนงรองติดกับ Apex ของทางแยก

1. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบ จากนั้นเลือกคำสั่ง Sketch เพื่อทำการเขียนแบบร่างของหลอดเลือด ซึ่งจะเริ่มจากการเขียนแบบการอุดต้นที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงรองก่อน โดยใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงรองโดยเริ่มตั้งแต่จุด Apex ของทางแยกขึ้นไปทางหลอดเลือดแขนงหลักยาว 4 mm และสร้างเส้นความหนาของการอุดต้น ขนาด 1.40 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.18



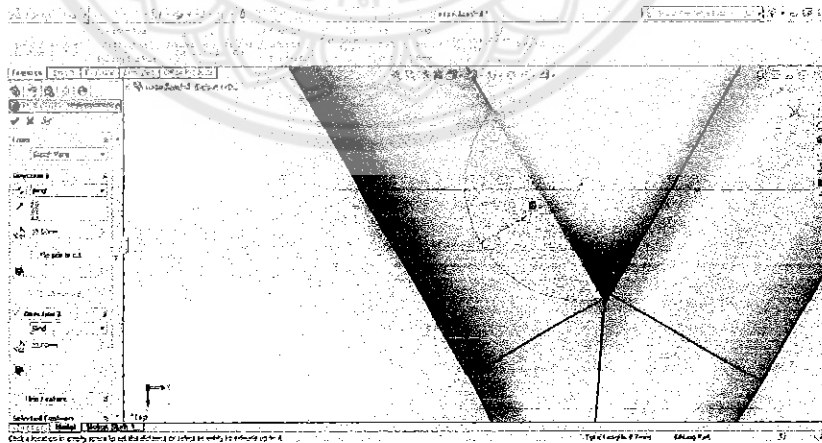
รูปที่ 3.18 ขนาดของรอยอุดต้นที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงรอง

2. สร้างส่วนโค้งของวงกลมจากตำแหน่งที่กำหนดในรูปที่ 3.18 โดยใช้คำสั่ง 3 Point Arc และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การถอดต้นดังแสดงในรูปที่ 3.19 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



รูปที่ 3.19 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดต้นที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

3. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.20 เพื่อทำการตัดส่วนที่ถอดออก

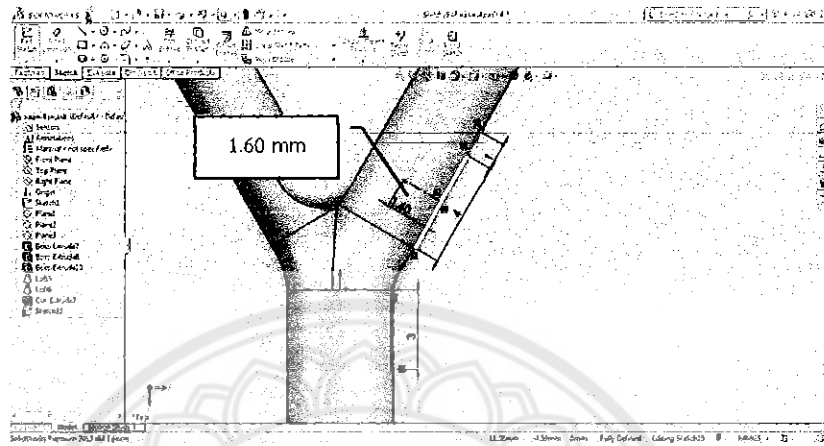


รูปที่ 3.20 พื้นที่การถอดต้นส่วนที่จะตัดออก

4. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบอีกครั้ง แต่เปลี่ยนหลอดเลือดแขนงที่จะทำการ Sketch ภาพจากหลอดเลือดแขนงหลักเป็นหลอดเลือดแขนงรอง จากนั้นใช้คำสั่ง

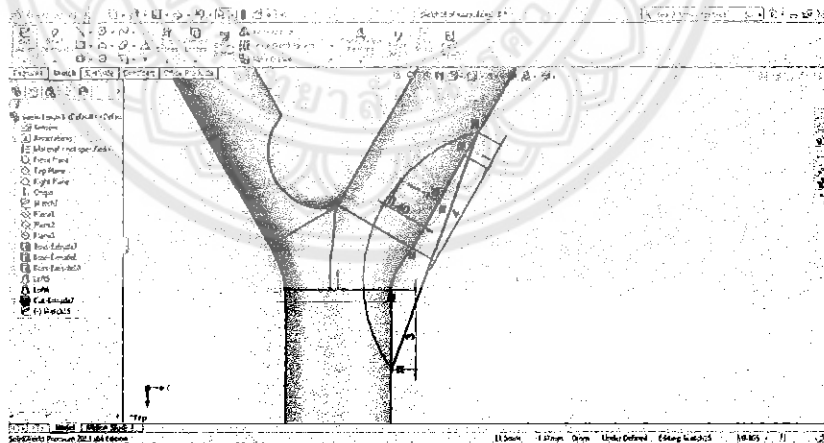


Centerline สร้างเส้นขนานที่บล็อดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่ทางเข้าหลอดเลือดแขนงหลักขึ้นไปยาว 4 mm และสร้างเส้นความหนาของการถอดต้นขนาด 1.6 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ขนาดของรอยถอดต้นที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

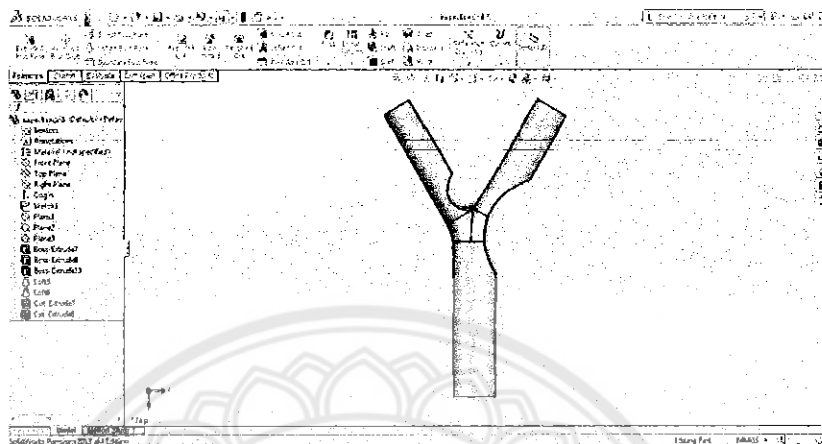
5. สร้างส่วนโค้งของวงกลมจากตำแหน่งที่กำหนดในรูปที่ 3.21 โดยใช้คำสั่ง 3 Point Arc และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การถอดต้นดังแสดงในรูปที่ 3.22 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



รูปที่ 3.22 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดต้นที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

6. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ

Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.23 เพื่อทำการตัดส่วนที่อุดตันออก ซึ่งจะทำให้ได้หลอดเลือดแยกสองง่ามที่มีการอุดตันที่ 50% ที่กรณีการอุดตัน S ตามการจำแนกของ Movahed [1]

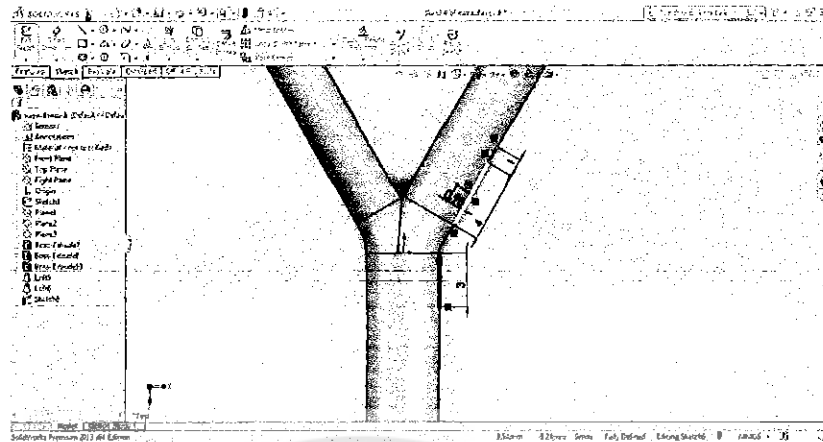


รูปที่ 3.23 หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณี S ที่มีระดับการอุดตัน 50%

### 3.2.4 กรณี L-2-V

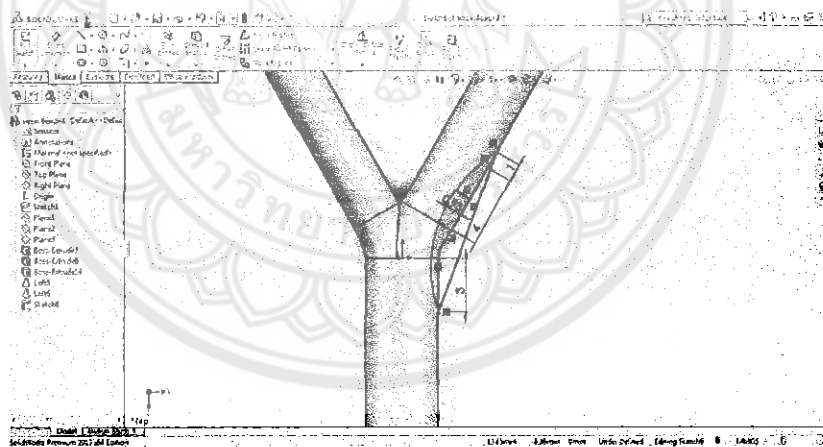
หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันแบบ L-2-V [1] จะเกิดการอุดตันที่ 2 แขนงคือ การอุดตันที่บริเวณหลอดเลือดแขนงหลักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm ทั้ง 2 ด้าน โดยการอุดตันที่ผนังด้านนอกจะครอบคลุมเข้าไปในบริเวณหลอดเลือดหลัก บริเวณ Bifurcation และหลอดเลือดแขนงหลัก ในขณะที่การอุดตันของผนังด้านในจะครอบคลุมเข้าไปในหลอดเลือดแขนงหลักเท่านั้น และการอุดตันที่บริเวณหลอดเลือดแขนงรองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 mm โดยผนังด้านในและผนังด้านนอกจะครอบคลุมเข้าไปหลอดเลือดแขนงรองเท่านั้น

1. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบ จากนั้นเลือกคำสั่ง Sketch เพื่อทำการเขียนแบบร่างของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก โดยใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานยาว 3 mm ทับเส้นหลอดเลือดหลักโดยเริ่มจากทางเข้าส่วน Bifurcation ลงมา และสร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่ทางเข้าหลอดเลือดแขนงหลักขึ้นไปยาว 4 mm และ 1 mm ติดกันเนื่องจากหลอดเลือดแยกสองง่ามที่อุดตันตามการจำแนกของ Movahed [1] มีลักษณะที่ส่วนของหลอดเลือดแขนงหลักด้านนอกมีความยาวมากกว่าด้านในอยู่เล็กน้อย และสร้างเส้นความหนาของการอุดตัน เป็นตัวอย่างการสร้างเส้นโค้งจากผนังหลอดเลือดแขนงหลักลึกเข้าไป 0.954 mm ที่การอุดตัน 50% ดังแสดงในรูปที่ 3.24



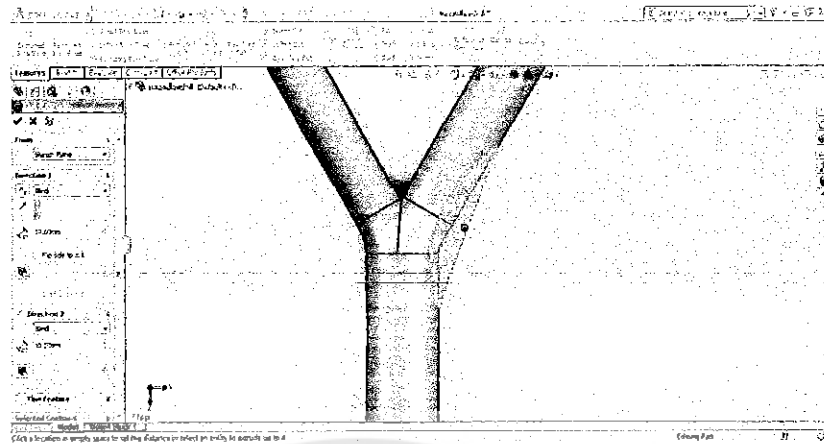
รูปที่ 3.24 ขนาดของรอยอดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

2. สร้างส่วนโค้งของวงกลมจากตำแหน่งที่กำหนดในรูปที่ 3.24 โดยใช้คำสั่ง 3 Point Arc และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การอดตันดังแสดงในรูปที่ 3.25 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



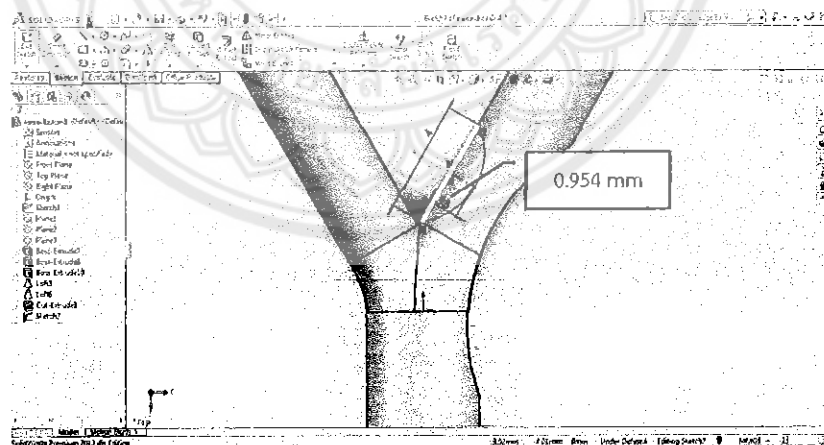
รูปที่ 3.25 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

3. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.26 เพื่อทำการตัดส่วนที่อดตันออก



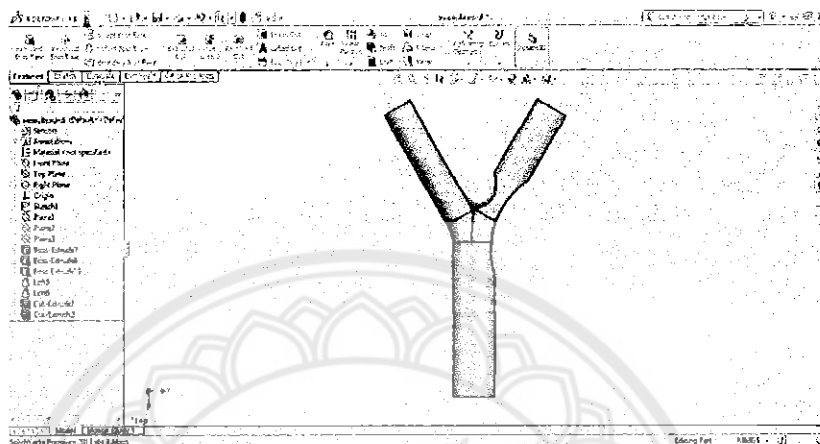
รูปที่ 3.26 พื้นที่การถอดต้นส่วนที่จะตัดออก

4. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบเช่นเดิม แต่ทำการ Sketch ภาพแบบร่างของรอยถอดต้นจากผนังด้านนอกเปลี่ยนเป็นผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก จากนั้นใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่จุด Apex ของทางแยกขึ้นไปทางหลอดเลือดแขนงหลักยาว 4 และสร้างเส้นความหนาของการถอดต้นขนาด 0.954 mm จากนั้นใช้สร้างคำสั่ง 3 Point Arc สร้างส่วนโค้งของวงกลม และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การถอดต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.27 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



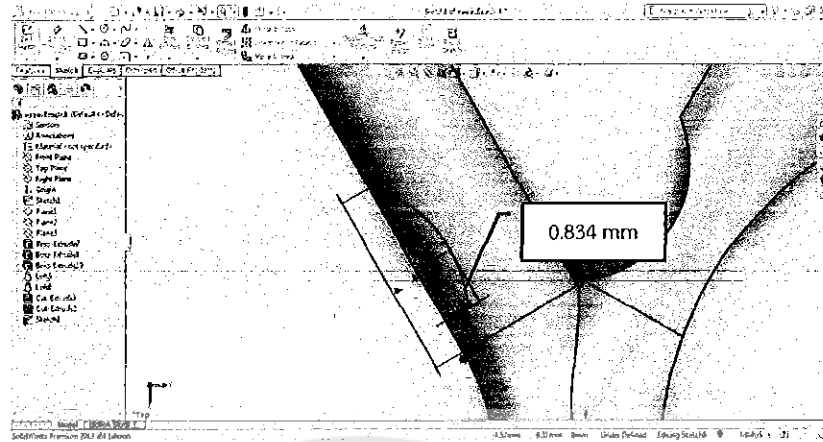
รูปที่ 3.27 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดต้นที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก

5. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.28 เพื่อทำการตัดส่วนที่อุดตันออก



รูปที่ 3.28 ลักษณะการอุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก

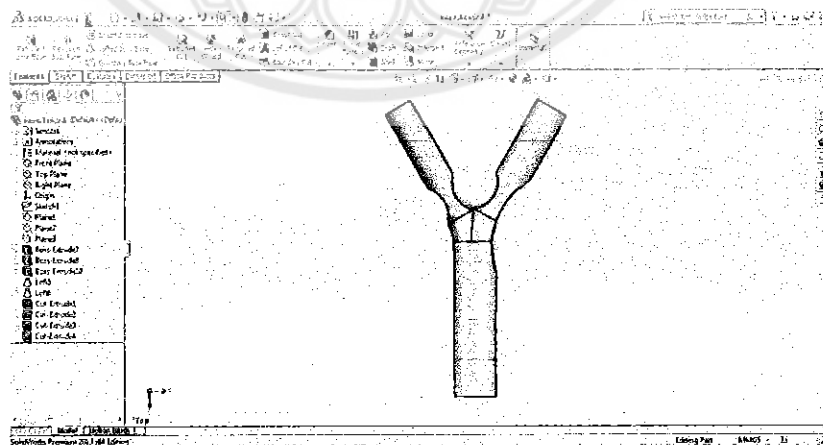
6. สุดท้ายเป็นการสร้างการอุดตันในหลอดเลือดแขนงรองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 mm) โดยใช้ขั้นตอนเหมือนกับการสร้างการอุดตันในหลอดเลือดแขนงหลัก 1 ถึง 5 คือ เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบอีกครั้ง แต่เปลี่ยนหลอดเลือดแขนงที่จะทำการ Sketch ภาพจากหลอดเลือดแขนงหลักเป็นหลอดเลือดแขนงรอง จากนั้นใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่ทางเข้าหลอดเลือดแขนงรองขึ้นไปยาว 4 และสร้างเส้นแสดงความหนาของการอุดตันขนาด 0.834 mm จากนั้นใช้สร้างคำสั่ง 3 Point Arc สร้างส่วนโค้งของวงกลม และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การอุดตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.29 จากนั้นออกจากคำสั่ง Sketch



รูปที่ 3.29 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงรอง

7. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) เพื่อทำการตัดส่วนที่ถอดตันออก

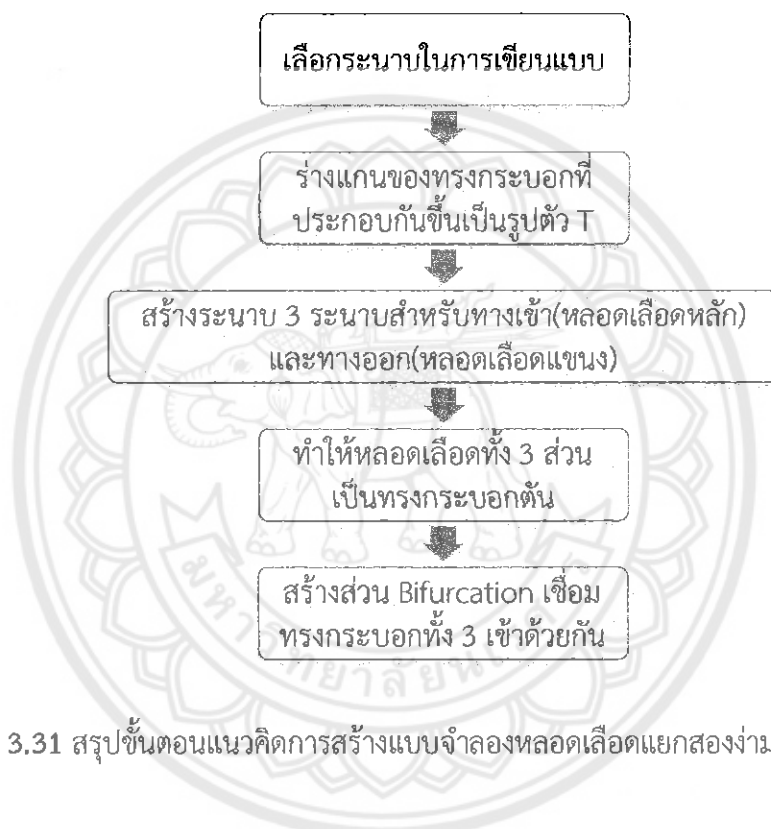
8. ทำการ Sketch ภาพการถอดตันของหลอดเลือดแขนงรองด้านใน โดยใช้ตามคำสั่งและขนาดตามข้อที่ 6. และทำการตัดพื้นที่ที่ถอดตันออกโดยใช้คำสั่งตามข้อที่ 7. ซึ่งจะทำให้ได้หลอดเลือดแยกสองง่ามถอดตันที่มีการถอดตันที่ 50% ที่กรณีการถอดตัน L-2-V ตามการจำแนกของ Movahed [1] ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 หลอดเลือดแยกสองง่ามถอดตันกรณี L-2-V ที่มีระดับการถอดตัน 50%

### 3.3 หลอดเลือดแยกสองง่ามกรณีรูปตัว T (ไม่มีส่วนที่อุดตัน)

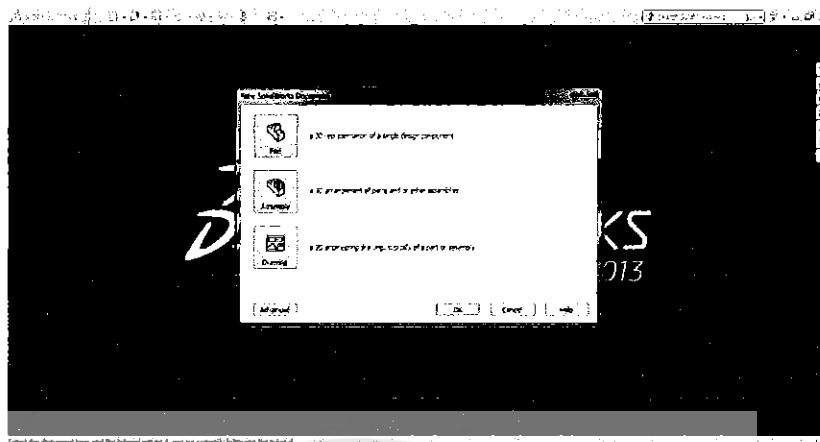
เนื่องจากมุมของหลอดเลือดแขนงหลักและหลอดเลือดแขนงรองกรณีตัว T ตามการจำแนกของ Movahed [1] มีค่ามากกว่ามุมในกรณีการอุดตันอื่นๆ (รูปตัว Y) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองของหลอดเลือดขึ้นมาใหม่แต่ใช้วิธีในการสร้างแบบจำลองเหมือนแบบจำลองหลอดเลือดปกติ ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 สรุปลขั้นตอนแนวคิดการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติกรณีตัว T

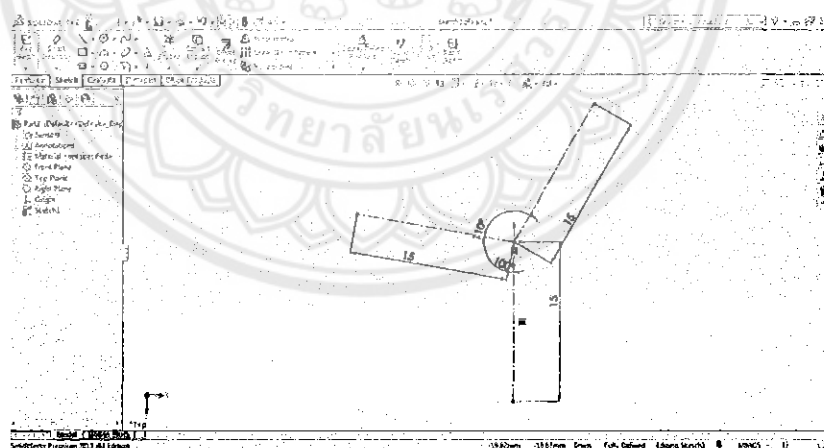
รายละเอียดขั้นตอนในการเขียนแบบหลอดเลือดแยกสองง่ามรูปตัว T เป็นดังต่อไปนี้

3.3.1 เปิดโปรแกรม Solidworks ขึ้นมา จากนั้นเลือกคำสั่ง New ที่เมนู File เมื่อหน้าต่าง (New Solidworks Document) ปรากฏ ให้เลือกคำสั่ง Part กด OK ดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การกำหนดพื้นที่เบื้องต้นในการเขียนแบบ

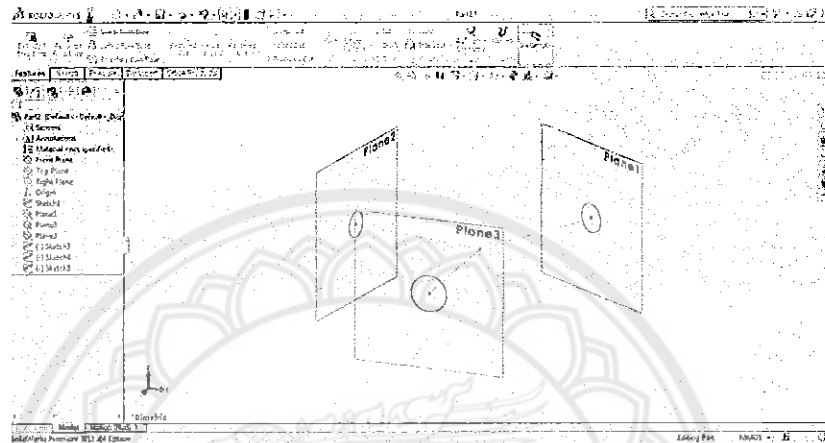
3.3.2 เลือกคำสั่ง Top Plane ให้เป็นระนาบในการเขียนแบบ จากนั้นเลือกคำสั่ง Sketch เพื่อทำการเขียนแบบร่างของหลอดเลือด โดยใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นร่างและใช้คำสั่ง Smart Dimension กำหนดขนาด ซึ่งความยาวของหลอดเลือดหลักและหลอดเลือดทั้งสองแขนงมีขนาด 15 mm และมุมระหว่างหลอดเลือดสาขา มีขนาด  $110^{\circ}$  จากนั้นออกจากคำสั่ง Sketch เพื่อร่างแกนสำหรับหลอดเลือด ดังแสดงในรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 การกำหนดขนาดและสร้างแกนของแบบร่างหลอดเลือด

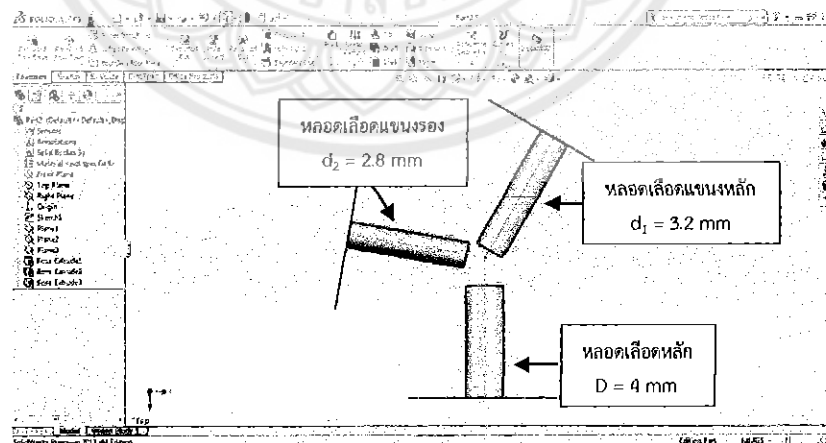


3.3.3 เลือกคำสั่ง Reference Geometry ภายใต้เมนูของ Features โดยเลือกคำสั่งย่อย Plane เพื่อทำการสร้างระนาบที่ส่วนปลายของหลอดเลือด จากนั้นใช้คำสั่ง Circle วาดวงกลมใน Plane ที่สร้างขึ้น โดยให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดเลือดหลัก หลอดเลือดแขนงหลัก และหลอดเลือดแขนงรองมีขนาด 4 mm, 3.2 mm และ 2.8 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 การสร้างวงกลมในระนาบเพื่อเตรียมสร้างหลอดเลือดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ

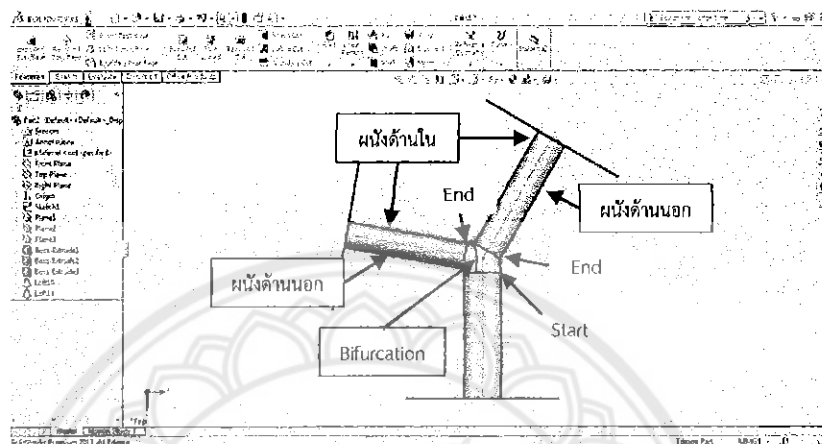
3.3.4 เลือกคำสั่ง Extruded Boss/Base ภายใต้เมนูของ Features เพื่อให้แบบร่างในรูปที่ 3.2 และ 3.3 เป็นท่อนตัน โดยกำหนดขนาดความยาวของท่อหลอดเลือดหลัก และหลอดเลือดแขนงทั้งสองเป็น 13.5 mm และ 12.25 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 แบบร่างของหลอดเลือดทั้งสามที่มีลักษณะเป็นทรงตัน

3.3.5 เลือกคำสั่ง Lofted Boss/Base ภายใต้เมนูของ Features เพื่อเชื่อมหลอดเลือดหลักและหลอดเลือดแขนงเข้าด้วยกัน (ส่วน Bifurcation) เป็นแบบจำลองของหลอดเลือดแยก

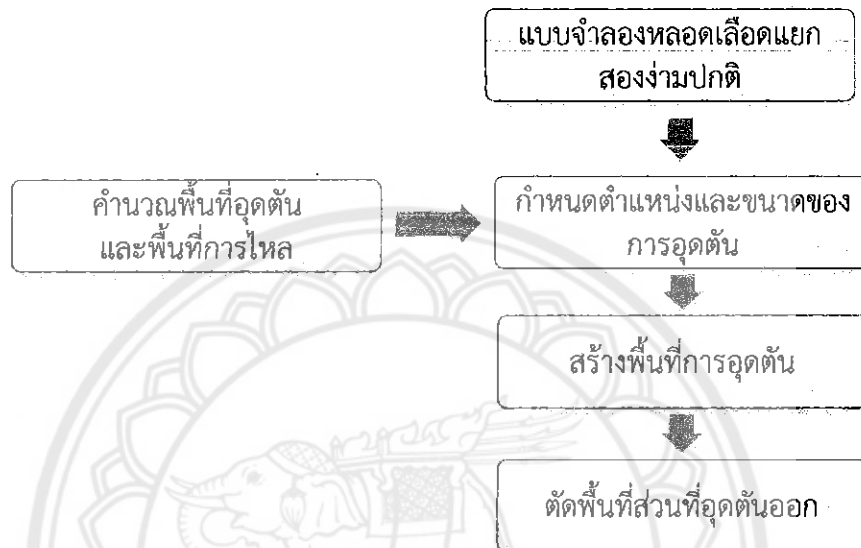
สองง่าม ดังแสดงในรูปที่ 3.36 โดยกำหนดให้การเชื่อมเป็นแบบ Tangency To Face ทั้งส่วน Start และส่วน End จากนั้นทำการบันทึกโดย save เป็นทั้ง SolidWorks Part Document (.SLDPRT) และ STEP File (.STEP)



รูปที่ 3.36 แบบจำลองของหลอดเลือดแยกสองง่ามที่เสร็จสมบูรณ์หลังจากใส่ส่วน Bifurcation เชื่อมกระบอกทั้งสาม

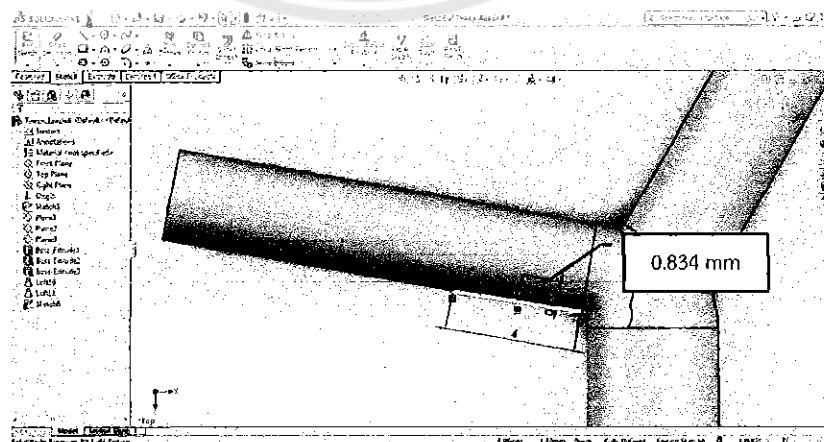
### 3.4 หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันรูปตัว T

หลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันแบบ T [1] มีลักษณะการอุดตันเช่นเดียวกับหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันแบบ L-2-V [1]



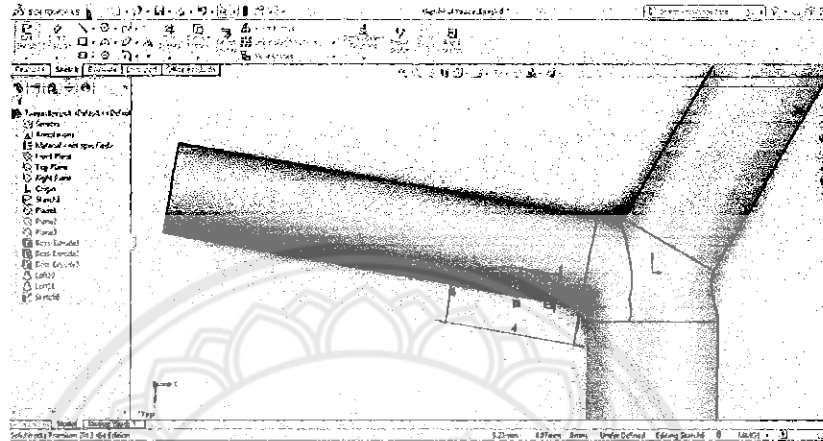
รูปที่ 3.37 สรุปขั้นตอนแนวคิดการสร้างแบบจำลองหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณีตัว T

1. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบ จากนั้นเลือกคำสั่ง Sketch เพื่อทำการเขียนแบบร่างของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงรอง โดยใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่ทางเข้าหลอดเลือดแขนงหลักขึ้นไปยาว 4 mm และสร้างเส้นความหนาของการอุดตันขนาด 0.834 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.38



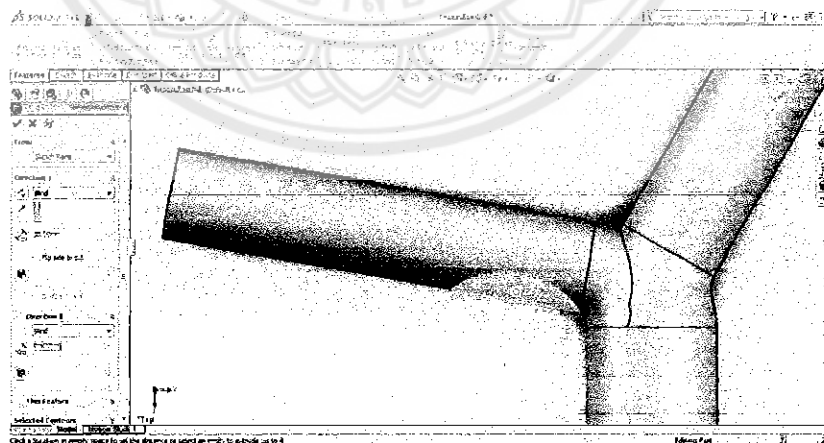
รูปที่ 3.38 ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

2. สร้างส่วนโค้งของวงกลมจากตำแหน่งที่กำหนดในรูปที่ 3.27 โดยใช้คำสั่ง 3 Point Arc และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การถอดตัดดังแสดงในรูปที่ 3.39 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



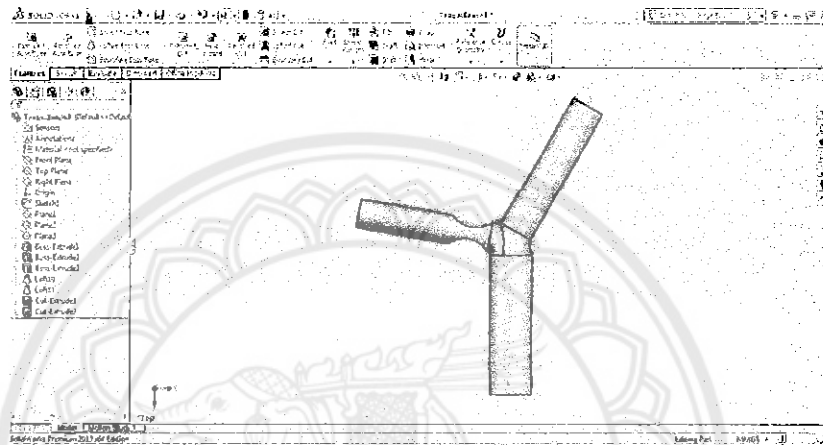
รูปที่ 3.39 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดตัดที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

3. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.40 เพื่อทำการตัดส่วนที่ถอดตัดออก



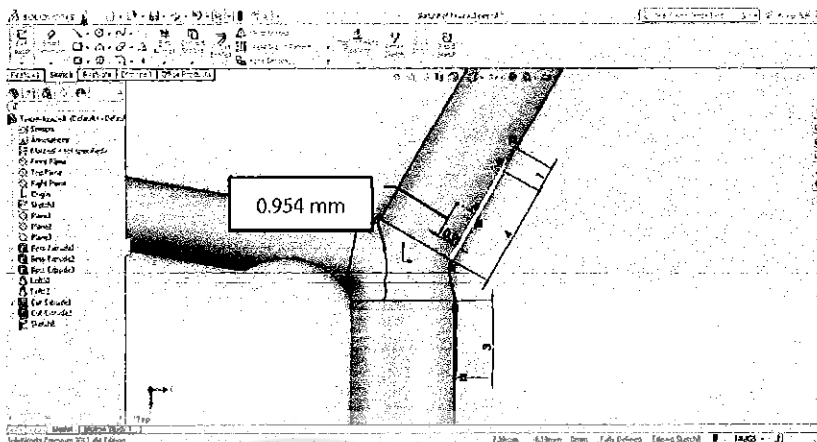
รูปที่ 3.40 พื้นที่การถอดตัดส่วนที่จะตัดออก

4. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบเช่นเดิม แต่ทำการ Sketch ภาพแบบร่างของรอยอุดตันจากผนังด้านนอกเปลี่ยนเป็นผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงรอง จากนั้นใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่จุด Apex ของทางแยกขึ้นไปทางหลอดเลือดแขนงหลักยาว 4 และสร้างเส้นความหนาของการอุดตันขนาด 0.954 mm จากนั้นใช้คำสั่งในข้อที่ 2 และ 3 เพื่อสร้างพื้นที่อุดตันและตัดพื้นที่อุดตันออก ดังแสดงในรูปที่ 3.41



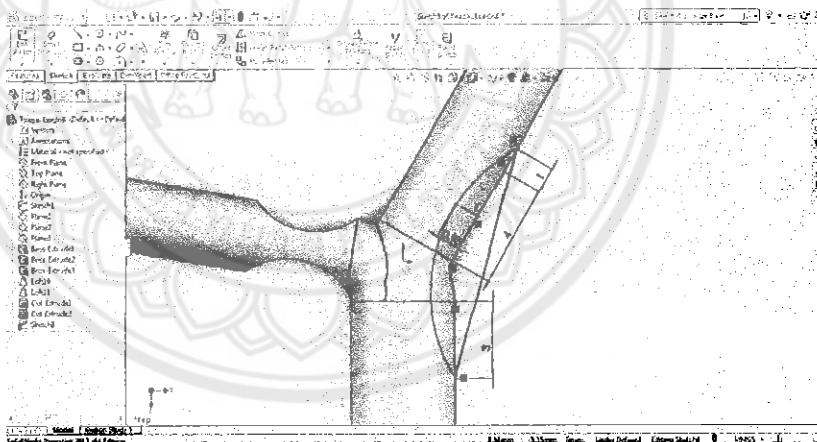
รูปที่ 3.41 ลักษณะการอุดตันของหลอดเลือดแขนงรองกรณี T

5. สุดท้ายเป็นการสร้างการอุดตันในหลอดเลือดแขนงหลักที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm) โดยใช้ขั้นตอนเหมือนกับการสร้างการอุดตันในหลอดเลือดแขนงหลัก 1 ถึง 3 คือ เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบอีกครั้ง แต่เปลี่ยนหลอดเลือดแขนงที่จะทำการ Sketch ภาพจากหลอดเลือดแขนงรองเป็นหลอดเลือดแขนงหลัก จากนั้นใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่ทางเข้าหลอดเลือดแขนงหลักขึ้นไปยาว 4 mm และ 1 mm ติดกัน และสร้างเส้นความหนาของการอุดตันเข้าไป 0.954 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.42



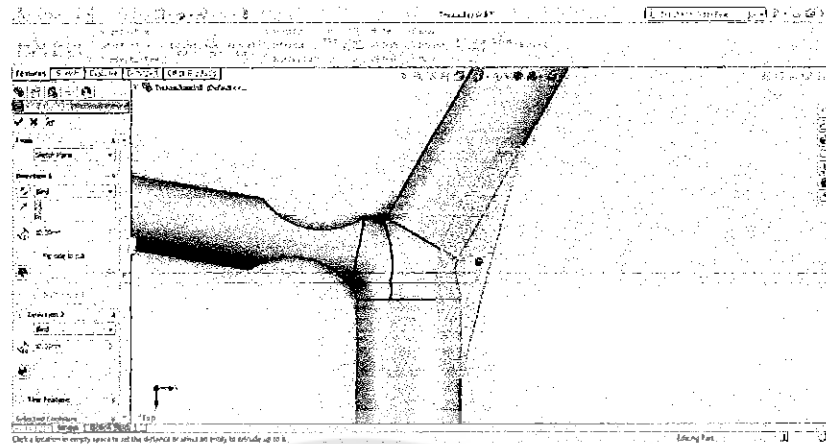
รูปที่ 3.42 ขนาดของรอยอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

6. สร้างส่วนโค้งของวงกลมจากตำแหน่งที่กำหนดในรูปที่ 3.42 โดยใช้คำสั่ง 3 Point Arc และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การอุดตันดังแสดงในรูปที่ 3.43 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



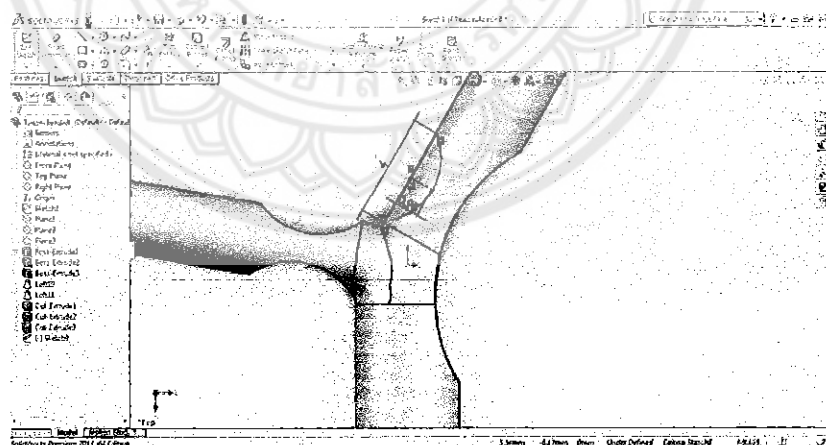
รูปที่ 3.43 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการอุดตันที่ผนังด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

7. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.44 เพื่อทำการตัดส่วนที่อุดตันออก



รูปที่ 3.44 พื้นที่การถอดต้นส่วนที่จะตัดออก

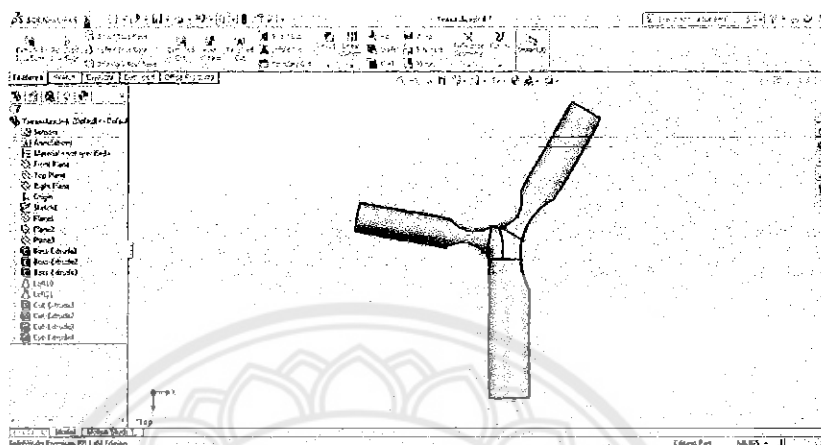
8. เลือก Top Plane เป็นระนาบในการเขียนแบบเช่นเดิม แต่ทำการ Sketch ภาพแบบร่างของรอยถอดต้นจากผนังด้านนอกเปลี่ยนเป็นผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก จากนั้นใช้คำสั่ง Centerline สร้างเส้นขนานทับหลอดเลือดแขนงหลักโดยเริ่มตั้งแต่จุด Apex ของทางแยกขึ้นไปทางหลอดเลือดแขนงหลักยาว 4 และสร้างเส้นความหนาของการถอดต้นขนาด 0.954 mm จากนั้นใช้สร้างคำสั่ง 3 Point Arc สร้างส่วนโค้งของวงกลม และใช้คำสั่ง Line สร้างเส้นปิดพื้นที่การถอดต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.45 จากนั้นออกคำสั่ง Sketch



รูปที่ 3.45 ลักษณะและขนาดการ Sketch ส่วนโค้งของการถอดต้นที่ผนังด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก

9. เลือกคำสั่ง Cut Extruded ภายใต้เมนูของ Features โดยกำหนดให้เป็นการตัดทั้ง Direction 1 (ส่วนด้านหลังของระนาบ Top Plane) และ Direction 2 (ส่วนด้านหน้าของระนาบ

Top Plane) ดังแสดงในรูปที่ 3.46 เพื่อทำการตัดส่วนที่อดตันออก ซึ่งจะทำให้ได้หลอดเลือดแยกสองง่ามที่มีการอดตันที่ 50% ที่กรณีการอดตัน T ตามการจำแนกของ Movahed [1]



รูปที่ 3.46 หลอดเลือดแยกสองง่ามอดตันกรณี T ที่มีระดับการอดตัน 50%

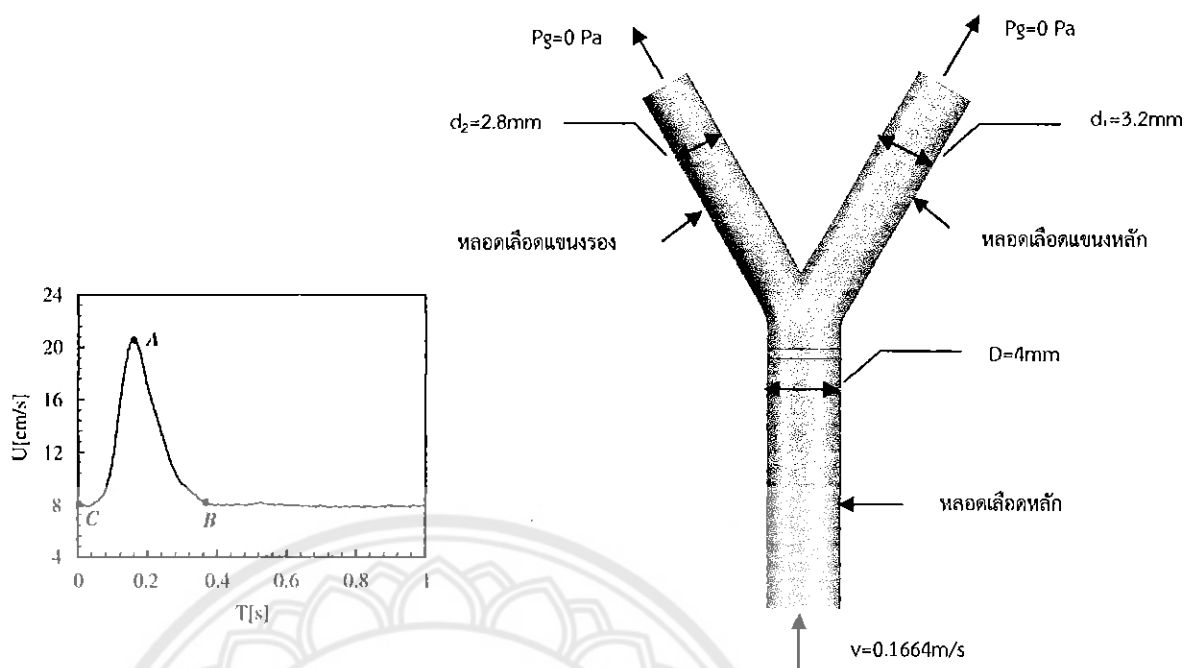


## บทที่ 4

### ขั้นตอนการคำนวณ

#### 4.1 โดเมนการคำนวณ (Computational Domain)

สำหรับการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลของหลอดเลือดแยกสองง่าม (Bifurcation) ด้วยการใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ COMSOL ในการคำนวณการไหลผ่านรูปทรงสามมิติของหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติและหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณีต่างๆ ตามการจำแนกของ Movahed [1] โดยกำหนดให้เลือดเป็นของไหลแบบ Non-Newtonian ที่ประพฤติตนตามแบบจำลอง Carreau-Yasuda การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ที่สถานะคงที่ (Steady State) และเป็นการไหลใน 3 มิติ ที่จังหวะคายตัวของหัวใจ (Diastole) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) ซึ่งตรงกับจุด B หรือ C โดยให้ค่าของเลขเรย์โนลด์ส์ที่คิดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดเลือดหลักเป็น  $Re = 233$  หลอดเลือดหลักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm หลอดเลือดแขนงหลักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm และหลอดเลือดแขนงรองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 mm โดยมีการไหลเข้าที่หลอดเลือดหลักมีความเร็ว ( $v_0$ ) เป็น  $0.1664 \text{ m/s}$  และทางออกที่หลอดเลือดแขนงหลักและหลอดเลือดแขนงรองโดยกำหนดให้ความดันเกจ ( $P_g$ ) เป็น  $0 \text{ Pa}$  นอกจากนี้ผนังหลอดเลือดมีสถานะไม่ลื่นไถล (No-slip condition)



(ก) วัฏจักรชีพจร Peak Systole (A), Begin Diastole (B) และ Diastole (C) [5]      (ข) หลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ

รูปที่ 4.1 โดเมนการคำนวณของหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ (ไม่มีส่วนที่อุดตัน)

สำหรับหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณีต่างๆตามการจำแนกของ Movahed [1] สามารถจำแนกแบบจำลองได้อีกตามลักษณะการอุดตันแบ่งออกเป็น 5 แบบจำลอง ซึ่งจำแนกได้เป็น

1. แบบ 1m คือการอุดตันด้านนอกตั้งแต่หลอดเลือดหลักไปจนถึงหลอดเลือดแขนงหลักและด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก

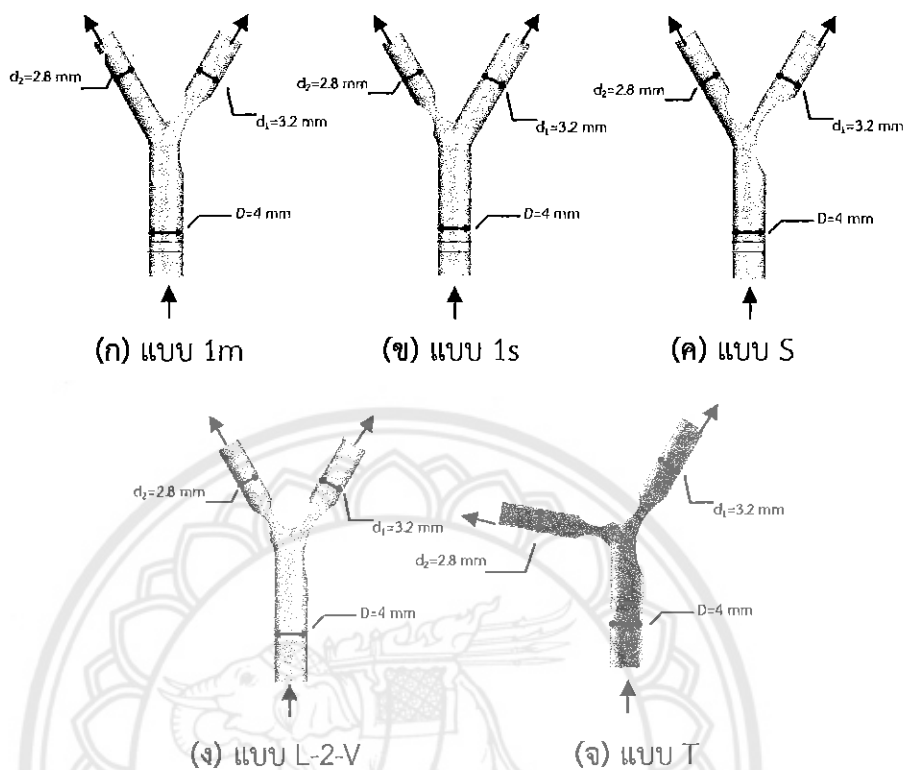
2. แบบ 1s คือการอุดตันที่หลอดเลือดแขนงรองทั้งด้านนอกและด้านใน

3. แบบ S คือการอุดตันด้านนอกตั้งแต่หลอดเลือดหลักไปจนถึงหลอดเลือดแขนงหลักและด้านในของหลอดเลือดแขนงรอง

4. แบบ L-2-V มีลักษณะการอุดตันคล้ายกันคือการอุดตันด้านนอกตั้งแต่หลอดเลือดหลักไปจนถึงหลอดเลือดแขนงหลักและด้านในของหลอดเลือดแขนงรอง

5. แบบ T คือการอุดตันด้านนอกตั้งแต่หลอดเลือดหลักไปจนถึงหลอดเลือดแขนงหลักและด้านในของหลอดเลือดแขนงหลักและมีการอุดตันที่หลอดเลือดแขนงรองทั้งด้านนอกและด้านใน โดยที่หลอดเลือดแยกสองง่ามมีรูปทรงคล้ายตัว T

รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองของหลอดเลือดแยกสองง่ามที่มีรูปแบบการอุดตันแบบต่างๆ โดยที่ในที่นี้เป็นพื้นที่การอุดตันที่ 50 % กล่าวคือ พื้นที่การไหลของเลือดมี 50 % และพื้นที่การอุดตันมี 50 % โดยคิดจากพื้นที่หน้าตัดของการไหล วิธีการคำนวณพื้นที่การไหลและพื้นที่อุดตันแสดงในบทที่ 3 และภาคผนวก ก ในรายละเอียด



รูปที่ 4.2 โดเมนการคำนวณหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันแบบต่างๆ ที่มีการอุดตัน 50%

#### 4.2 สมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณการไหลของเลือด

ในการคำนวณการไหลของเลือดผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามในรูปที่ 4.1 (ข) และ 4.2 นั้น ต้องอาศัย สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) และสมการโมเมนตัม (Navier-Stokes Equations) โดยกำหนดให้เลือดเป็นของไหลแบบ Non-Newtonian กล่าวคือความหนืดไม่คงที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนที่มากกว่ากับของไหล และเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ ที่ประพฤติตนตามแบบจำลอง Carreau-Yasuda ภายใต้สมมติฐานการไปที่สภาวะคงที่ (Steady State) การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และเป็นกรไหลใน 3 มิติ

##### 4.2.1 สมการควบคุม (Governing Equations)

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{4.1}$$

สมการโมเมนตัม (Navier-Stokes Equations)

โมเมนตัมในแนวแกน x :

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (4.2)$$

โมเมนตัมในแนวแกน y :

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (4.3)$$

โมเมนตัมในแนวแกน z :

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (4.4)$$

โดยกำหนดให้ค่าความหนืดพลวัตในสมการโมเมนตัม (4.2) - (4.4) เป็นไปตามสมการแบบจำลอง Carreau-Yasuda ดังต่อไปนี้

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \cdot \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2} \quad (4.5)$$

เมื่อ

$\mu_{\infty}$  คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นอนันต์ ในกรณีของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.00345 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$

$\mu_0$  คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์ ในกรณีของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.056 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$

$\lambda$  คือ ค่าคงที่ ในกรณีของไหลเป็นเลือดมีค่า  $3.313 \text{ s}$

$\dot{\gamma}$  คือ อัตราเฉือน (Shear rate) มีหน่วย ต่อวินาที

$n$  คือ ค่าคงที่ไร้หน่วย ในกรณีของไหลเป็นเลือดมีค่า  $0.3568$

#### 4.2.2 Data Reduction

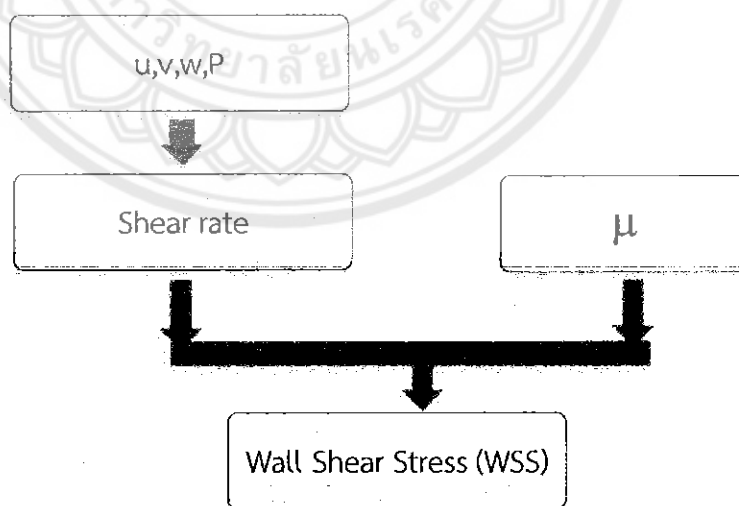
หัวข้อนี้เป็นการนำข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับความเค้นเฉือนที่ผนังเพื่อคำนวณหาความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress, WSS) หลังจากคำนวณการไหลของเลือดด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการในหัวข้อ 4.2.1 เรียบร้อยแล้ว จะได้คำตอบในรูปของความเร็วซึ่งเป็นปริมาณพื้นฐาน  $u$ ,  $v$ ,  $w$  และความดัน  $P$  ซึ่งเราสามารถคำนวณต่อเพื่อให้ได้อัตราเฉือน (Shear rate) จากอนุพันธ์ย่อยของความเร็วดังต่อไปนี้

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4.6)$$

จากนั้นจึงนำค่าความหนืดจากแบบจำลองของ Carreau-Yasuda มาคูณกับอัตราเฉือน (Shear rate) ในสมการที่ (4.6) จะได้เป็น ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress) แสดงดังต่อไปนี้

$$WSS = \mu \dot{\gamma} = \mu \frac{du_i}{dx_j} \quad (4.7)$$

ขั้นตอนต่างๆ ในการคำนวณสามารถสรุปเป็นแผนภาพในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงการคำนวณ (Flowchart)

### 4.3 การนำไฟล์เขียนแบบเข้าไปใน COMSOL

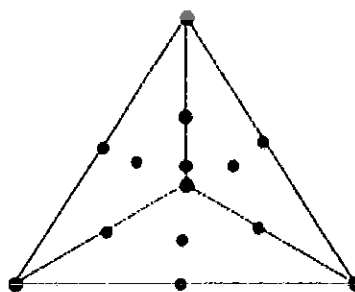
เมื่อเราเขียนแบบตลอดเลือดโดยใช้โปรแกรม SolidWorks เรียบร้อยแล้ว ขั้นถัดมาจะเป็นการนำไฟล์เขียนแบบโดยบันทึกข้อมูลในรูปแบบของนามสกุล STEP AP203 แล้วจึงใช้โปรแกรม COMSOL เปิดไฟล์ขึ้นมาเพื่อคำนวณการไหลของเลือดต่อไป โดยได้ใช้คอมพิวเตอร์ SAMSUNG ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit, CPU) Intel Core i3 และมีหน่วยความจำหลัก (Random Access Memory, RAM) 4 GB โดยใช้ระบบปฏิบัติการ 64 bit มีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดโปรแกรม COMSOL เลือก 3D ที่คำสั่ง Space Dimension หลังจากนั้นเลือก Chemical Engineering Module และ Momentum Transport เนื่องจากเลือกการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และกำหนดให้ของไหลเป็นการไหลแบบ Non-Newtonian จึงเลือก Non-Newtonian Flow จากนั้นเลือก Steady-state analysis สำหรับสภาวะคงที่

2. การ Import File ทำได้โดยเลือกคำสั่ง คำสั่ง File ต่อด้วย Import และ CAD Data From File เพื่อ Import File นั้นเลือกไฟล์ในนามสกุล STEP AP203 ที่ต้องการ จะได้ไฟล์ของโดเมนที่พร้อมในการคำนวณต่อไป

### 4.4 การสร้างเมชและการตรวจสอบผลของความหนาแน่นของเมช

หลังจากนำไฟล์เขียนแบบตลอดเลือดแยกสองง่ามเข้าไปใน COMSOL ขั้นถัดมาจะเป็นวิธีการสร้างเมชในโปรแกรม COMSOL ซึ่งใน COMSOL โดยให้รูปร่างของเมชเป็นรูปทรง tetrahedral และกำหนดให้มี 14 nodes ในการคำนวณสำหรับ 1 เมช โดยตำแหน่งของ node จะอยู่ที่มุมของรูปทรง tetrahedral จำนวน 4 nodes อยู่ที่กึ่งกลางเส้นขอบจำนวน 6 nodes และอยู่ที่กลางด้านข้างจำนวน 4 nodes ดังรูปที่ 4.4



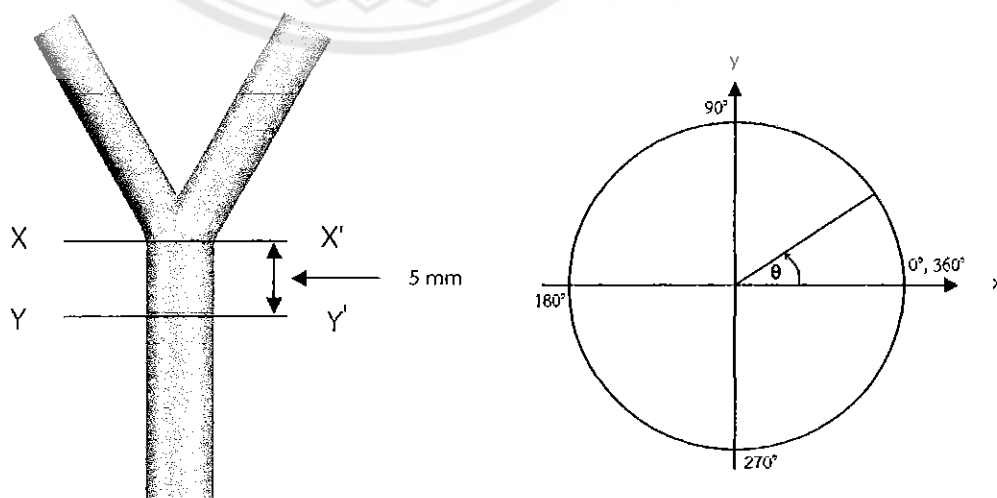
รูปที่ 4.4 รูปทรง tetrahedral

การสร้างเมชสามมิติใน COMSOL จะใช้อัลกอริทึม Delaunay ในการสร้างเมชขึ้นมา ซึ่งสร้างโดยการจัดเรียงตำแหน่งอย่างไร้รูปแบบของรูปทรง tetrahedral ให้เต็มปริมาตรของแบบจำลองที่สร้างไว้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การสร้างเมชในโดเมนการคำนวณ

ก่อนที่จะเริ่มคำนวณการไหลเราจะต้องตรวจสอบผลของความหนาแน่นของเมชต่อความความเค้นเฉือนที่ผนัง (WSS) ของ 2 หน้าตัดคือ X-X' และ Y-Y' ของหลอดเลือดแยกสองข้างปกติดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยที่หน้าตัด X-X' อยู่ที่ตำแหน่งเริ่มทางแยกและสิ้นสุดของหลอดเลือดหลัก สำหรับหน้าตัด Y-Y' อยู่ที่ตำแหน่ง 10 mm โดยวัดจากทางเข้าของหลอดเลือดหลักและอยู่ห่างจากหน้าตัด X-X' 5 mm



(a) หน้าตัด  $X - X'$  และ  $Y - Y'$

(b) มุม  $\theta$  (องศา)

รูปที่ 4.6 หน้าตัดของหลอดเลือดที่นำมาคำนวณ

ก่อนที่จะเริ่มคำนวณเรากำหนดความหนาแน่นของเมชที่จะใช้ที่  $11.85 \text{ mesh/mm}^3$ ,  $46.81 \text{ mesh/mm}^3$  และ  $147.43 \text{ mesh/mm}^3$  เรียกเป็นแบบจำลอง A, B และ C ตามลำดับ แสดงในตาราง 4.1 การเปรียบเทียบการกระจายของ WSS ที่ความหนาแน่นของเมชต่างๆ ตามผนังท่อในรูปของมุม  $\theta$  ที่หน้าตัด X-X' และ Y-Y' จะแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของเมชที่ใช้ในการทดสอบ

แบบจำลอง	ความหนาแน่นของเมช ( $\text{mesh/mm}^3$ )	เวลาในการคำนวณ (s)
A	11.85	46.057
B	46.81	204.1
C	147.43	619.296

ที่หน้าตัด X-X' สังเกตได้ว่าทั้ง 3 แบบจำลอง ที่ความหนาแน่นของเมชต่างๆ ให้การกระจายตัวของ WSS ที่มีลักษณะคล้ายกันดังรูปที่ 4.7 แต่จะมีบางจุดที่ค่าต่างกัน ทำการเปรียบเทียบกันของทั้ง 3 แบบจำลองจากการหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของแบบจำลองโดยที่

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง A และ B หาจาก

$$\% \text{difference} = \left| \frac{A - B}{A} \right| \quad (4.8)$$

เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง A และ C หาจาก

$$\% \text{difference} = \left| \frac{A - C}{A} \right| \quad (4.9)$$

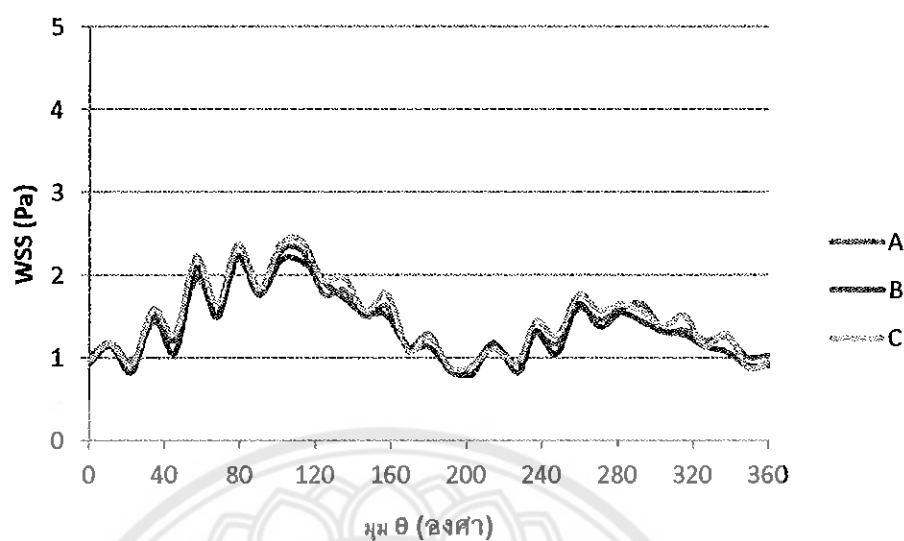
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแบบจำลอง B และ C หาจาก

$$\% \text{difference} = \left| \frac{B - C}{B} \right| \quad (4.10)$$

โดยมุม  $\theta$  ที่ค่า WSS บริเวณหน้าตัด X-X' มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันของทั้ง 3 แบบจำลอง จะอยู่ที่มุม  $\theta = 0^\circ, 67.5^\circ, 112.5^\circ, 123.75^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 292.5^\circ$  และ  $348.75^\circ$  ดังแสดงในตารางที่ 4.2

จากรูปที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่า WSS ในมุม  $\theta$  ที่ยกตัวอย่างมาข้างต้นมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันที่บางจุดอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้ เป็นเพราะที่หน้าตัด X-X' อยู่ตรงบริเวณที่เริ่มเป็นทางแยกจึงทำให้ค่า WSS มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันไม่เกิน 15%





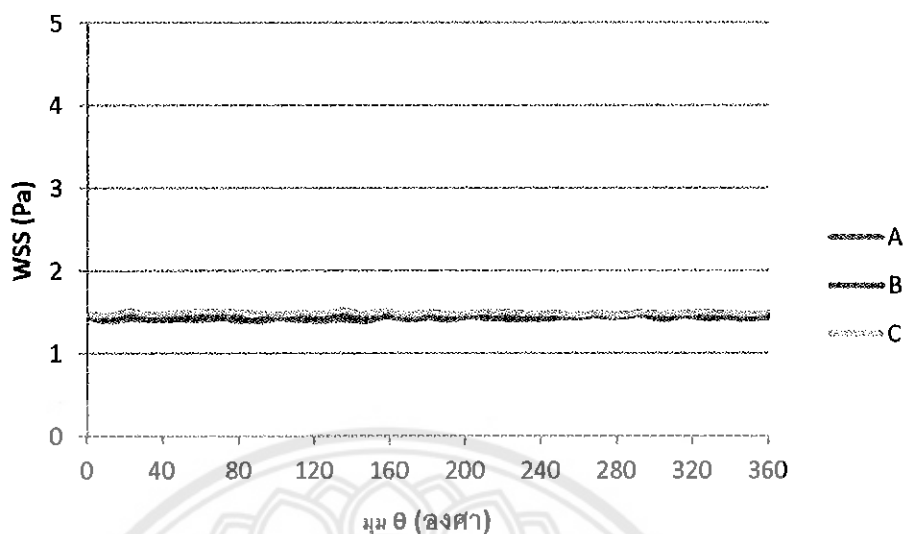
รูปที่ 4.7 การกระจายของค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง ตามผนังหลอดเลือดหลัก ที่หน้าตัด X-X'

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์ความแตกต่างของค่า WSS ที่หน้าตัด X-X'

มุม $\theta$ (องศา)	เปอร์เซนต์ความแตกต่าง (%)		
	แบบจำลอง A-B	แบบจำลอง A-C	แบบจำลอง B-C
0	9.46	6.92	2.79
67.5	2.57	7.33	11.31
112.5	5.44	5.31	11.38
123.75	8.16	9.64	1.36
180	11.85	2.17	10.98
225	10.79	1.91	14.24
292.5	12.65	5.46	8.22
348.75	10.64	12.54	2.12

ที่หน้าตัด Y-Y' สังเกตได้ว่าค่า WSS มีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.8 ทำการเปรียบเทียบโดยการหาเปอร์เซนต์ความแตกต่าง ซึ่งหาจากสมการ (4.8), (4.9) และ (4.10) โดยมุม  $\theta$  ที่ค่า WSS บริเวณหน้าตัด Y-Y' มีค่าเปอร์เซนต์ความแตกต่างกันของทั้ง 3 แบบจำลอง จะอยู่ที่มุม  $\theta = 33.75^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 236.25^\circ$  และ  $303.75^\circ$  ดังแสดงในตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่า WSS ในมุม  $\theta$  ที่ยกตัวอย่างมาข้างต้นมีเปอร์เซนต์ความแตกต่างกันค่อนข้างน้อยมีเพียงบางจุดที่ค่าต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่ต่างกันไม่เกิน 7%



รูปที่ 4.8 การกระจายของค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง ตามผนังหลอดเลือดหลัก ที่หน้าตัด Y-Y'

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า WSS ที่หน้าตัด Y-Y'

มุม $\theta$ (องศา)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (%)		
	แบบจำลอง A-B	แบบจำลอง A-C	แบบจำลอง B-C
33.75	1.41	5.22	3.76
90	1.32	6.84	5.45
112.5	2.58	6.44	3.76
236.25	0.82	4.68	3.83
303.75	1.11	5.30	4.14

จากรูป 4.7 และ 4.8 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นที่ต่างกันส่งผลต่อค่า WSS ที่คำนวณได้จากบริเวณหน้าตัดทั้งสองหน้าตัดค่อนข้างน้อยเพราะมีเพียงบางจุดที่ค่าแตกต่างกันแต่ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ได้มีค่าน้อย ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลอง A มาใช้ในการคำนวณเนื่องจากใช้เวลาและหน่วยความจำในการคำนวณน้อยเมื่อเทียบกับแบบจำลอง B และ C แต่ให้ความถูกต้องสูงเหมือนกัน

## บทที่ 5

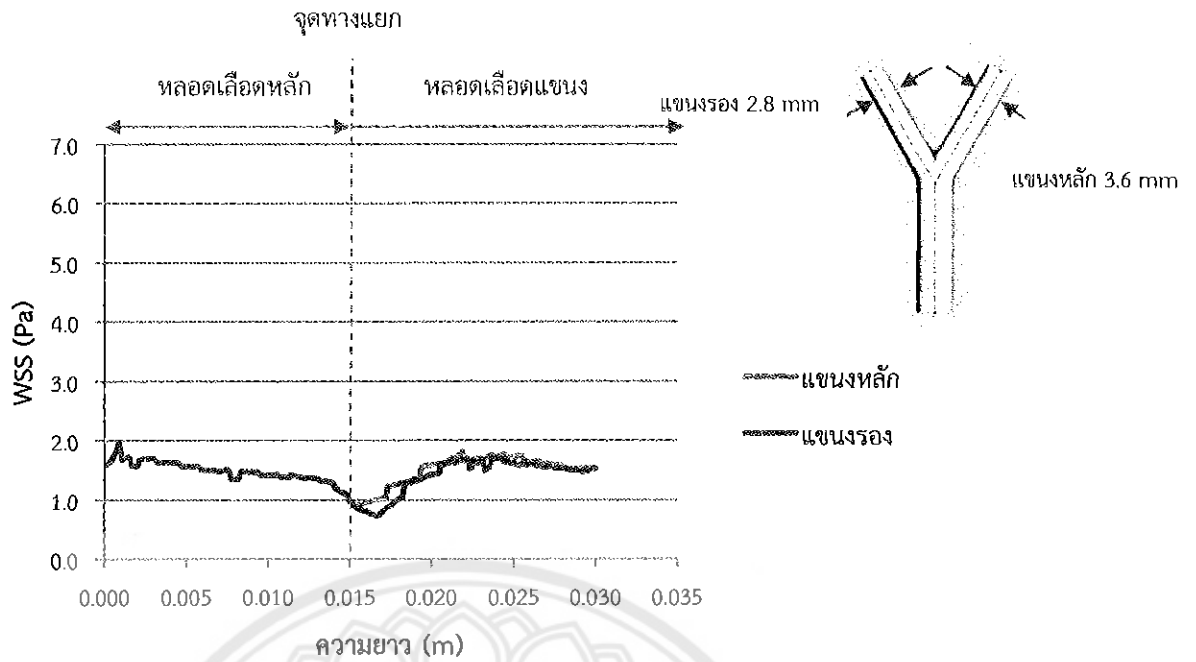
### ผลการคำนวณและอภิปรายผล

การอภิปรายผลในการวิจัยนี้เราได้แบ่งหัวข้อออกเป็นสามส่วนได้แก่ อภิปรายผล ความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress; WSS) และสนามความเร็ว (Velocity field) ของหลอดเลือดแยกง่ามปกติ ส่วนที่สองการอภิปรายผล WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือด และสนามความเร็ว (Velocity field) ของหลอดเลือดแยกสองง่ามกรณีการอุดตันรูปแบบต่างๆ และส่วนสุดท้ายการอภิปรายผลของระดับการอุดตันที่มีผลต่อค่า WSS ที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60%

#### 5.1 หลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ

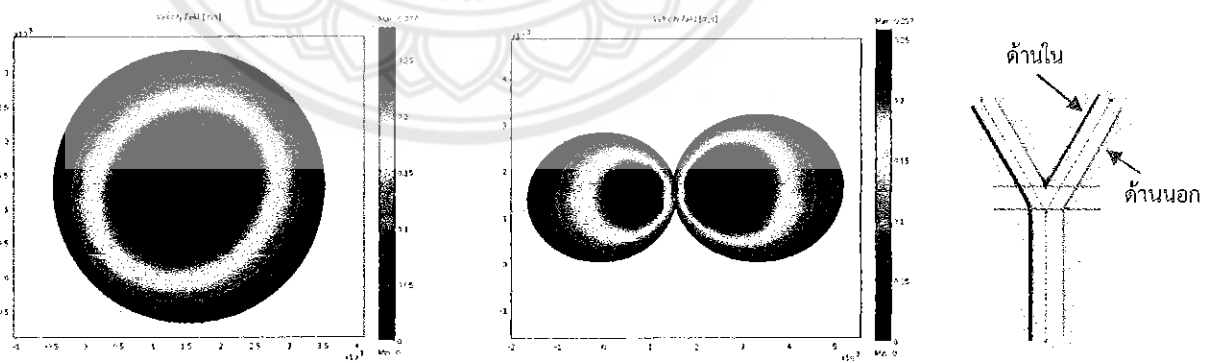
##### 5.1.1 หลอดเลือดแยกสองง่ามปกติรูปแบบทั่วไป

รูปที่ 5.1 แสดงการกระจายของ WSS จากทางเข้าของด้านหน้าหลอดเลือดหลักไปถึงหลอดเลือดแขนง สำหรับหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติพบว่า ที่บริเวณทางเข้าหลอดเลือดหลักจะมีค่า WSS (Wall Shear Stress) สูงกว่าค่าปกติเล็กน้อย 1.9-2.0 Pa จากนั้นค่อยๆลดลงโดยจะมีค่า WSS ระหว่าง 1-1.5 Pa ซึ่งเป็นค่าปกติของหลอดเลือดปกติ [7] ต่อมาจะพบว่าค่า WSS ลดลงที่บริเวณ Bifurcation ซึ่งอาจเป็นเพราะมีพื้นที่การไหลขยายใหญ่ขึ้นและแยกการไหลออกเป็น 2 ทางเข้าสู่หลอดเลือดแขนงทั้งสอง ดังแสดงในสนามความเร็วของรูปที่ 5.2(ข) ทำให้ค่า WSS ลดลงอยู่ที่ระหว่าง 0.7-0.9 Pa และเมื่อเริ่มเข้าหลอดเลือดแขนงค่า WSS จะสูงขึ้นจากนั้นจึงเข้าสู่ภาวะปกติ



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนงทั้งสองของหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ

เมื่อพิจารณาสนามความเร็ว (Velocity Field) จะพบว่าที่บริเวณทางเข้าแยกสองง่ามสนามความเร็วจะมีการ Skew ไปทางด้านหลอดเลือดแขนงรองเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ก) และจากรูปที่ 5.2 (ข) ซึ่งแสดงสนามความเร็วที่บริเวณแยกสองง่าม พบว่าสนามความเร็วมีการเบี่ยงเข้าสู่ด้านในของหลอดเลือดทั้งหลอดเลือดแขนงรองและหลอดเลือดแขนงหลัก ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเลือดระหว่างการไหลเข้าสู่หลอดเลือดแยกแขนง ดังแสดงในรูปที่ 5.2 (ข)



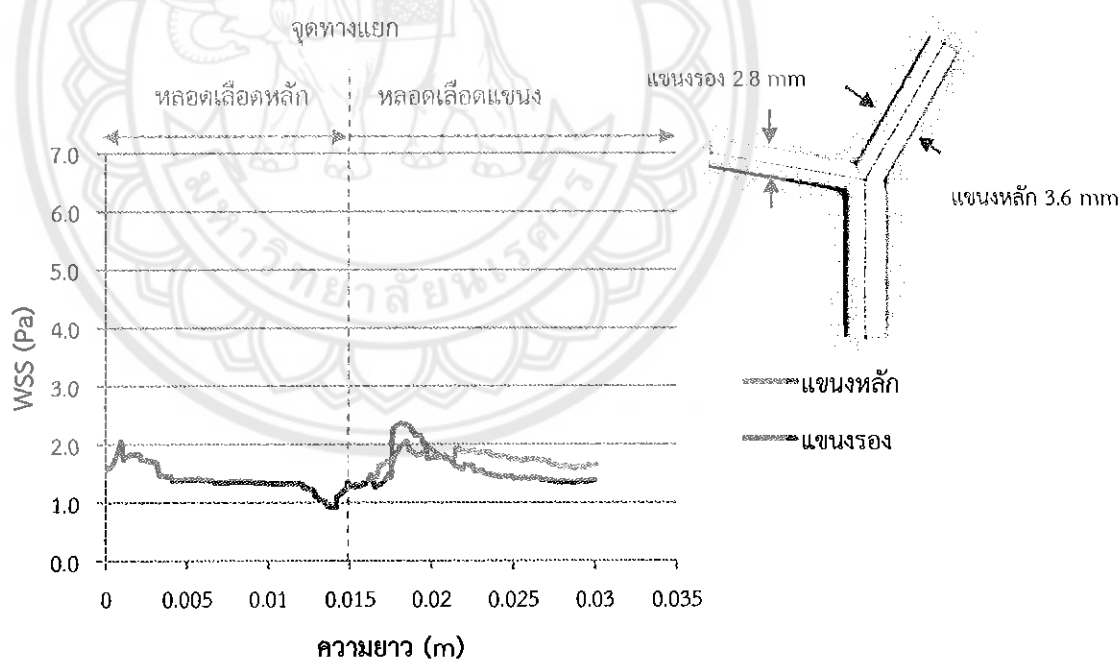
(ก) บริเวณทางเข้าแยกสองง่าม

(ข) บริเวณแยกสองง่าม

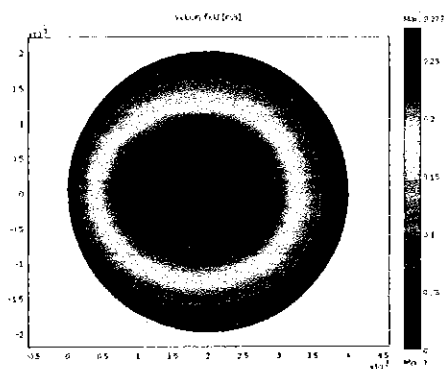
รูปที่ 5.2 สนามความเร็วของหลอดเลือดหลักที่หน้าตัดต่างๆ ของหลอดเลือดปกติ

### 5.1.2 หลอดเลือดแยกสองง่ามปกติแบบตัว T

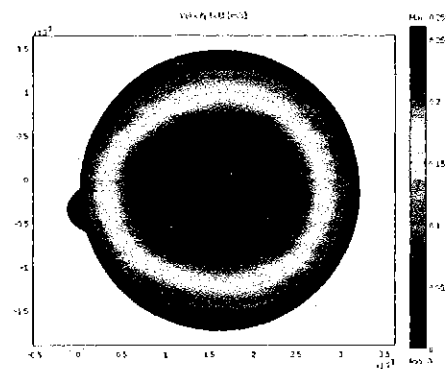
รูปที่ 5.3 แสดงการกระจายของ WSS จากทางเข้าของด้านหน้าหลอดเลือดหลัก ไปถึงหลอดเลือดแขนงสำหรับหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติแบบตัว T พบว่าที่บริเวณทางเข้าหลอดเลือดหลักมีค่า WSS (Wall Shear Stress) ใกล้เคียงกับค่าปกติโดยมีค่าสูงที่สุดที่ 2.05 Pa จากนั้นค่อยๆ ลดลงโดยมีค่า WSS ระหว่าง 1.3-1.5 Pa ซึ่งอยู่ในระดับปกติ ต่อมาพบว่า WSS ลดลงอีกครั้งที่บริเวณ Bifurcation ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดที่ 0.93 Pa อาจเป็นผลมาจากการไหลแยกออกสู่แขนงทั้งสองจึงทำให้ความเร็วลดลงและเมื่อเริ่มเข้าหลอดเลือดแขนง WSS มีค่าสูงขึ้นอยู่ระหว่าง 2.0-2.4 Pa โดยหลอดเลือดแขนงรองจะมีค่า WSS สูงกว่าหลอดเลือดแขนงหลักโดยมีค่าต่างกัน 11.56% ซึ่งอาจเป็นเพราะทางแยกของแขนงรองมีลักษณะหักมุม 100 องศา กับการไหลจากหลอดเลือดหลัก ดังแสดงในสนามความเร็วรูปที่ 5.4 (ค) จะเห็นว่าสนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรองจะเบี่ยงเข้าสู่หลอดเลือดด้านใน ส่วนสนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรองยังคงมีลักษณะอยู่ตรงกลาง ดังแสดงในรูปที่ 5.4 (ข) หลังจากเข้าสู่หลอดเลือดแขนงแล้วค่า WSS จะลดลง โดยแขนงรองจะลดลงต่ำกว่าแขนงหลักต่างกันประมาณ 19.89% จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่ระดับปกติ



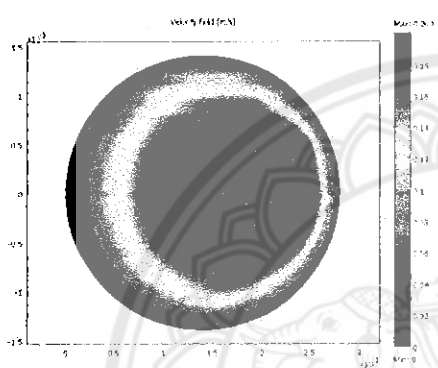
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนงทั้งสองของหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติแบบตัว T



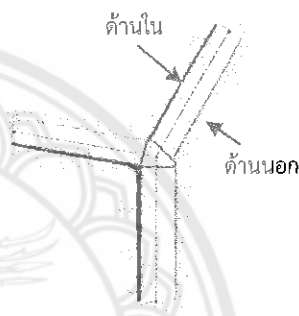
(ก) บริเวณทางเข้าแยกสองง่าม



(ข) บริเวณทางเข้าแขนหลัก



(ค) บริเวณทางเข้าแขนรอง



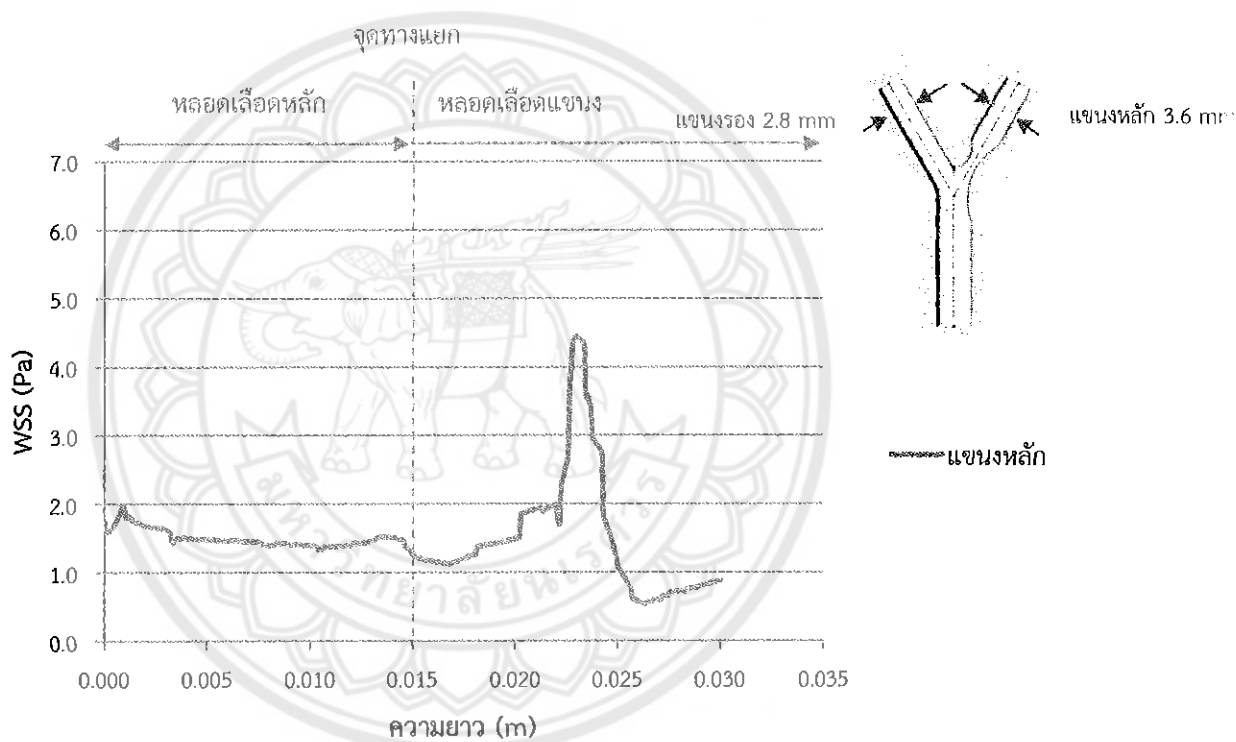
รูปที่ 5.4 สนามความเร็วของหลอดเลือดหลักที่หน้าตัดต่างๆ ของหลอดเลือดปกติแบบตัว T

## 5.2 หลอดเลือดแยกสองง่ามกรณีการอุดตันรูปแบบต่างๆ

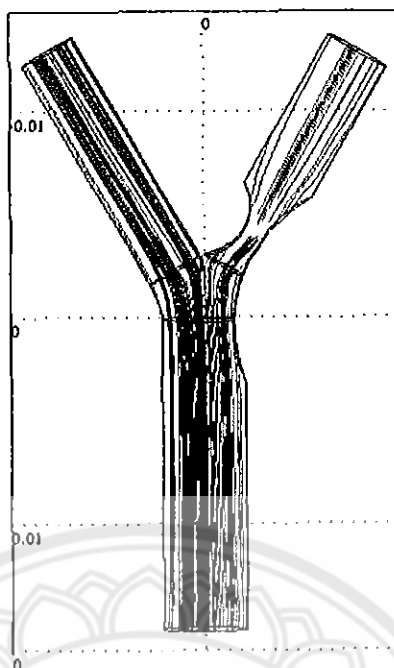
ในการพิจารณาผล WSS (Wall Shear Stress) ของหลอดเลือดแยกสองง่ามกรณีการอุดตันรูปแบบต่างๆ เราจะใช้เส้นกึ่งกลางของหลอดเลือดที่บริเวณผนังหลอดเลือดในการพิจารณา โดยจะพิจารณาการอุดตันที่ 60% เนื่องจากเมื่อการอุดตันเกินกว่า 60% ทำให้มีแนวโน้มการไหลของความปั่นป่วน (Turbulence) เกิดขึ้นในหลายกรณีซึ่งเกินขอบเขตของงานวิจัยนี้ เราจึงกำหนดระดับการอุดตันไว้ที่ 60% แต่เนื่องจากการอุดตันกรณี S เป็นการอุดตันแบบฝั่งเดียวเมื่อคิดที่การอุดตัน 60% ทำให้การอุดตันเกินกว่ากึ่งกลางของหลอดเลือดทำให้ไม่สามารถพิจารณาที่กึ่งกลางของหลอดเลือดได้ จึงลดการอุดตันเป็น 40% เพื่อใช้ในการพิจารณา WSS เท่านั้น

### 5.2.1 กรณีการอุดตันแบบ 1m

รูปที่ 5.5 แสดงผล WSS กรณีการอุดตันแบบ 1m พบว่าที่บริเวณทางเข้าหลอดเลือดหลักค่า WSS สูงกว่าปกติเล็กน้อยโดยมีค่าประมาณ 1.7-2.0 Pa จากนั้นค่า WSS จะเข้าสู่ระดับปกติที่ 1-1.5 Pa จนถึงบริเวณ Bifurcation ค่า WSS มีการลดลงเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในระดับปกติ อาจเป็นผลมาจากการไหลมีการเบี่ยงไปทางด้านแขนงรอง ดังแสดงใน Streamline รูปที่ 5.6 จากนั้น WSS เริ่มมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเริ่มเข้าสู่แยกแขนง และสูงขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุดมีค่า WSS 4.448 Pa เมื่อการไหลผ่านส่วนที่อุดตันมากที่สุดค่า WSS จะลดลงอย่างรวดเร็วมาที่ 0.66 Pa อาจเป็นผลมาจากพื้นที่การไหลขยายใหญ่ขึ้น และเมื่อเข้าสู่หลอดเลือดปกติค่า WSS ก็จะค่อยๆ สูงขึ้นจนเข้าสู่ระดับปกติ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนงหลัก (พื้นที่อุดตัน 60%)



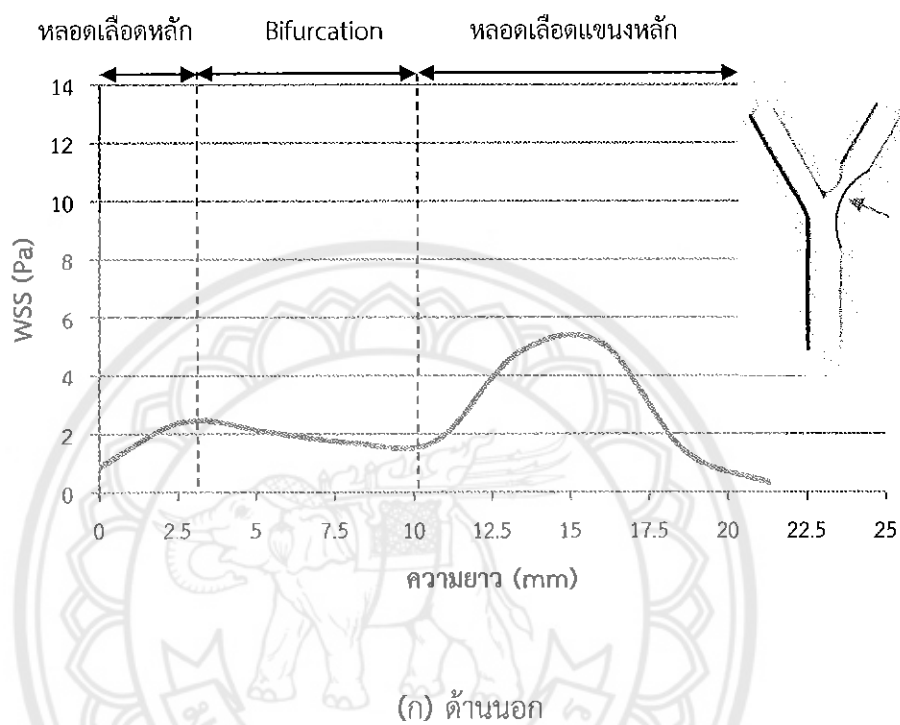
รูปที่ 5.6 Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ 1m

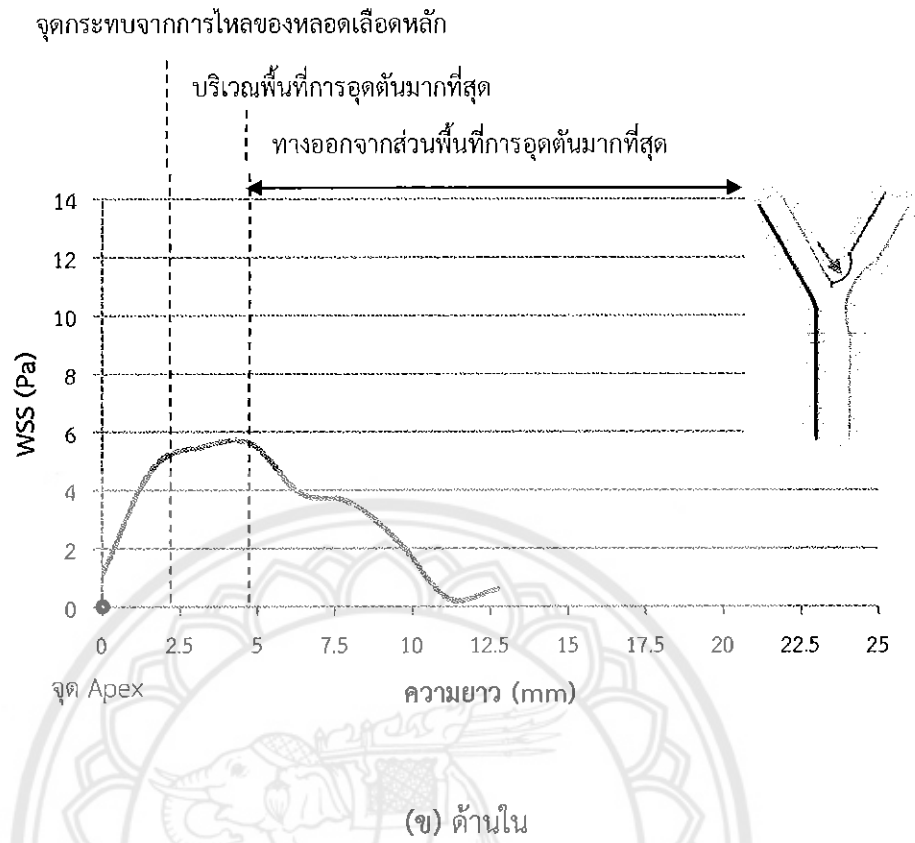
เมื่อพิจารณา WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก พบว่าบริเวณผนังการอุดตันด้านนอก รูปที่ 5.7 (ก) ที่บริเวณหลอดเลือดหลักค่า WSS สูงขึ้นจาก 1 Pa ไปที่ 2.4 Pa จากนั้นค่า WSS ค่อยๆลดลงอย่างช้าๆที่บริเวณ Bifurcation อาจเป็นผลมาจากการไหลมีการ Skew เข้าสู่ด้านในของหลอดเลือด ดังแสดงในสนามความเร็ว รูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) จากนั้นสูงขึ้นอีกครั้งที่บริเวณอุดตันสูงสุดมีค่า WSS ที่ 5.11 Pa จากนั้นค่า WSS ก็จะค่อยๆลดต่ำลงมาที่ 0.33 Pa อาจเป็นผลมาจากบริเวณส่วนท้ายของการอุดตันเริ่มเกิด Flow Separation ทำให้บริเวณผนังการอุดตันส่วนท้ายมีค่าเข้าใกล้ 0 ดังแสดงในรูปที่ 5.8

เมื่อพิจารณาบริเวณผนังการอุดตันด้านใน รูปที่ 5.7 (ข) ค่า WSS จะค่อยๆสูงขึ้นตามระดับการอุดตันของหลอดเลือดตามส่วนโค้ง โดยมีค่า WSS จากที่ประมาณ 1 Pa ไปที่ 4.74 Pa ซึ่งมีค่าสูง อาจเป็นผลมาจากที่เลยจุด Apex ไปเล็กน้อยจะเป็นจุดที่การไหลจากหลอดเลือดหลักพุ่งเข้าชน ดังแสดงใน Streamline รูปที่ 5.6 จากนั้นค่า WSS จะสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณที่เกิดการอุดตันสูงสุด โดยมีค่าที่ 5.87 Pa เนื่องจากมีพื้นที่การไหลน้อย ดังแสดงในสนามความเร็วในรูปที่ 5.9 (ข) เมื่อออกจากบริเวณที่เกิดการอุดตันสูงสุดค่า WSS จะค่อยๆลดลงเรื่อยๆ มีค่าต่ำสุดที่ 0.29 Pa ซึ่งเป็นผลมาจาก

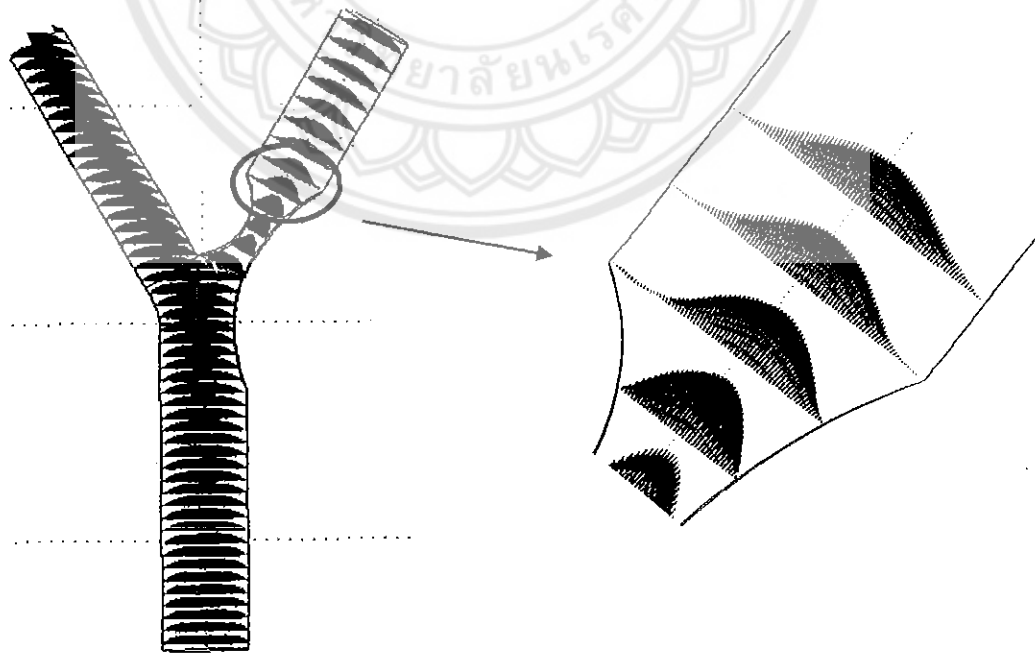


บริเวณส่วนท้ายของการอุดตันเกิด Flow Separation เช่นเดียวกับผนังการอุดตันด้านนอก แต่ผนังการอุดตันด้านในจะเกิด การไหลย้อนกลับเล็กน้อย ส่งผลให้ค่า WSS มีค่าเข้าใกล้ 0 มากกว่าผนังการอุดตันด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 5.8

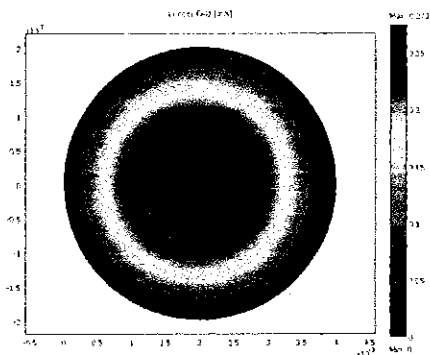




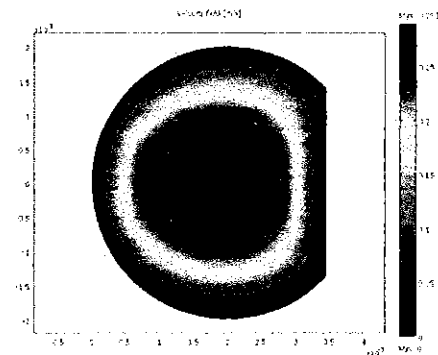
รูปที่ 5.7 WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก กรณีการอุดตันรูปแบบ 1m



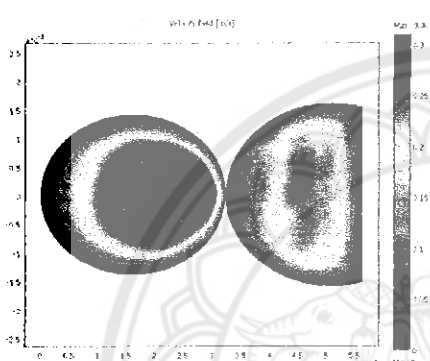
รูปที่ 5.8 สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ 1m



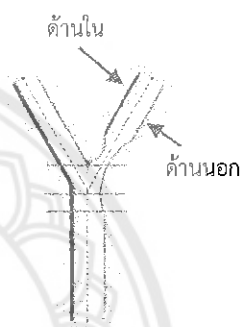
(ก) บริเวณทางเข้า



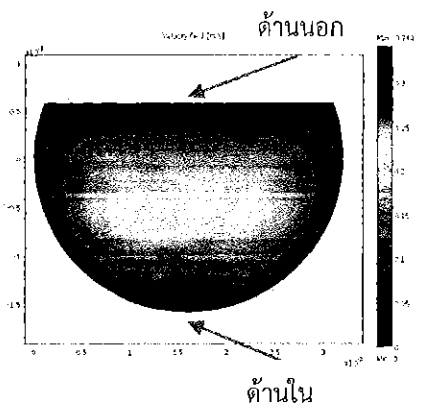
(ข) บริเวณส่วนที่อุดตัน



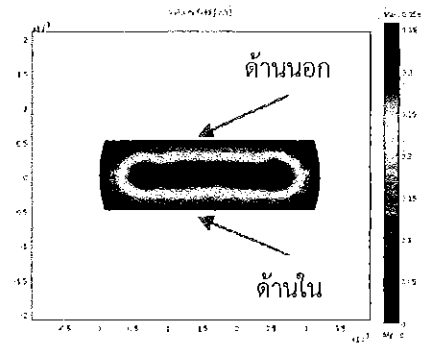
(ค) Bifurcation



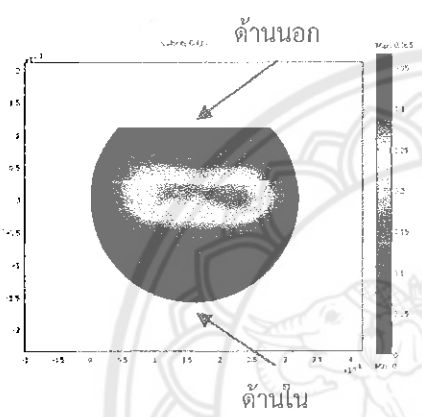
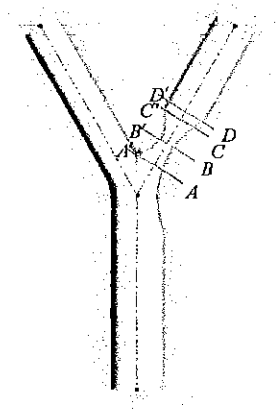
รูปที่ 5.9 สนามความเร็วของหลอดเลือดหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ 1m



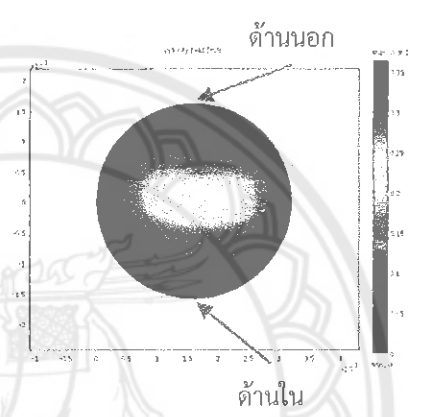
(ก) หน้าตัด A-A'



(ข) หน้าตัด B-B'



(ค) หน้าตัด C-C'

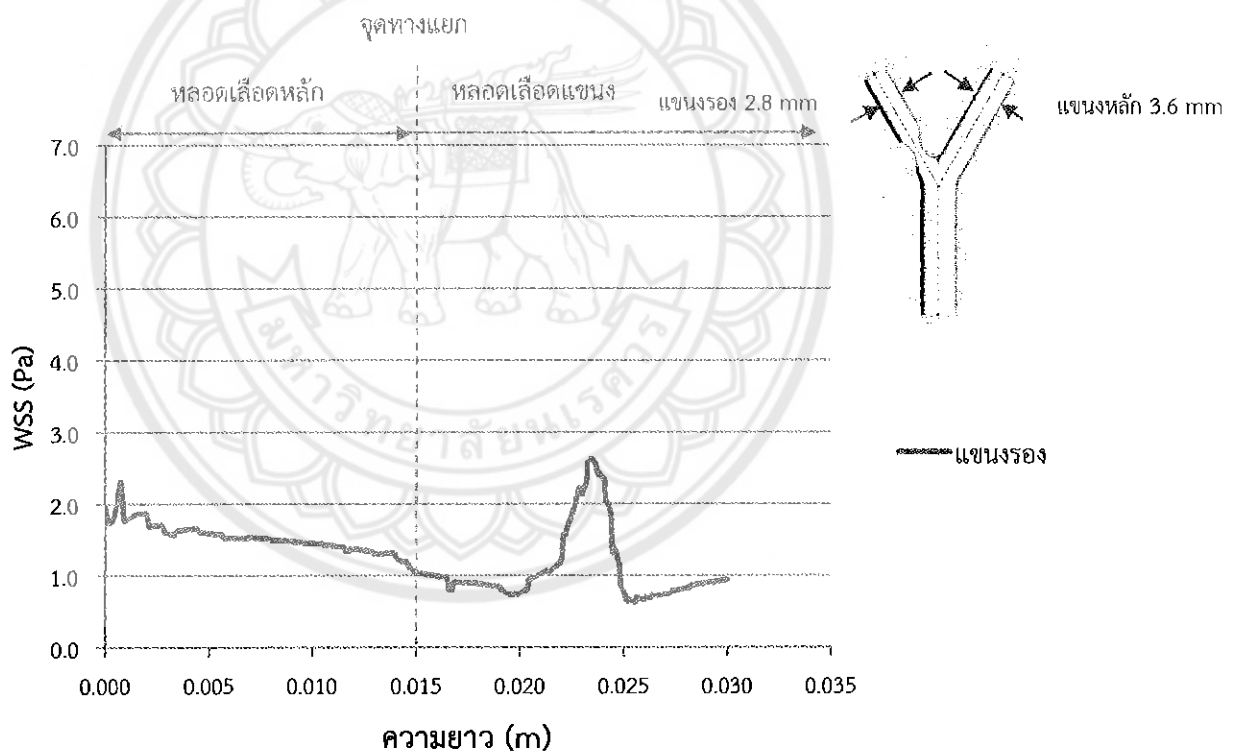


(ง) หน้าตัด D-D'

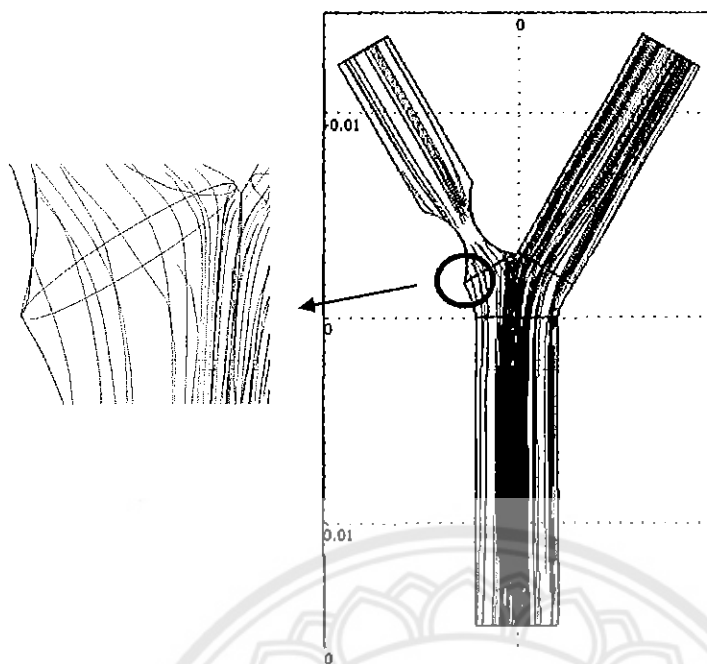
รูปที่ 5.10 สนามความเร็วของไหลอดเล็ดแขนงหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ 1m

### 5.2.2 กรณีการอุดตันแบบ 1s

รูปที่ 5.11 แสดงค่า WSS กรณีการอุดตันแบบ 1s พบว่าค่า WSS ที่บริเวณทางเข้าหลอดเลือดหลักมีค่าสูงกว่าระดับปกติเล็กน้อยโดยมีค่าที่ 1.8–2.3 Pa จากนั้นค่า WSS จะค่อยๆ ลดลง แต่ยังคงอยู่ในระดับปกติที่ 1–1.5 Pa แต่เมื่อถึงบริเวณ Bifurcation ค่า WSS จะลดลงกว่าระดับปกติเล็กน้อยมาที่ 0.9–1 Pa อาจเป็นเพราะหลอดเลือดมีการอุดตันเพียงหลอดเลือดแขนงรองเพียงฝั่งเดียว ทำให้การไหลของเลือดเบี่ยงไปทางหลอดเลือดแขนงหลักมากขึ้น ดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.12 เมื่อเข้าสู่หลอดเลือดแขนงรองที่มีการอุดตันค่า WSS จะเริ่มสูงขึ้นและสูงสุดบริเวณที่มีการอุดตันสูงสุดโดยมีค่า WSS ที่ 2.624 Pa จากนั้นเมื่อการไหลออกจากบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุดค่า WSS จะลดลงมาที่ 0.79 Pa เนื่องพื้นที่การไหลขยายใหญ่ขึ้นและสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเข้าสู่หลอดเลือดปกติ



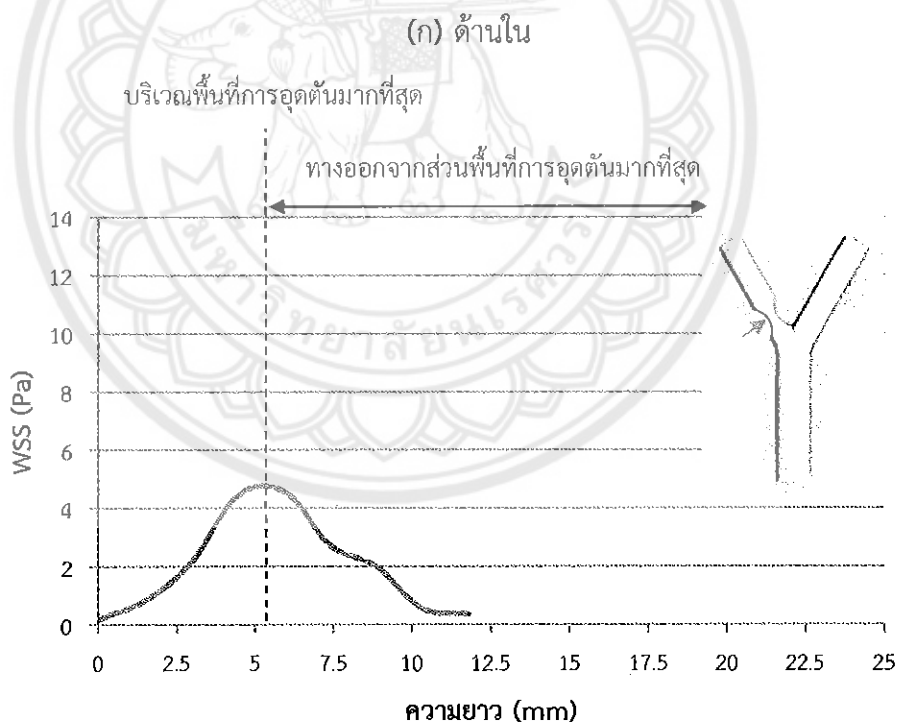
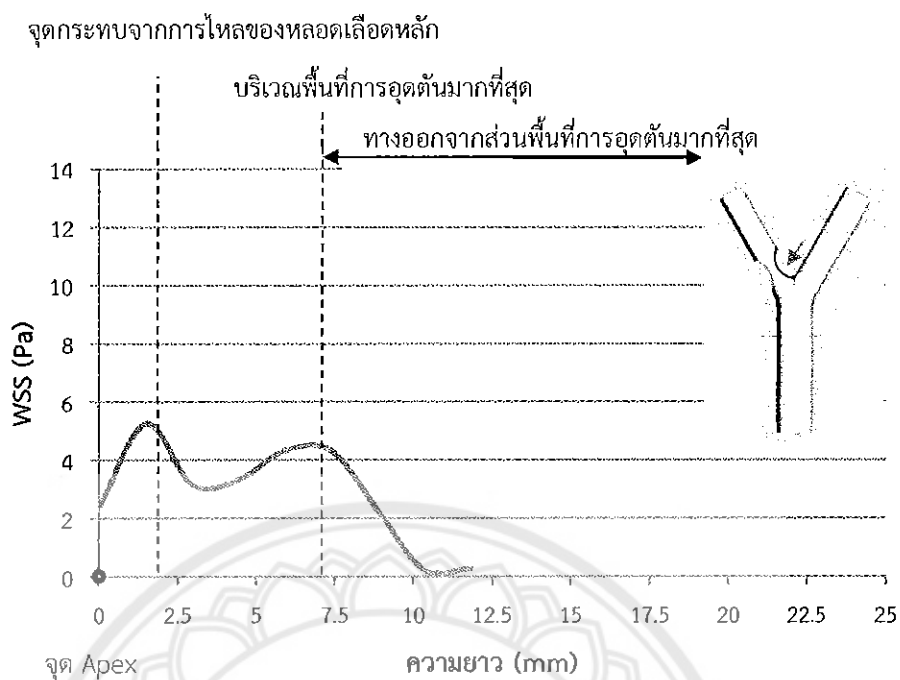
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนงรอง (พื้นที่อุดตัน 60%)



รูปที่ 5.12 Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ 1s

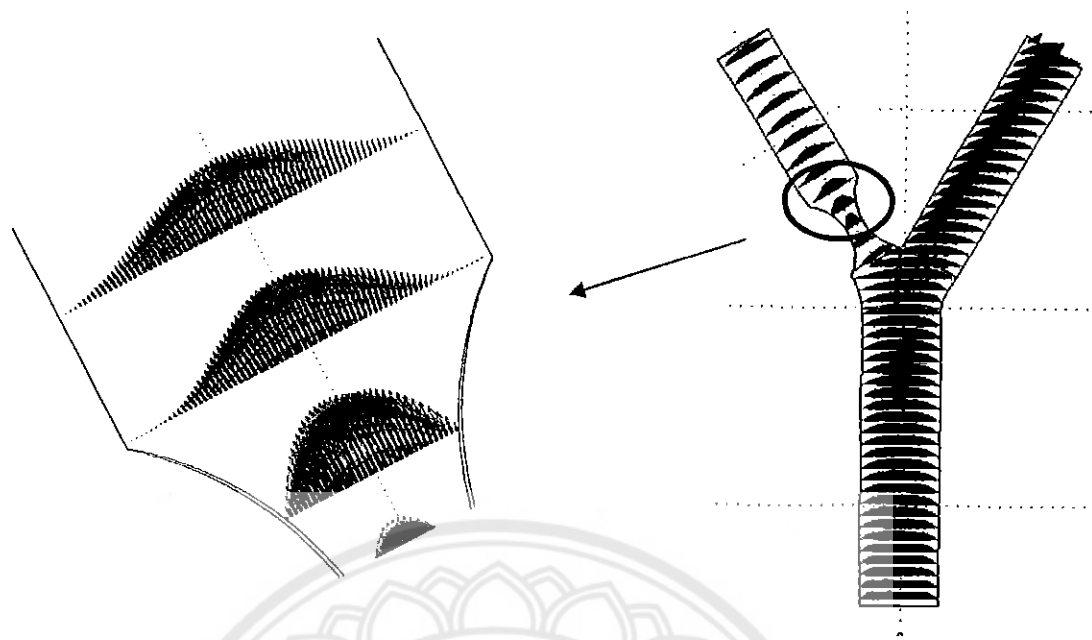
เมื่อพิจารณา WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง พบว่าบริเวณผนังการอุดตันด้านใน รูปที่ 5.13 (ก) ค่า WSS บริเวณจุด Apex จะมีค่าสูงกว่าปกติเล็กน้อยที่ 2.2 Pa อาจเป็นเพราะการไหลมีการ Skew เข้าสู่หลอดเลือดด้านใน ดังแสดงในสนามความเร็วในรูปที่ 5.15 (ก) และสูงขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 5.26 Pa อาจเป็นผลมาจากเป็นจุดที่การไหลจากหลอดเลือดหลักพุ่งเข้าชน ดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.12 จากนั้นค่า WSS จะลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งบริเวณที่มีการอุดตันสูงสุด โดยมีค่าที่ 4.3 Pa เมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันสูงสุดค่า WSS จะลดลงกว่าระดับปกติมาก โดยลดลงมาที่ 0.24 Pa อาจเป็นเพราะรัศมีความโค้งของส่วนที่อุดตันทำให้บริเวณที่ใกล้จุดสิ้นสุดการอุดตันเริ่มเกิด Flow Separation ทำให้บริเวณดังกล่าวมีค่าเข้าใกล้ 0 ดังแสดงในรูปที่ 5.14

เมื่อพิจารณาบริเวณผนังการอุดตันด้านนอก รูปที่ 5.13 (ข) ค่า WSS เริ่มต้นจะมีค่าต่ำมากกว่าระดับปกติเนื่องจากแรงเหวี่ยงจากการไหลของหลอดเลือดหลัก ทำให้บริเวณดังกล่าวได้รับแรงกระทบจากการไหลของเลือดน้อย ดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.12 จากนั้นค่าจะค่อยๆ สูงขึ้นเรื่อยๆตามพื้นที่ของการอุดตันของหลอดเลือดตามส่วนโค้งจนถึงบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุด โดยมีค่า WSS สูงสุดที่ 4.6 Pa จากนั้นก็จะค่อยๆลดลง โดยมีค่าต่ำสุดที่ 0.38 Pa เนื่องจากบริเวณหลังส่วนโค้งของการอุดตันเริ่มเกิด Flow Separation เช่นเดียวกับผนังการอุดตันด้านใน ดังแสดงในรูปที่ 5.14

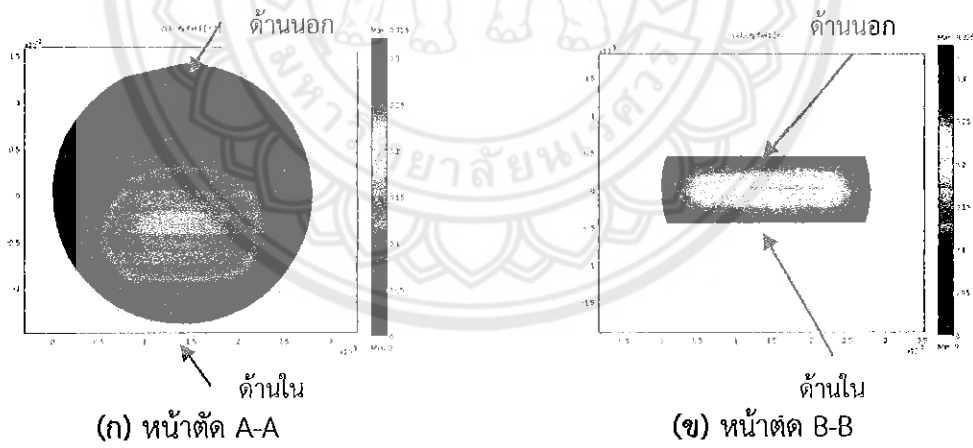


(ข) ด้านนอก

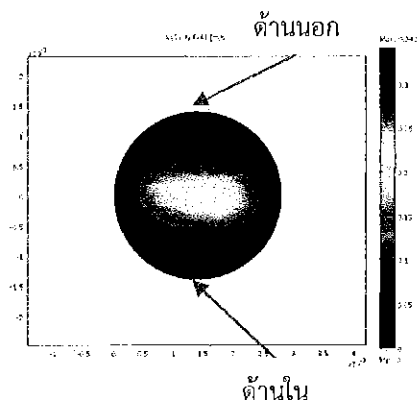
รูปที่ 5.13 WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง กรณีการอุดตันรูปแบบ 1s



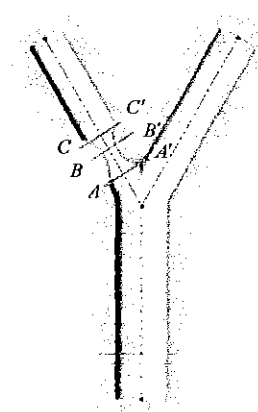
รูปที่ 5.14 สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ 1s







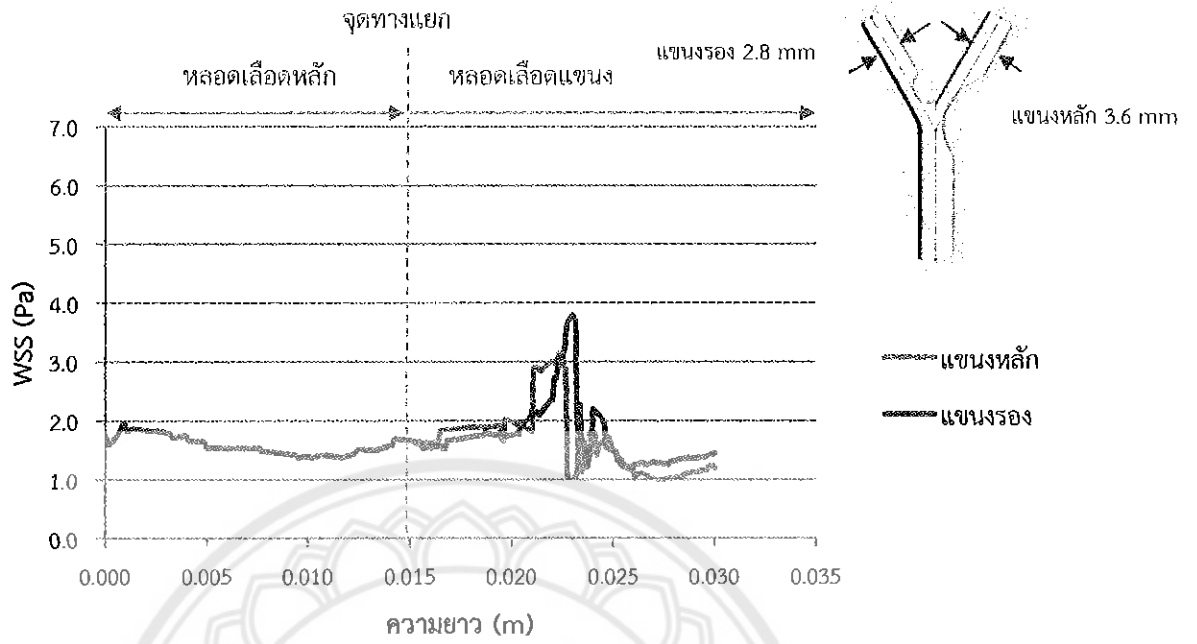
(ค) หน้าตัด C-C'



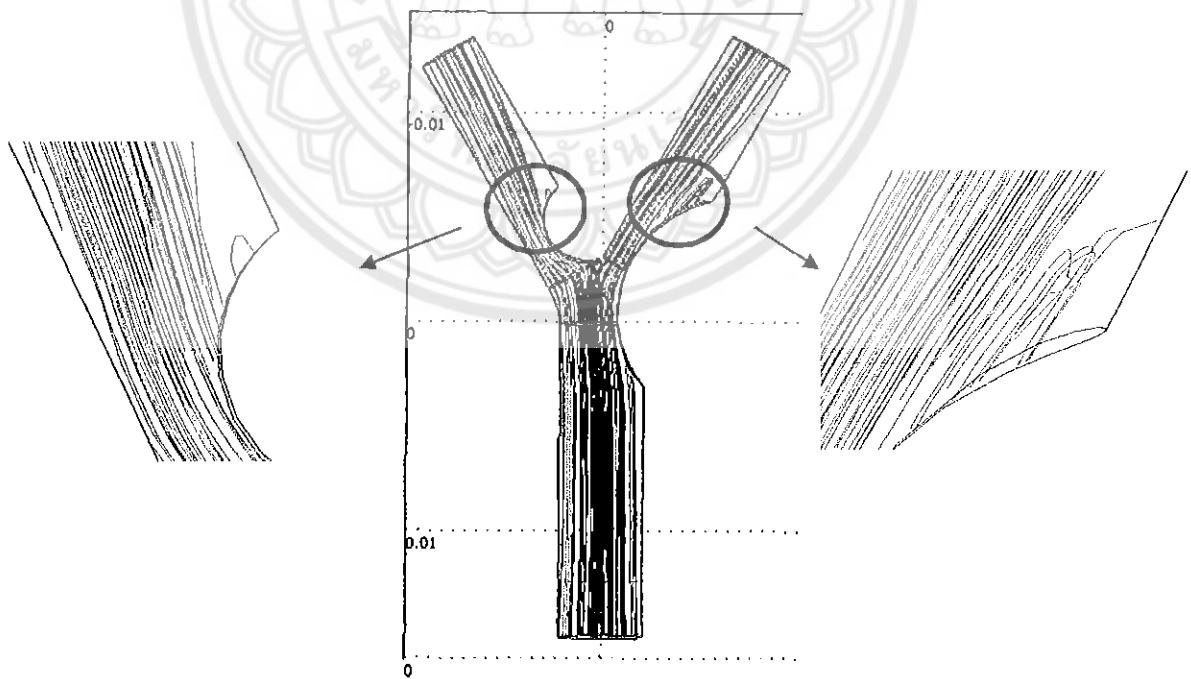
รูปที่ 5.15 สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรอง ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ 1s

### 5.2.3 กรณีการอุดตันแบบ S

รูปที่ 5.16 แสดงค่า WSS กรณีการอุดตันแบบ S พบว่าที่บริเวณทางเข้าหลอดเลือดหลักค่า WSS สูงกว่าระดับปกติเล็กน้อย มีค่าที่ 1.7-2.0 Pa จากนั้นค่าจะค่อยๆลดลงเรื่อยๆจนเข้าสู่ระดับปกติ จนถึงบริเวณ Bifurcation ค่า WSS เริ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ และสูงที่สุดบริเวณที่เกิดการตันมากที่สุด ซึ่งหลอดเลือดแขนงรองมีค่า WSS มากกว่าหลอดเลือดแขนงหลัก อาจเป็นผลมาจากรัศมีความโค้งของการอุดตันแขนงหลักมีรัศมีความโค้งสูงกว่าแขนงรอง จึงส่งผลให้การไหลของเลือดถูกเบี่ยงมาทางด้านแขนงรองมาก ดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.17 โดยหลอดเลือดแขนงรองมีค่า WSS สูงสุดที่ 3.797 Pa ส่วนหลอดเลือดแขนงหลักมีค่า WSS สูงสุดที่ 3.153 Pa ซึ่งมีค่าความต่างกันอยู่ที่ 17.047% จากนั้นเมื่อออกจากส่วนที่พื้นที่การไหลน้อยที่สุดพบว่าการลักษณะการไหลแบบไม่เป็นระเบียบมีแนวโน้มที่จะเกิดการไหลย้อนกลับ ดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.15 จึงทำให้ค่า WSS บริเวณนั้นมีค่าขึ้นๆ ลงๆ จนเมื่อถึงบริเวณหลอดเลือดปกติค่า WSS จึงเข้าสู่ระดับปกติ



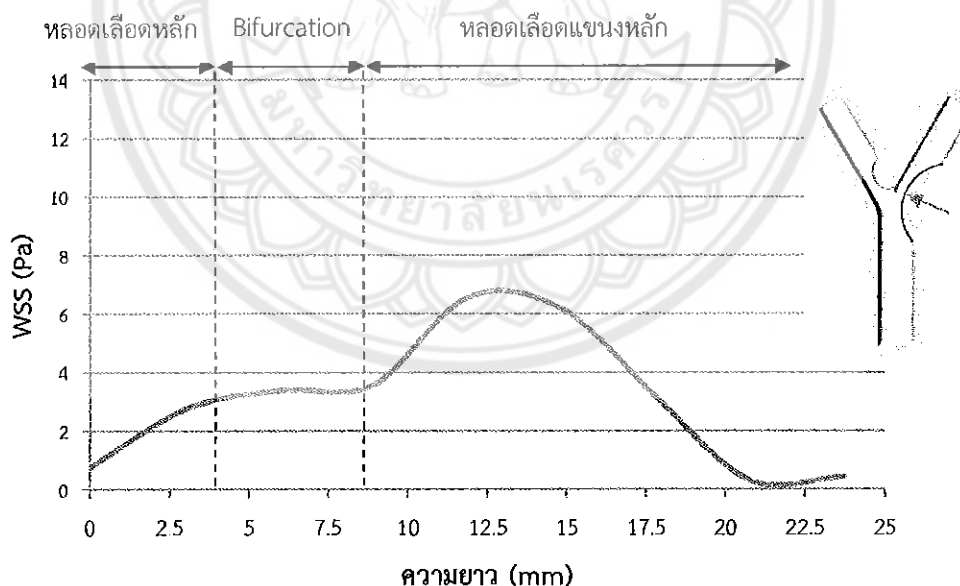
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนง (พื้นที่จุดตัน 40%)



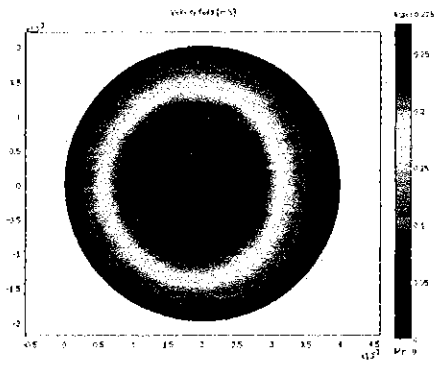
รูปที่ 5.17 Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ S

### 5.2.3.1 หลอดเลือดแขนงหลัก

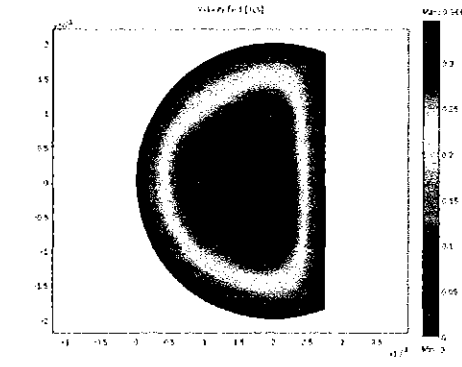
เมื่อพิจารณา WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก พบว่าที่บริเวณผนังที่อุดตันด้านนอก รูปที่ 5.18 ค่า WSS ที่บริเวณหลอดเลือดหลักมีค่าสูงขึ้นจากระดับปกติที่ 1 Pa ไปที่ 2.7 Pa อาจเป็นผลมาจากการไหลเบี่ยงเข้าสู่ส่วนที่อุดตันเล็กน้อย ดังแสดงในสนามการไหลในรูปที่ 5.19 (ข) จากนั้นค่า WSS มีค่าค่อนข้างคงที่บริเวณ Bifurcation โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.24 Pa จากนั้นค่า WSS จะสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณที่เกิดการอุดตันมากที่สุด โดยมีค่า WSS สูงสุดที่ 6.574 Pa และค่า WSS ค่อยๆ ลดลงมีค่าต่ำที่สุดที่ 0.03 Pa อาจเป็นผลมาจากการไหลการไหลมีการเบี่ยงไปทางด้านในของหลอดเลือดอย่างชัดเจน ดังแสดงในสนามความเร็วในรูปที่ 5.19 (ค) ส่งผลให้บริเวณส่วนโค้งด้านนอกบริเวณทางออกของบริเวณที่อุดตันไม่ได้รับแรงกระทบจากการไหลมากนัก และบริเวณหลังส่วนโค้งของการอุดตันเกิด Flow Separation อย่างชัดเจน ทำให้ค่า WSS มีค่าเข้าใกล้ 0 มาก ดังแสดงในรูปที่ 5.21



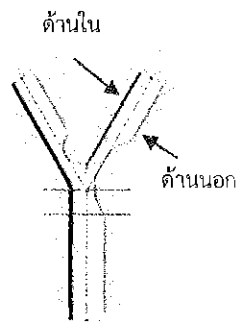
รูปที่ 5.18 WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก (ด้านนอก) กรณีการอุดตันรูปแบบ S



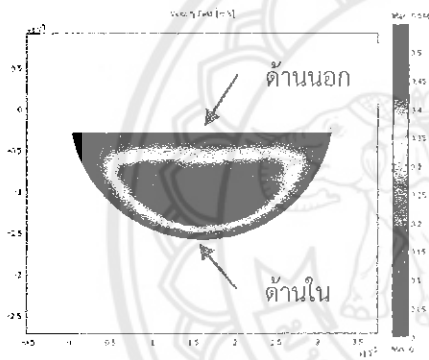
(ก) บริเวณทางเข้า



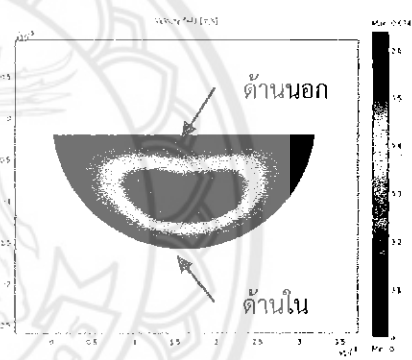
(ข) บริเวณส่วนที่อุดตัน



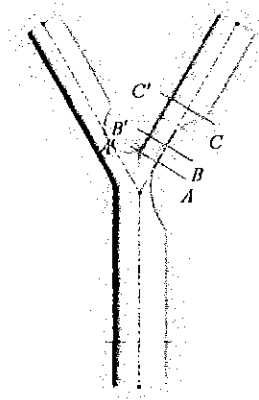
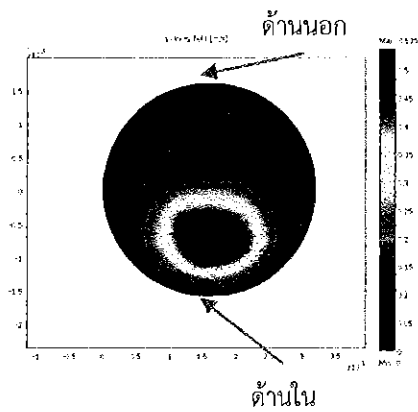
รูปที่ 5.19 สนามความเร็วของไหลอดหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ S



(ก) หน้าตัด A-A'

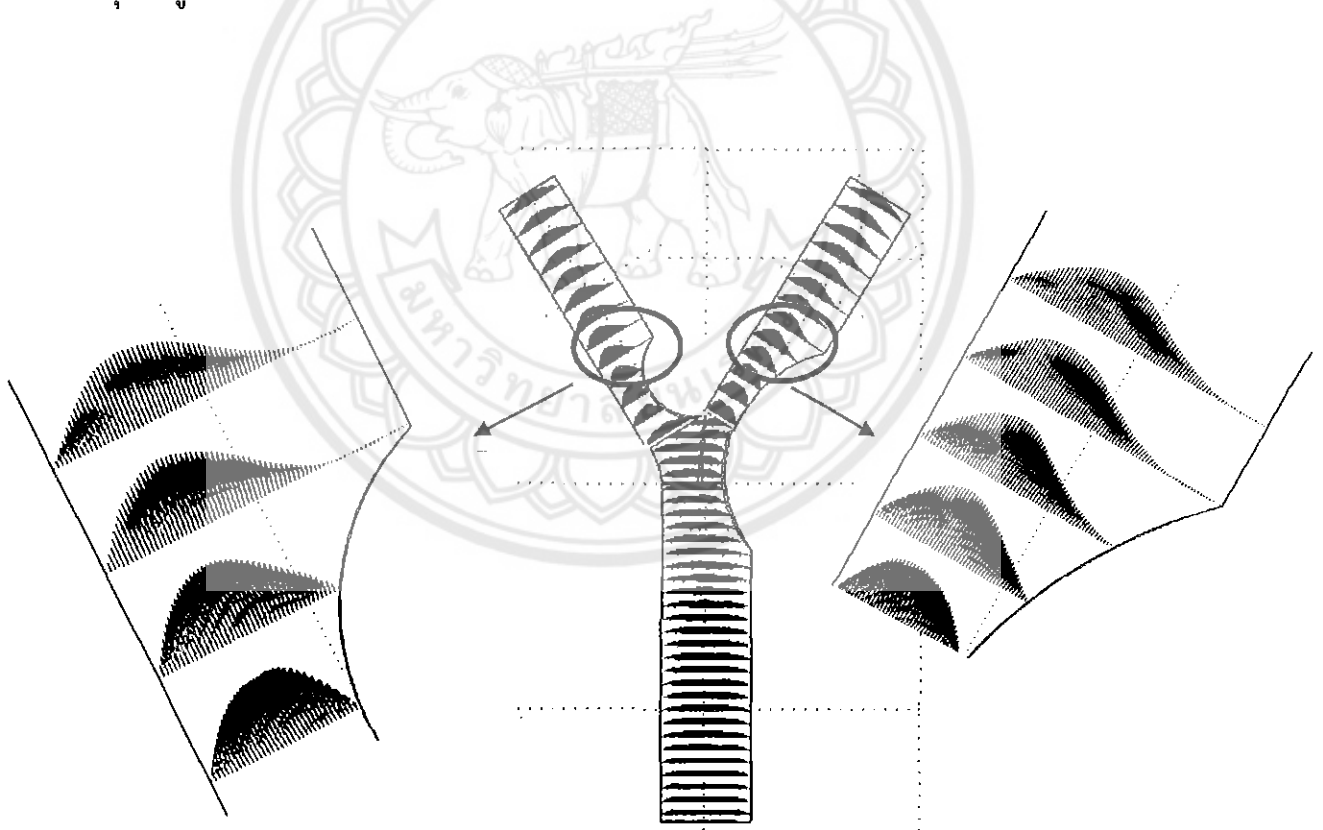


(ข) หน้าตัด B-B'



(ค) หน้าตัด C-C'

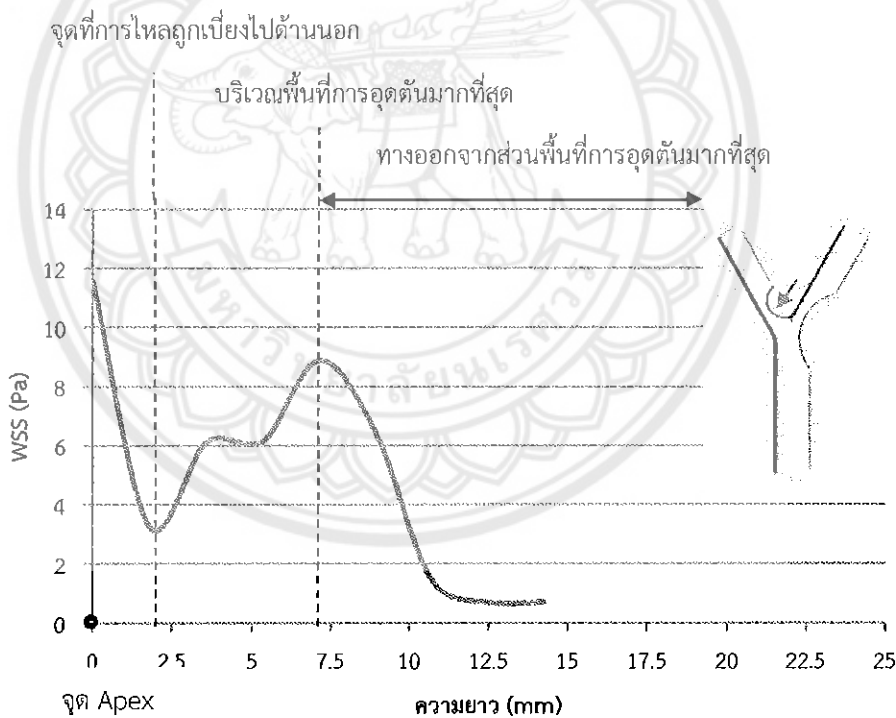
รูปที่ 5.20 สนามความเร็วของไหลอดเลียดแขนงหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ S



รูปที่ 5.21 สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ S

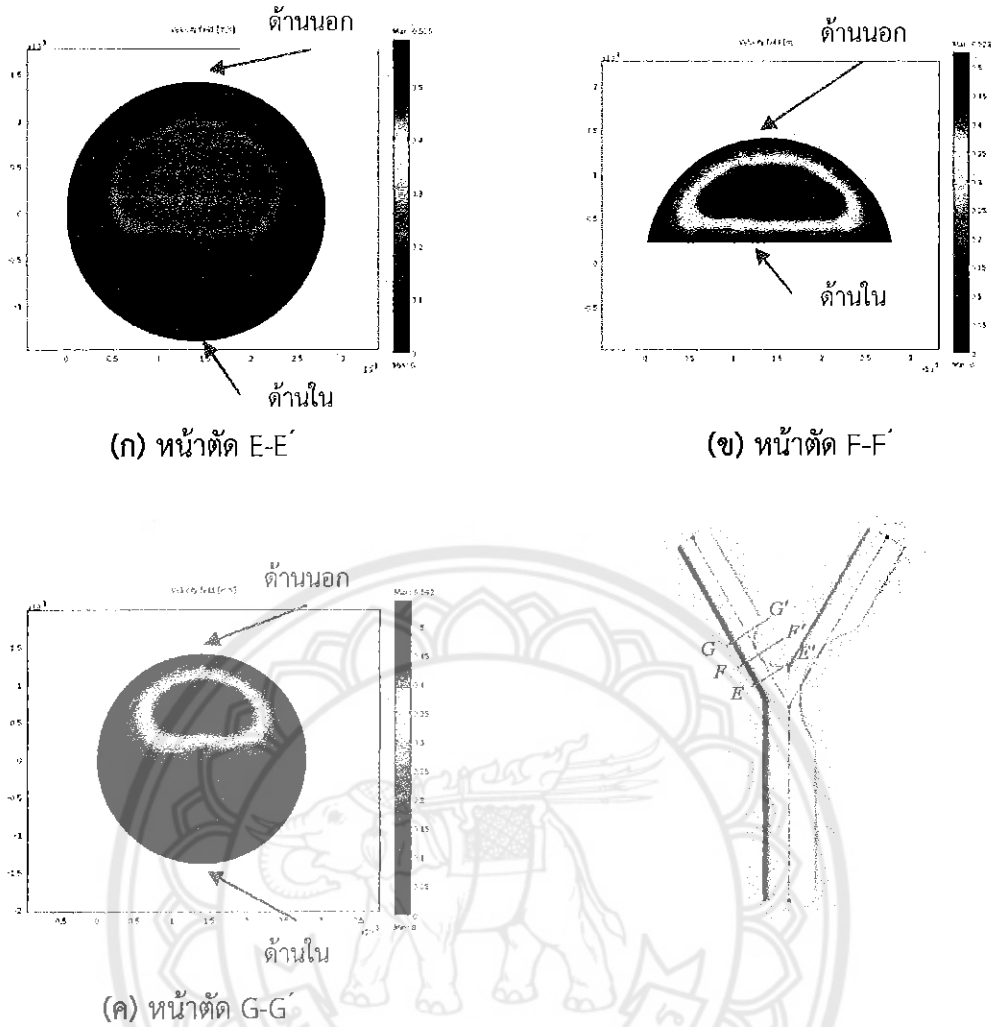
5.2.3.2 หลอดเลือดแขนงรอง

เมื่อพิจารณา WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง พบว่าบริเวณผนังที่อุดตันด้านใน รูปที่ 5.21 มีค่า WSS ที่จุด Apex สูงถึง 11.549 Pa อาจเป็นผลมาจากจุด Apex จะเป็นจุดที่การไหลจากหลอดเลือดหลักพุ่งเข้าชน และการเบี่ยงตัวของการไหลเข้าสู่หลอดเลือดหลัก ดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.15 จากนั้นค่า WSS จะลดลงอย่างรวดเร็วมาที่ 3.28 Pa จากนั้นจะสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุดซึ่งทำให้พื้นที่การไหลมีค่าต่ำที่สุดและให้ค่า WSS ที่ 8.89 Pa จากนั้นจึงลดลงมาที่ 0.7 Pa อาจเป็นผลมาจากการไหลมีการ Skew ไปทางด้านนอกของหลอดเลือด ดังแสดงในสนามความเร็วในรูปที่ 5.23 (ค) นอกจากนี้ที่ตำแหน่งสิ้นสุดการอุดตัน เราพบการแยกการไหลหรือการไหลย้อนกลับเกิดขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.22 WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง (ด้านใน) กรณีการอุดตัน

รูปแบบ S

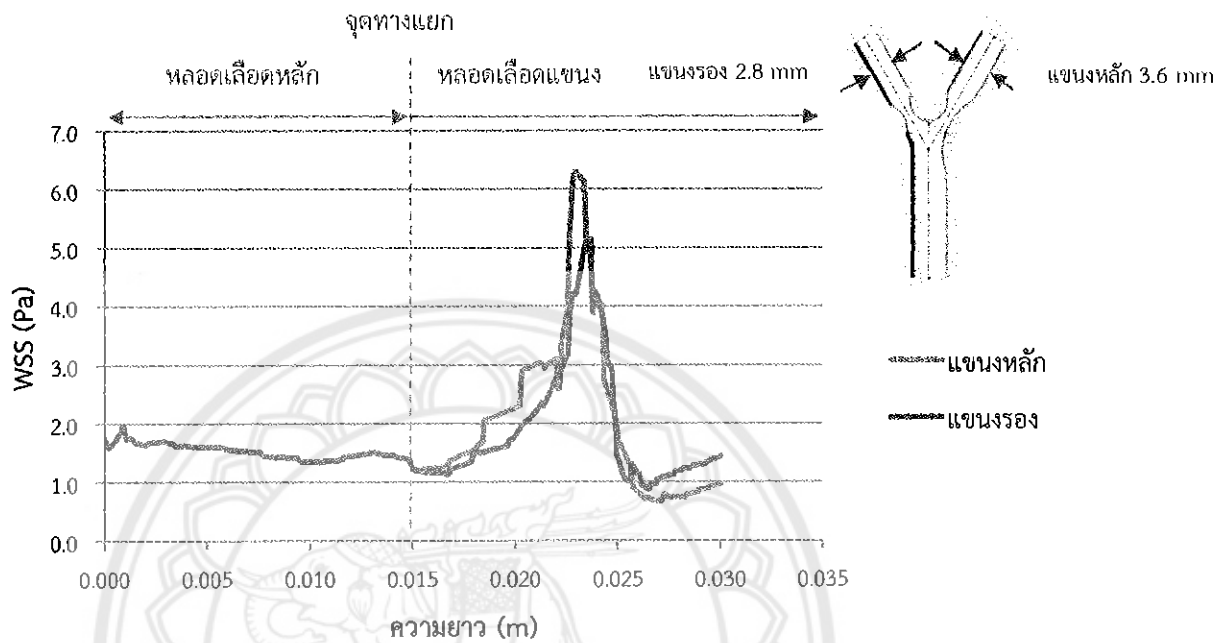


รูปที่ 5.23 สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรอง ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ S

### 5.2.4 กรณีการอุดตัน L-2-V

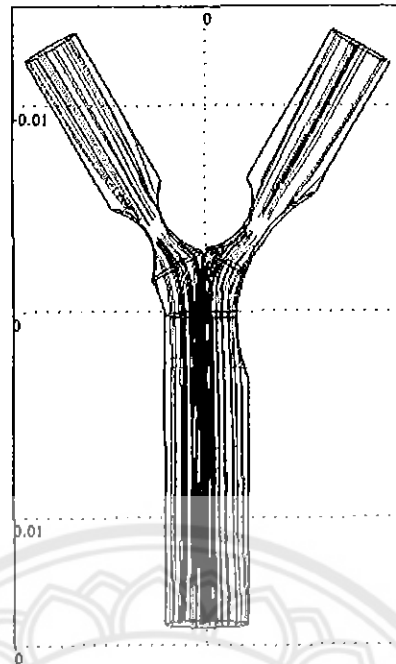
การอุดตันแบบ L-2-V จะมีความซับซ้อนมากที่สุดเนื่องจากเกิดการอุดตันทั้งหลอดเลือดแขนงหลักและรอง และทั้งด้านในและด้านนอก รูปที่ 5.24 แสดงค่า WSS ของการอุดตันกรณีการอุดตันแบบ L-2-V พบว่าการอุดตันของหลอดเลือดหลักด้านนอกไม่ส่งผลต่อการไหลในหลอดเลือดหลักมากนัก อาจเป็นเพราะวาร์คมีค่าความโค้งของบริเวณที่อุดตันด้านนอกสูง โดยมีค่า WSS อยู่ระหว่าง 1-1.5 Pa ซึ่งยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกับหลอดเลือดปกติ แต่เมื่อเข้าสู่บริเวณ Bifurcation ค่า WSS จะเริ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยหลอดเลือดแขนงหลักจะให้ค่า WSS สูงกว่าหลอดเลือดแขนงรอง อาจเป็นเพราะการไหลมีการ Skew มาทางด้านหลอดเลือดแขนงหลักเล็กน้อย ดังแสดงใน Stream line ในรูปที่ 5.25 จนถึงบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุด โดยหลอดเลือดแขนงหลักมีค่า WSS สูงสุดที่ 6.297 Pa

และหลอดเลือดแขนงรองมีค่า WSS สูงสุดที่ 5.14 Pa ซึ่งมีค่าต่างกันประมาณ 18.33% ต่อมาเมื่อการไหลผ่านส่วนที่อุดตันมากที่สุดพบว่าค่า WSS จะลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเป็นผลมาจากพื้นที่การไหลมีการขยายขึ้น แต่เมื่อเข้าสู่หลอดเลือดปกติค่า WSS ก็จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเข้าสู่ค่าปกติที่ 1-1.5 Pa



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนง (พื้นที่อุดตัน 60%)





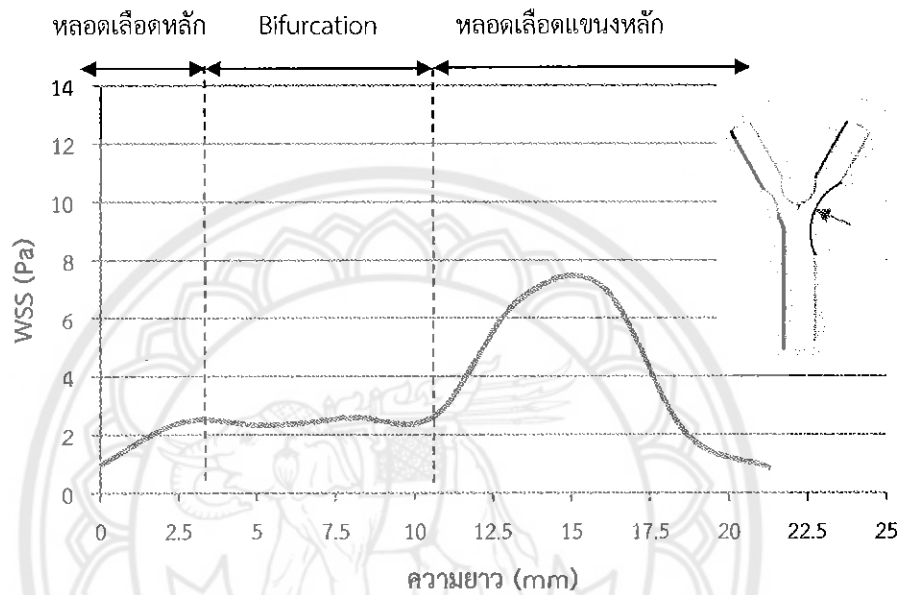
รูปที่ 5.25 Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ L-2-V

#### 5.2.4.1 หลอดเลือดแขนงหลัก

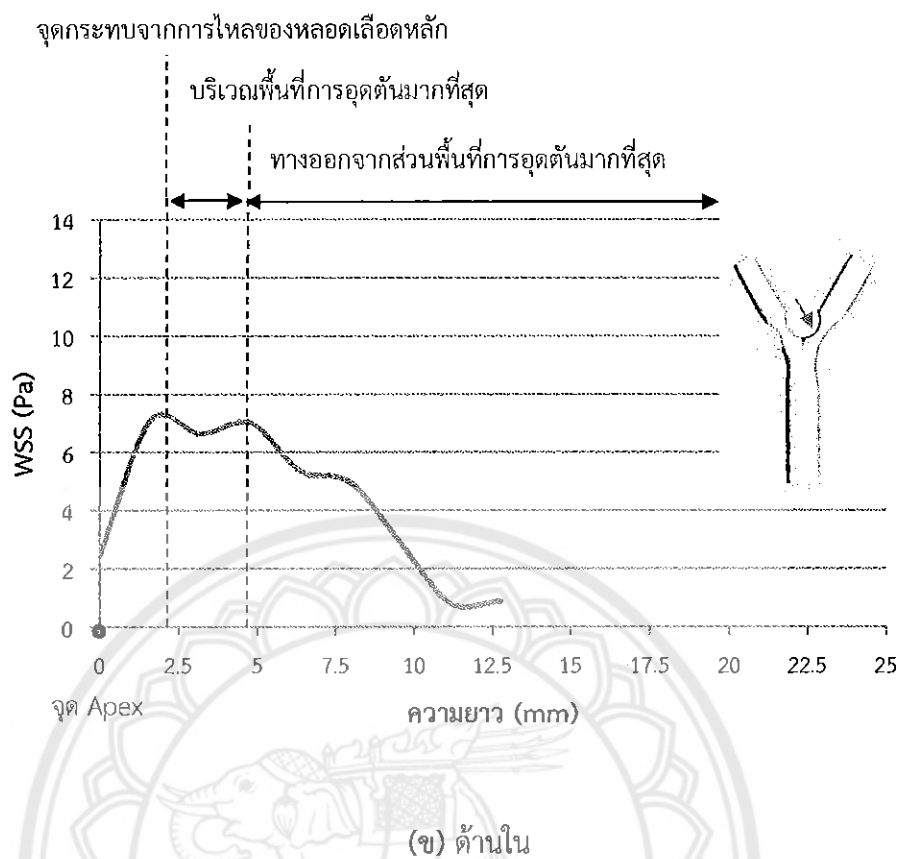
เมื่อพิจารณา WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก พบว่าบริเวณผนังการอุดตันด้านนอกรูปที่ 5.26 (ก) ที่บริเวณหลอดเลือดหลักค่า WSS สูงขึ้นจาก 1 Pa ไปที่ 2.4 Pa จากนั้นเมื่อเข้าสู่บริเวณ Bifurcation ค่า WSS จะค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 2.51 Pa และเมื่อถึงบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุดทำให้มีค่า WSS สูงสุดที่ 7.09 Pa เนื่องจากมีพื้นที่การไหลน้อยทำให้ค่า WSS มีค่าสูง ดังแสดงในสนามความเร็วในรูปที่ 5.28 (ข) เมื่อออกจากบริเวณที่เกิดการอุดตันสูงสุดค่า WSS จึงลดลงมาเป็นประมาณ 1 Pa สังเกตได้ว่า WSS ไม่ตกลงไปสู่ 0 เหมือนกรณีอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้ว อาจเป็นเพราะส่วนโค้งบริเวณนั้นมีรัศมีมาก ทำให้การไหลค่อยๆ ปรับตัวตามส่วนโค้ง อย่างไรก็ตาม เราพบว่ามีกรณีเริ่มเกิด Flow Separation ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.29

เมื่อพิจารณาบริเวณผนังการอุดตันด้านใน รูปที่ 5.26 (ข) ที่จุดเริ่มต้น (จุด Apex) จะมีค่า WSS สูงกว่าระดับปกติที่ 2.4 Pa จากนั้นค่า WSS สูงขึ้นอย่างรวดเร็วไปที่ 7.8 Pa ซึ่งอาจเป็นเพราะที่เลยจุด Apex ไปเล็กน้อยจะเป็นจุดที่การไหลจากหลอดเลือดหลักพุ่งเข้าชนพอดี ดังแสดงใน

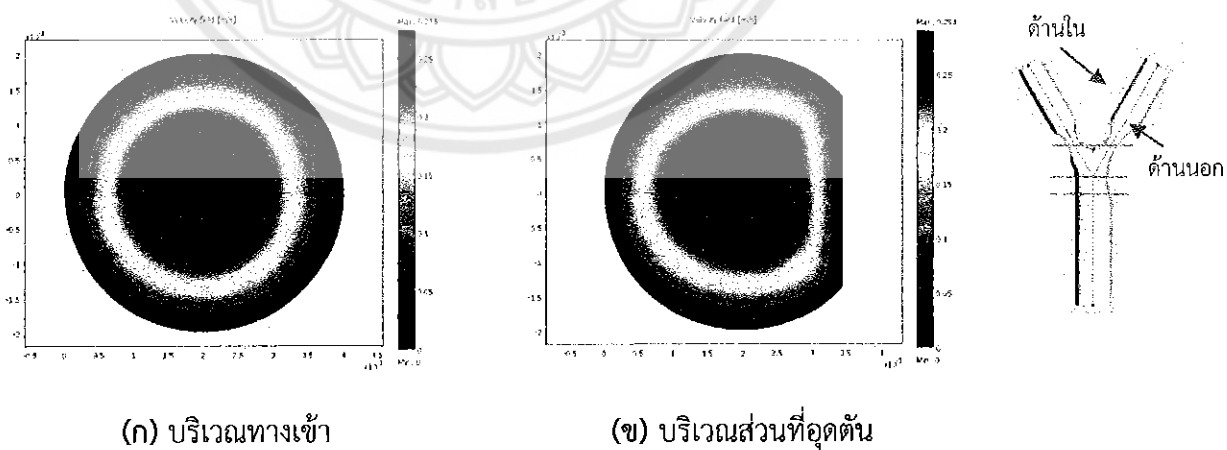
Streamline ในรูปที่ 5.25 และมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่การอุดตันมากที่สุดซึ่งทำให้ค่า WSS เป็น 6.91 Pa ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพื้นที่การไหลของเลือดน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5.26 (ข) แล้วจึงมีค่าต่ำลงเมื่อออกจากบริเวณที่อุดตันมากที่สุดโดยมีค่า WSS ที่ประมาณ 1 Pa อย่างไรก็ตาม เราพบการแยกการไหลหรือการไหลย้อนกลับบริเวณจุดสิ้นสุดของส่วนโค้งนี้ด้วยในรูปที่ 5.29

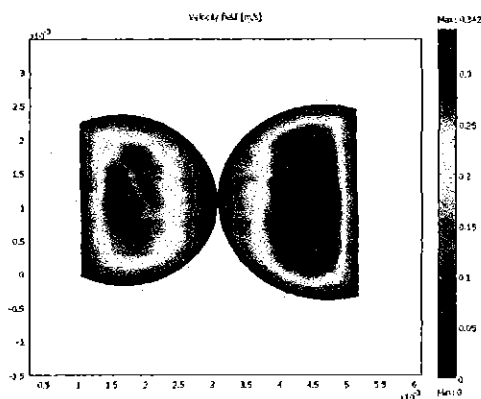


(ก) ด้านนอก



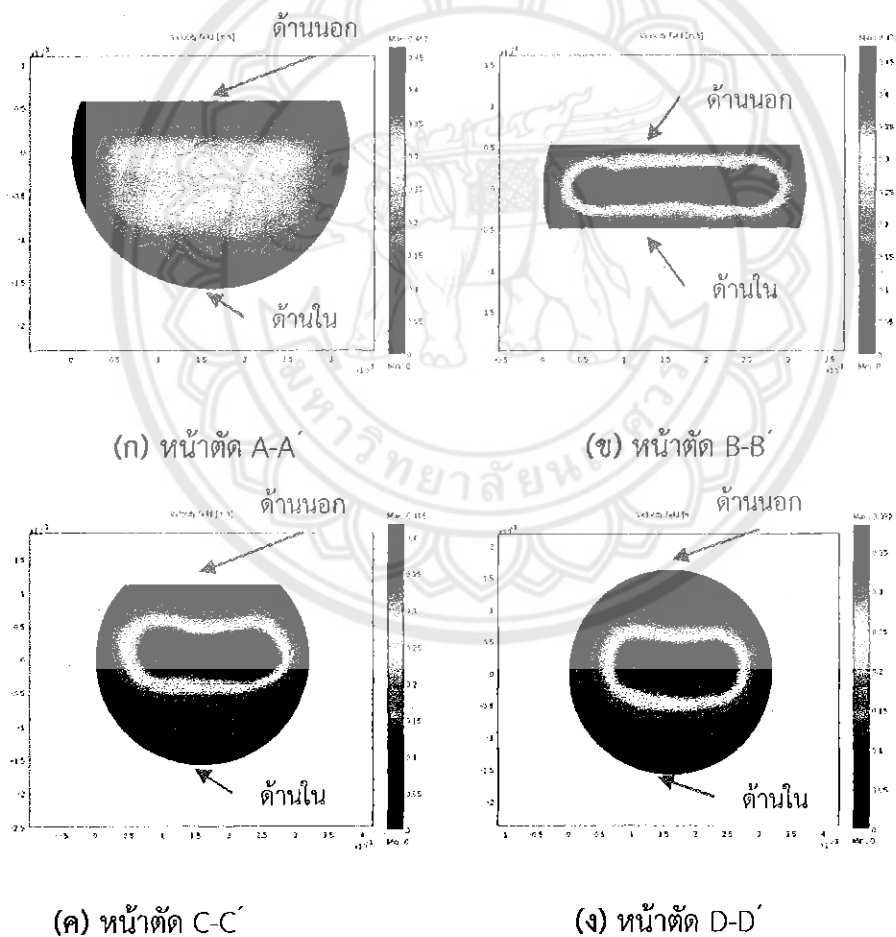
รูปที่ 5.26 WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V



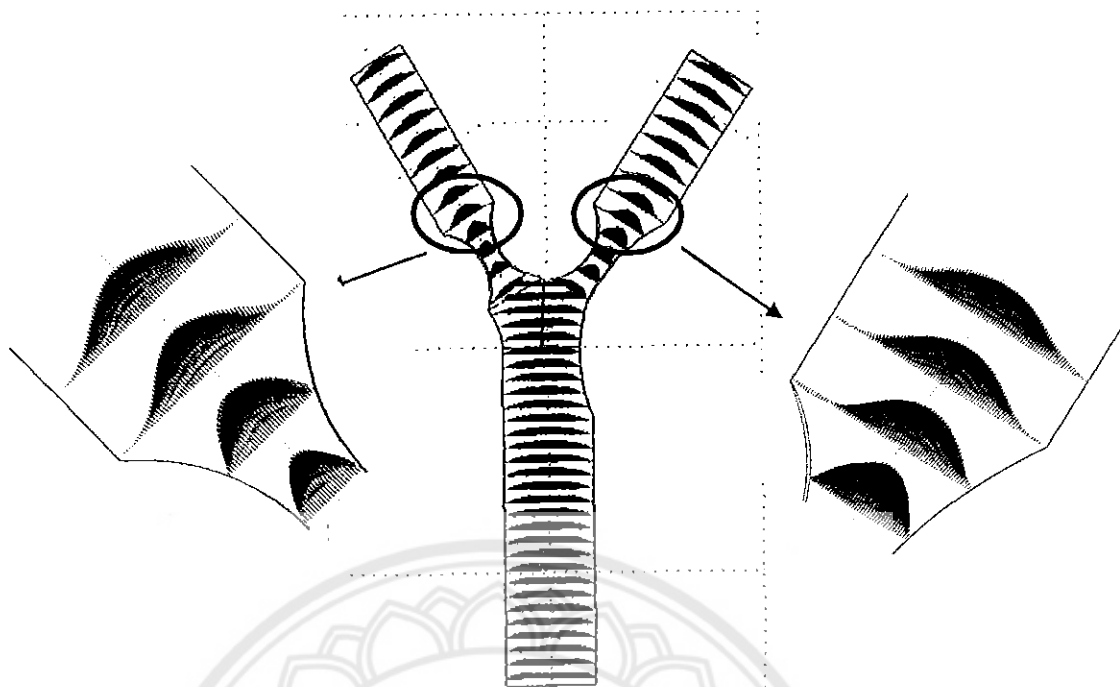


(ค) บริเวณ Bifurcation

รูปที่ 5.27 สนามความเร็วของหลอดเลือดหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V



รูปที่ 5.28 สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V



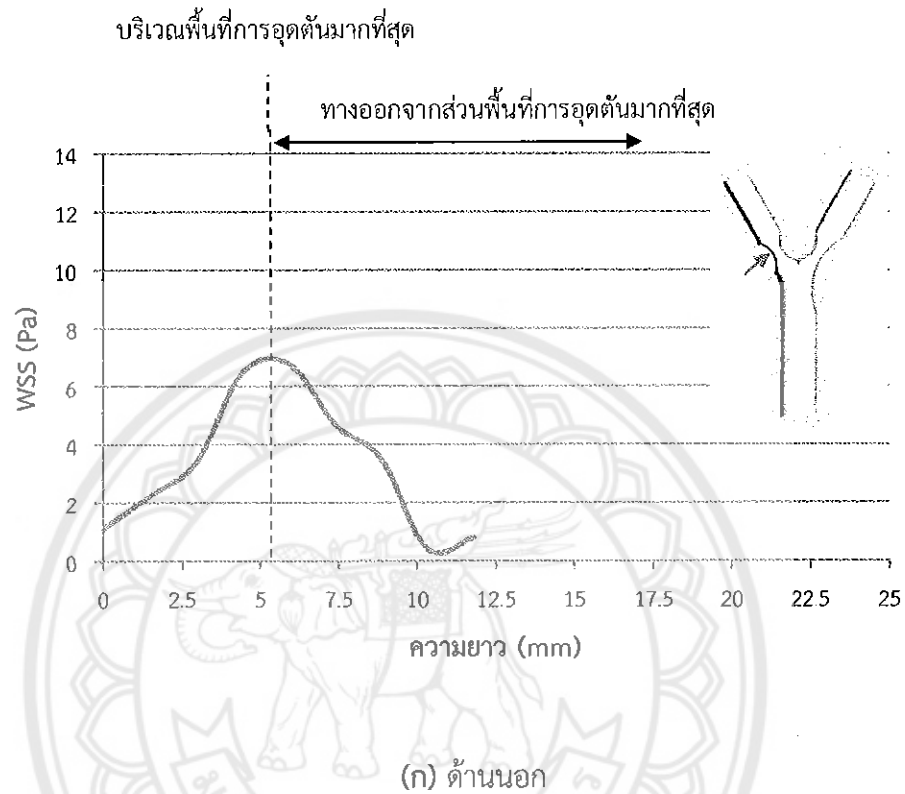
รูปที่ 5.29 สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ L-2-V

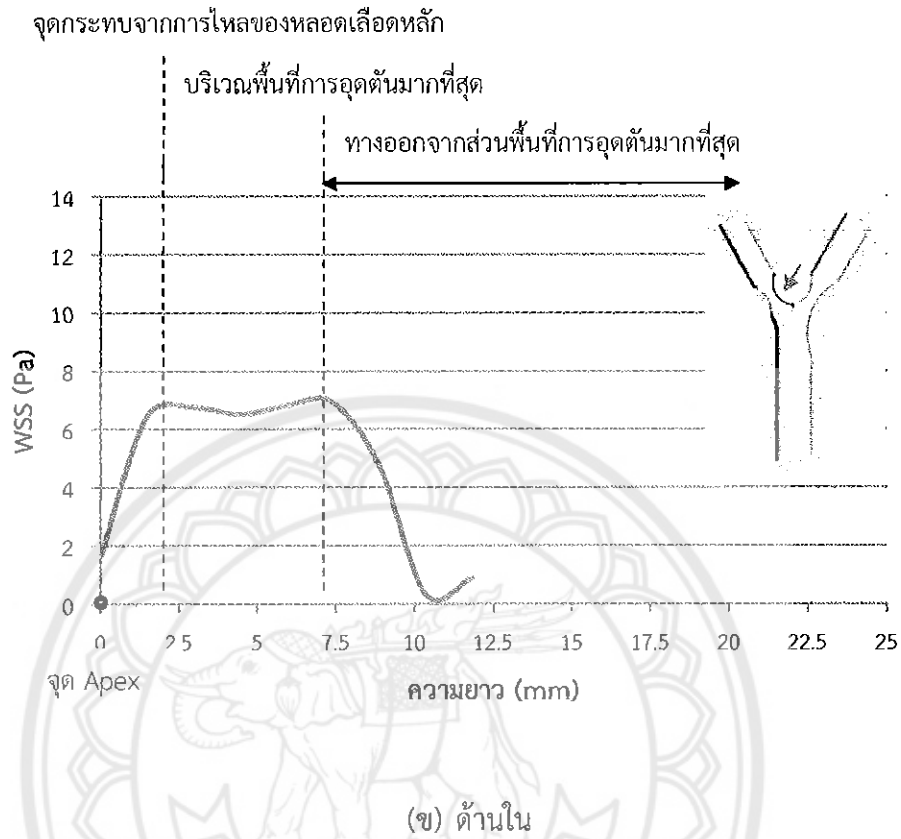
#### 5.2.4.2 หลอดเลือดแขนงรอง

เมื่อพิจารณา WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง พบว่าบริเวณผนังการอุดตันด้านนอก ในรูปที่ 5.30 (ก) ค่า WSS มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามพื้นที่ของการอุดตันของหลอดเลือดตามส่วนโค้งโดยที่ค่า WSS มีค่าจาก 1.13 Pa แล้วสูงขึ้นถึง 6.8 Pa ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณที่มีพื้นที่การไหลน้อยที่สุด ดังแสดงในสนามความเร็วในรูปที่ 5.31 (ข) จากนั้นก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่า 0.42 Pa ซึ่งอาจเป็นผลมาจากรัศมีความโค้งของการอุดตันทำให้เริ่มเกิด Flow Separation ส่งผลให้ WSS มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.29

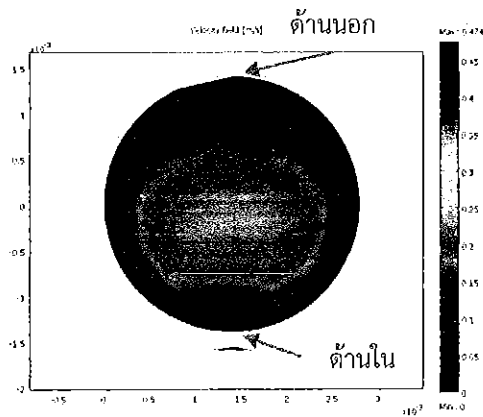
เมื่อพิจารณาบริเวณผนังการอุดตันด้านใน รูปที่ 5.30 (ข) ที่บริเวณจุด Apex จะมีค่า WSS เพิ่มขึ้นจาก 1.66 Pa ไปเป็น 6.76 Pa ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 5.26 (ข) ซึ่งเป็นผลมาจากการเบี่ยงการไหลเข้าสู่หลอดเลือดแขนงทั้งสอง ดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.22 จากนั้นค่า WSS มีค่าค่อนข้างคงที่บริเวณที่เกิดการอุดตันสูงสุด โดยมีค่า WSS เฉลี่ย 6.71 Pa เมื่อออกจากบริเวณที่อุดตัน

ต้นมากที่สุดค่า WSS จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าประมาณ 0.33 Pa อาจเป็นผลมาจากผลของรัศมี ความโค้งของการอุดตันส่งผลให้บริเวณส่วนท้ายของการอุดตันเกิด Flow Separation และการไหลย้อนกลับ ทำให้ WSS ที่บริเวณดังกล่าวมีค่าใกล้ 0 ดังแสดงในรูปที่ 5.29

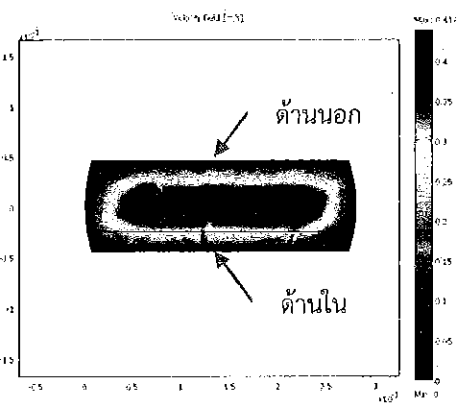




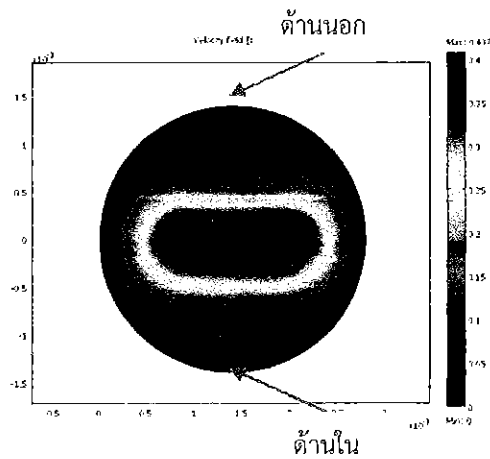
รูปที่ 5.30 WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V



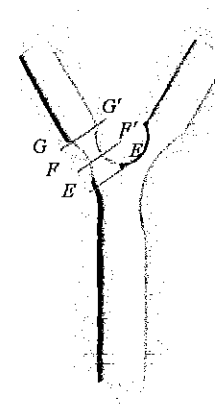
(ก) หน้าตัด E-E



(ข) หน้าตัด F-F'



(ค) หน้าตัด G-G'

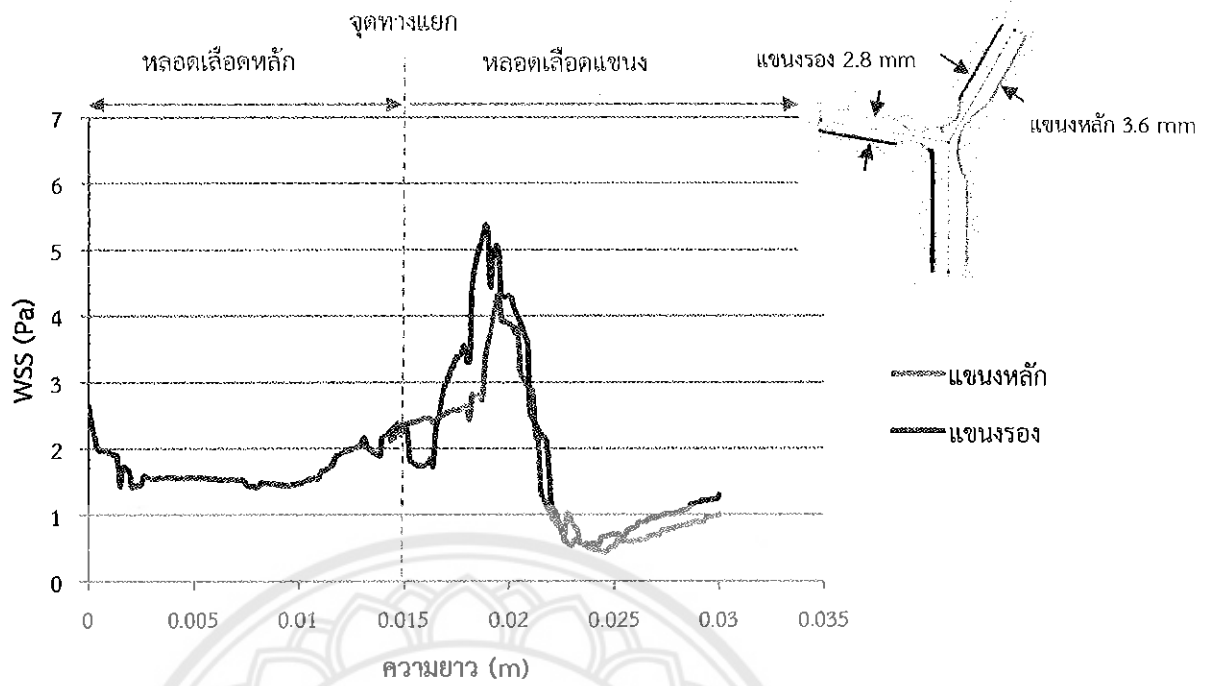


รูปที่ 5.31 สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรอง ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ L-2-V

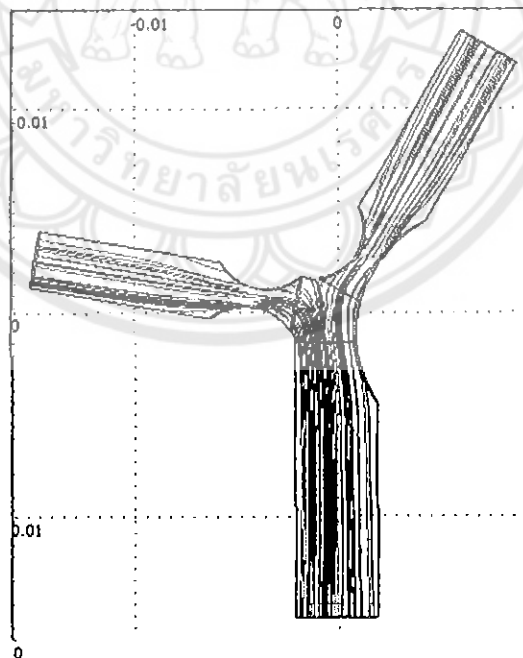
### 5.2.5 กรณีการอุดตัน T

รูปที่ 5.22 แสดงค่า WSS กรณีการอุดตัน T พบว่าที่ทางเข้าหลอดเลือดหลักจะมีค่า WSS สูงกว่าระดับปกติ โดยมีค่า WSS อยู่ที่ 2.5 Pa จากนั้นจึงลดลงเข้าสู่ระดับปกติที่ประมาณ 1.5 Pa และตั้งแต่บริเวณที่มีการอุดตันที่หลอดเลือดหลักค่า WSS มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่มีการอุดตันสูงสุดโดยหลอดเลือดแขนงรองมีค่า WSS สูงสุดที่ 5.377 Pa ส่วนหลอดเลือดแขนงหลักมีค่า WSS สูงสุดที่ 4.316 Pa ซึ่งมีค่าต่างกัน 19.74% ซึ่งจะเห็นว่าหลอดเลือดแขนงรองมีค่า WSS สูงกว่าหลอดเลือดแขนงหลัก อาจเป็นผลมาจากการหักมุมของหลอดเลือดแขนงรองทำมุม 100 องศาับหลอดเลือดหลัก ส่งผลให้การไหลมีการ Skew มาทางด้านแขนงรองดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.33 จากนั้นเมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันสูงสุดค่า WSS จะลดลงและค่อยๆสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่หลอดเลือดปกติ





รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS จากผนังหลอดเลือดหลักไปยังผนังหลอดเลือดแขนงหลัก (พื้นที่อุดตัน 60%)

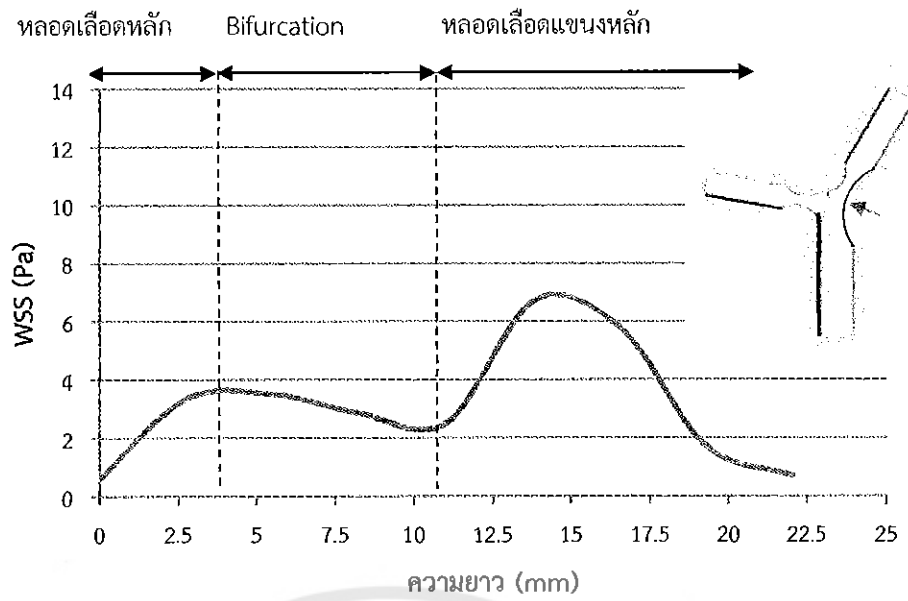


รูปที่ 5.33 Streamline ของกรณีการอุดตันแบบ T

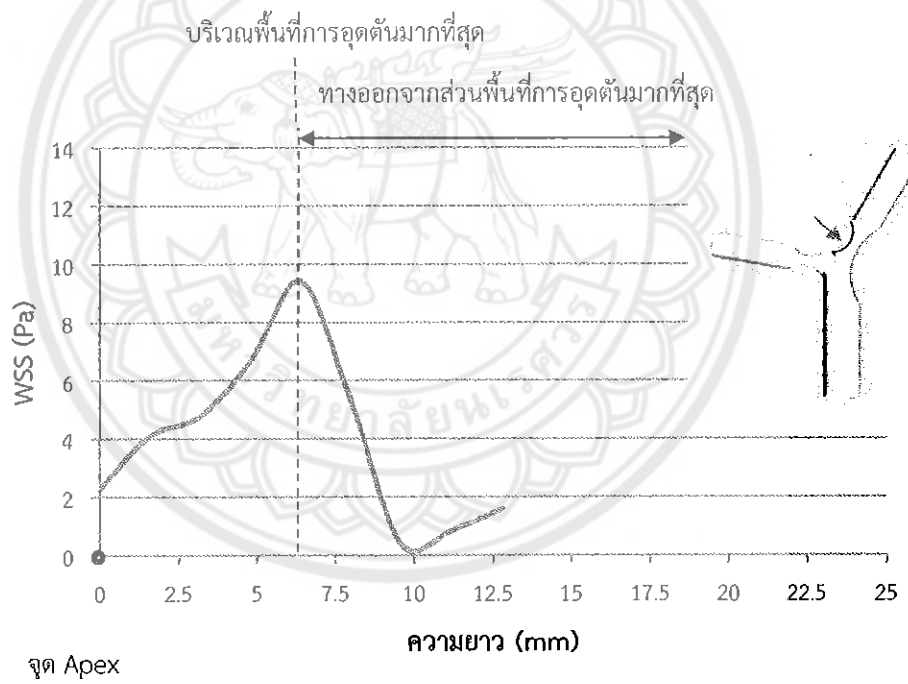
### 5.2.5.1 หลอดเลือดแขนงหลัก

เมื่อพิจารณา WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก พบว่าบริเวณผนังการอุดตันด้านนอก ในรูปที่ 5.34 (ก) ที่บริเวณหลอดเลือดหลักค่า WSS จะมีค่าจาก 0.7 Pa ไปเป็น 3.8 Pa จากนั้นเมื่อเข้าสู่บริเวณ Bifurcation ค่า WSS จะค่อยๆลดลงมาที่ 2.2 Pa อาจเป็นผลมาจากการไหลแยกออกเป็น 2 ทางเข้าสู่หลอดเลือดแขนงทั้งสอง ดังแสดงใน Streamline ในรูปที่ 5.33 และสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุดมีค่า WSS สูงสุดที่ 6.717 Pa ซึ่งเป็นผลมาจากมีพื้นที่การไหลน้อย ดังแสดงในสนามความเร็วในรูปที่ 5.36 (ข) เมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันสูงสุดค่าก็จะลดลงเรื่อยๆ โดยมีค่าต่ำสุดที่บริเวณสิ้นสุดการอุดตัน โดยมีค่าที่ 0.69 Pa เนื่องจากบริเวณหลังส่วนโค้งของการอุดตันเกิด Flow Separation และการไหลย้อนกลับ ส่งผลให้ค่า WSS มีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.37

ส่วนบริเวณผนังการอุดตันด้านใน รูปที่ 5.34 (ข) ค่า WSS ที่จุด Apex มีค่า 2.5 Pa จากนั้นค่า WSS จะค่อยๆสูงขึ้นตามพื้นที่การอุดตันของหลอดเลือดตามส่วนโค้งมีค่าสูงสุด 9.424 Pa จากนั้นก็ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อออกจากบริเวณที่มีการไหลน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าต่ำสุดที่ 0.2 Pa อาจเป็นผลมาจากบริเวณหลังส่วนโค้งของการอุดตันเกิด Flow Separation อย่างชัดเจน และมีลักษณะการไหลย้อนกลับอย่างชัดเจน ทำให้ค่า WSS มีค่าเข้าใกล้ 0 มาก ดังแสดงในรูปที่ 5.37

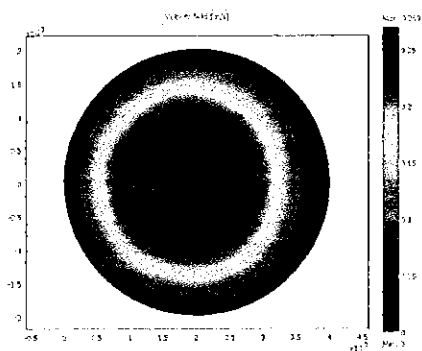


(ก) ด้านนอก

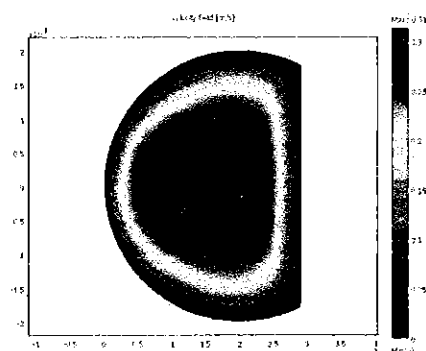


(ข) ด้านใน

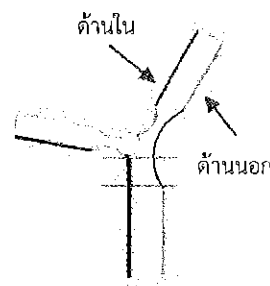
รูปที่ 5.34 WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงหลัก กรณีการอุดตันรูปแบบ T



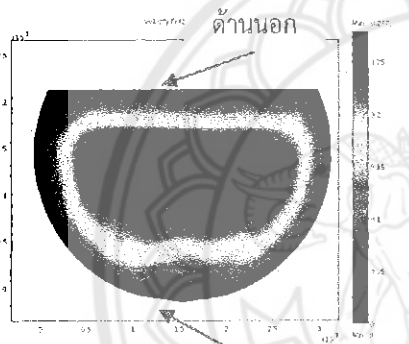
(ก) บริเวณทางเข้า



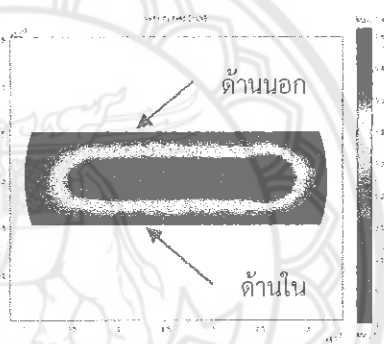
(ข) บริเวณส่วนที่อุดตัน



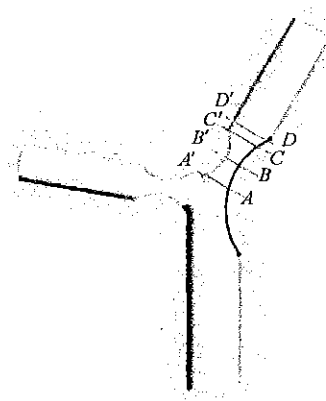
รูปที่ 5.35 สนามความเร็วของไหลอดหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ



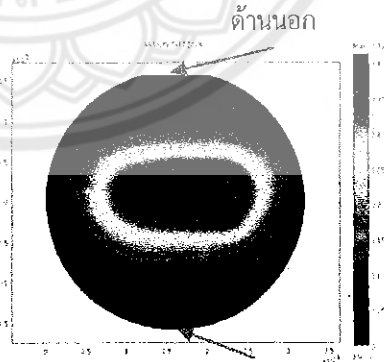
(ก) หน้าตัด A-A'



(ข) หน้าตัด B-B'

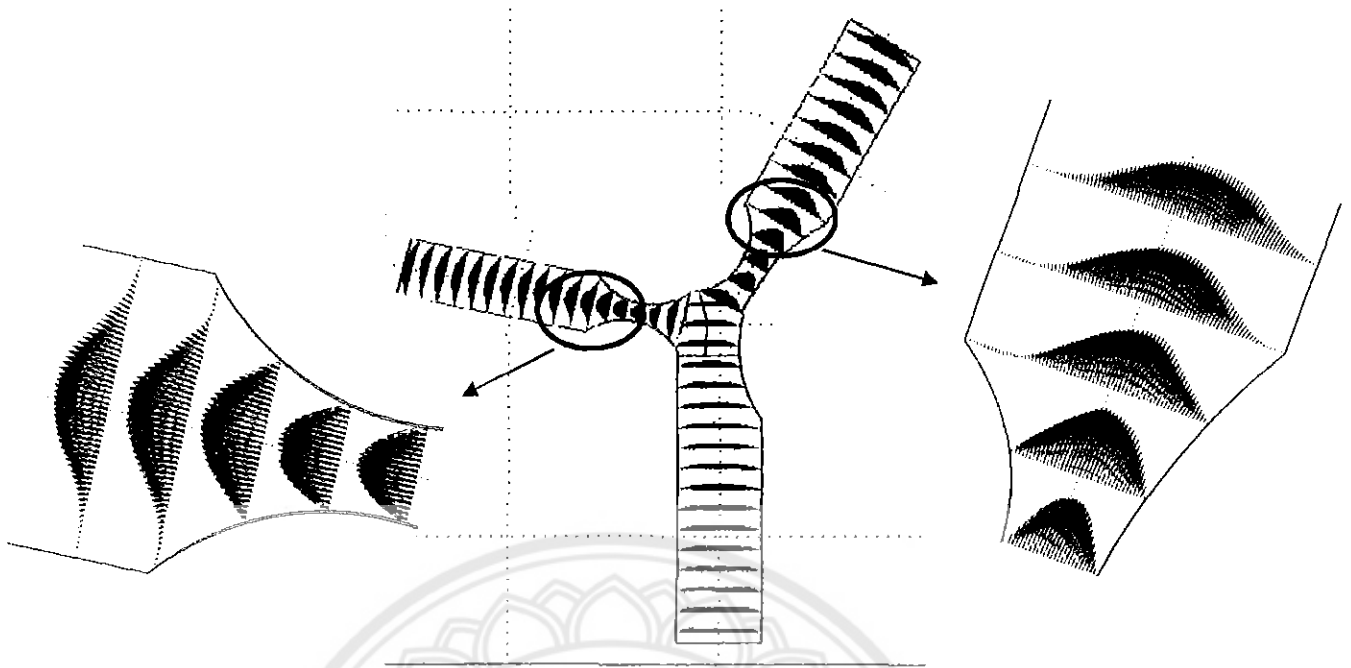


(ค) หน้าตัด C-C'



(ง) หน้าตัด D-D'

รูปที่ 5.36 สนามความเร็วของไหลอดแขนงหลัก ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ T



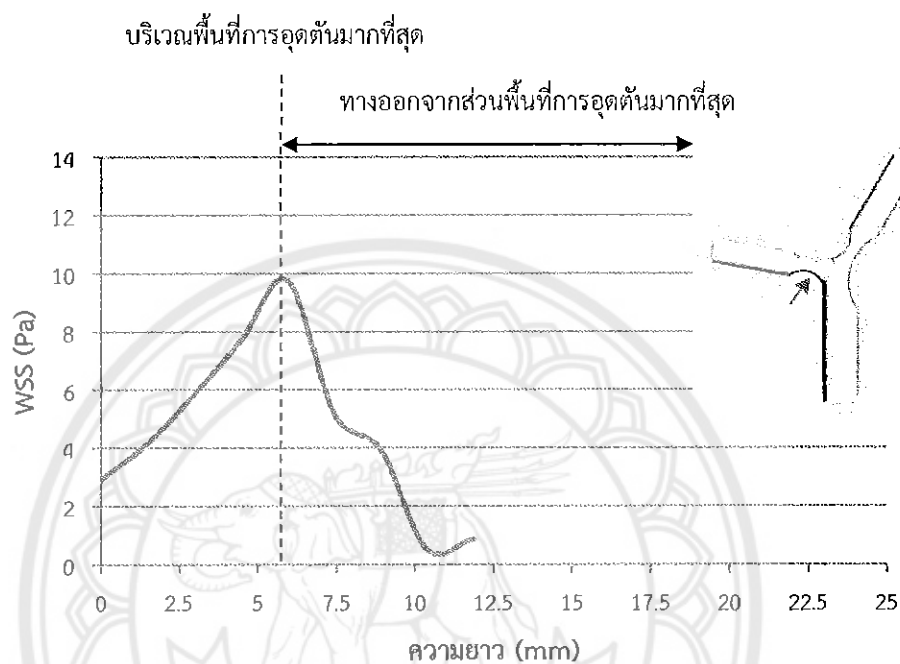
รูปที่ 5.37 สนามความเร็วในรูปเวกเตอร์ความเร็วของกรณีการอุดตันแบบ T

#### 5.2.5.2 หลอดเลือดแขนงรอง

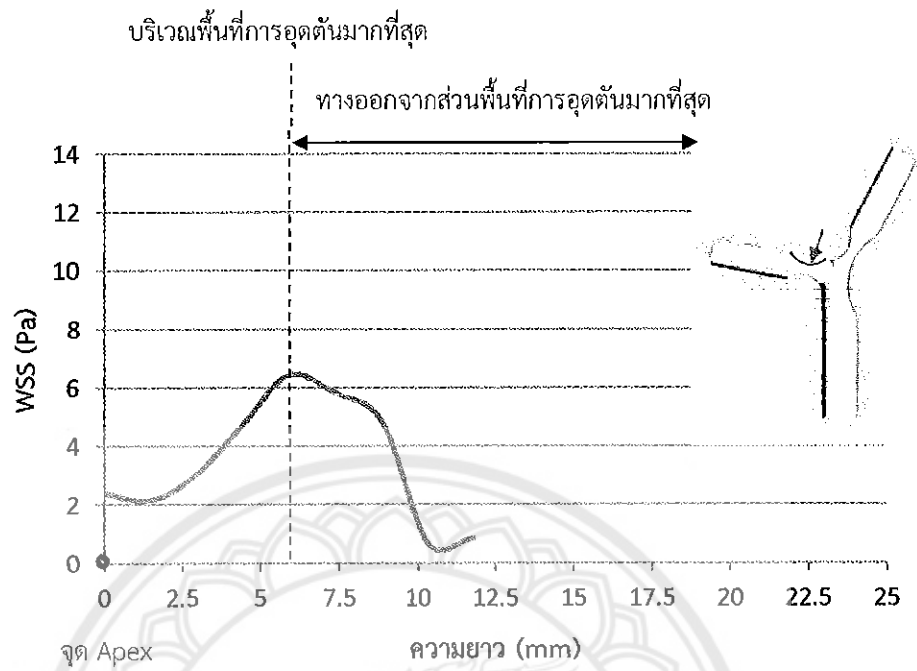
เมื่อพิจารณา WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง พบว่าบริเวณผนังการอุดตันด้านนอก รูปที่ 5.38 (ก) ค่า WSS ที่จุดเริ่มต้นมีค่า 3 Pa จากนั้นจึงค่อยๆสูงขึ้นตามพื้นที่อุดตันของหลอดเลือดตามส่วนโค้งโดยมีค่า WSS สูงสุดที่ 9.77 Pa โดยจะเห็นว่า WSS ที่ผนังด้านนอกมีค่าสูงกว่าที่ผนังด้านในมาก อาจเป็นผลมาจากการไหลเข้าสู่หลอดเลือดแขนงรองหักมุมที่ 100 องศากับการไหลของหลอดเลือดแขนงหลัก ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงสู่ศูนย์กลางไปทางผนังด้านนอกของหลอดเลือด ดังแสดงใน Stream line ในรูปที่ 5.33 แล้วลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อออกจากบริเวณที่มีพื้นที่การไหลน้อย โดยมีค่าต่ำสุดที่ 0.52 Pa ซึ่งเป็นผลมาจากบริเวณหลังส่วนโค้งของการอุดตัน เกิด Flow Separation และการไหลย้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 5.37

เมื่อพิจารณาบริเวณผนังการอุดตันด้านใน รูปที่ 5.38 (ข) ค่า WSS ที่จุด Apex มีค่าที่ 2.2 Pa จากนั้นค่า WSS ลดลงมาเล็กน้อยที่ 2.0 Pa แล้วจึงค่อยๆสูงขึ้นโดยมีค่า WSS สูงสุดที่ 6.442 Pa

ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุด ทำให้มีพื้นที่การไหลน้อย ดังแสดงในสนามความเร็วในรูปที่ 5.39 (ข) แล้วจึงค่อยๆ ลดลงเมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุด โดยมีค่าต่ำสุดที่ 0.67 Pa อาจเป็นผลมาจากบริเวณหลังส่วนโค้งของการอุดตันเกิด Flow Separation แต่ไม่ชัดเจนมากนัก และเกิดการไหลย้อนกลับ ค่า WSS จึงมีค่าต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.3

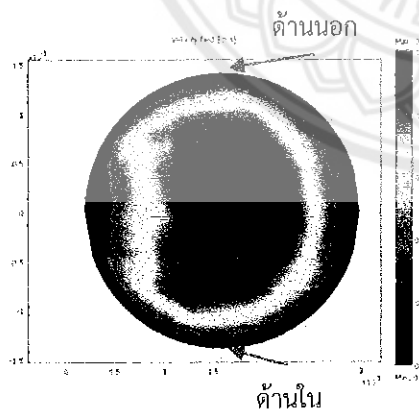


(ก) ด้านนอก

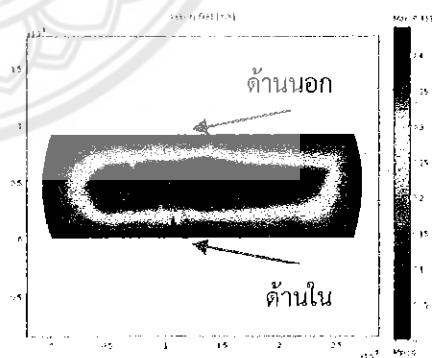


(ข) ด้านใน

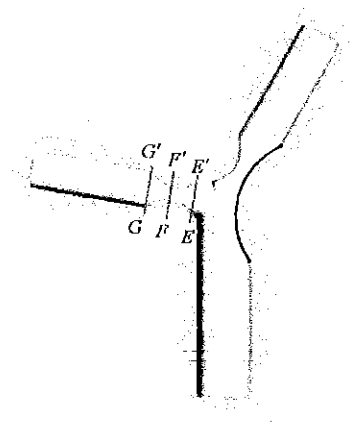
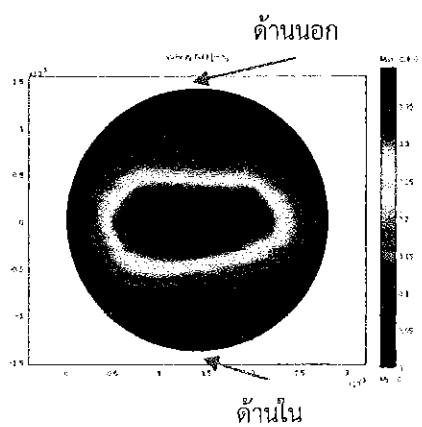
รูปที่ 5.38 WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรอง กรณีการอุดตันรูปแบบ T



(ก) หน้าตัด E-E'



(ข) หน้าตัด F-F'



(ค) หน้าตัด G-G'

รูปที่ 5.39 สนามความเร็วของหลอดเลือดแขนงรอง ที่หน้าตัดต่างๆ บริเวณที่เกิดการอุดตัน กรณีการอุดตันรูปแบบ T

5.2.6 สรุปลักษณะเฉพาะการไหลผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณีต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่า WSS ของทุกกรณีพบว่า บริเวณทางเข้าของหลอดเลือดหลักจะมีค่าใกล้เคียงระดับปกติ โดยมีค่าที่ 1.7-2.2 Pa จากนั้นค่า WSS จะค่อยๆ ลดลงเข้าสู่ระดับปกติที่ 1-1.5 Pa เมื่อเข้าสู่บริเวณ Bifurcation ค่า WSS จะลดต่ำลงกว่าปกติเล็กน้อยลงมาถึง 0.7-1 Pa จากนั้นเมื่อเริ่มเข้าสู่แยกแขนงค่า WSS จะเริ่มสูงขึ้นอีกครั้ง โดยกรณีการอุดตัน 1m มีค่า WSS สูงสุดที่ 4.448 Pa กรณีการอุดตัน 1s มีค่า WSS สูงสุดที่ 2.624 Pa กรณีการอุดตัน S มีค่า WSS สูงสุดที่ 3.797 Pa กรณีการอุดตัน L-2-V มีค่า WSS สูงสุดที่ 6.297 Pa และกรณีการอุดตัน T มีค่า WSS สูงสุดที่ 5.377 Pa โดยจะเห็นว่ากรณีการอุดตัน 1m และ 1s เป็นการอุดตันเพียงแขนงเดียว แต่เป็นการอุดตันทั้งด้านในและด้านนอกของหลอดเลือด จะมีค่า WSS ไม่สูงมากนัก เนื่องจากการไหลจะถูกเบี่ยงให้ไปทางฝั่งที่ไม่มีการอุดตัน

กรณีการอุดตันแบบ S พิจารณาที่การอุดตันที่ 40% เนื่องจากการอุดตันฝั่งเดียวคือด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก และด้านในของหลอดเลือดแขนงรอง พบว่ารัศมีความโค้งของพื้นที่อุดตันสูงทำให้ WSS ทำให้การไหลค่อยๆ ปรับตัวไปตามส่วนโค้งค่า WSS จึงมีค่าไม่สูงนัก

กรณีแบบ L-2-V และแบบ T เป็นการอุดตันที่มีความซับซ้อนที่สุดเนื่องจากการอุดตันทั้งสองด้านในและด้านนอกของหลอดเลือด และอุดตันทั้งแขนงหลักและแขนงรอง ความซับซ้อนนี้จึงส่งผลให้ค่า WSS มีค่าสูงกว่าแบบอื่นๆ



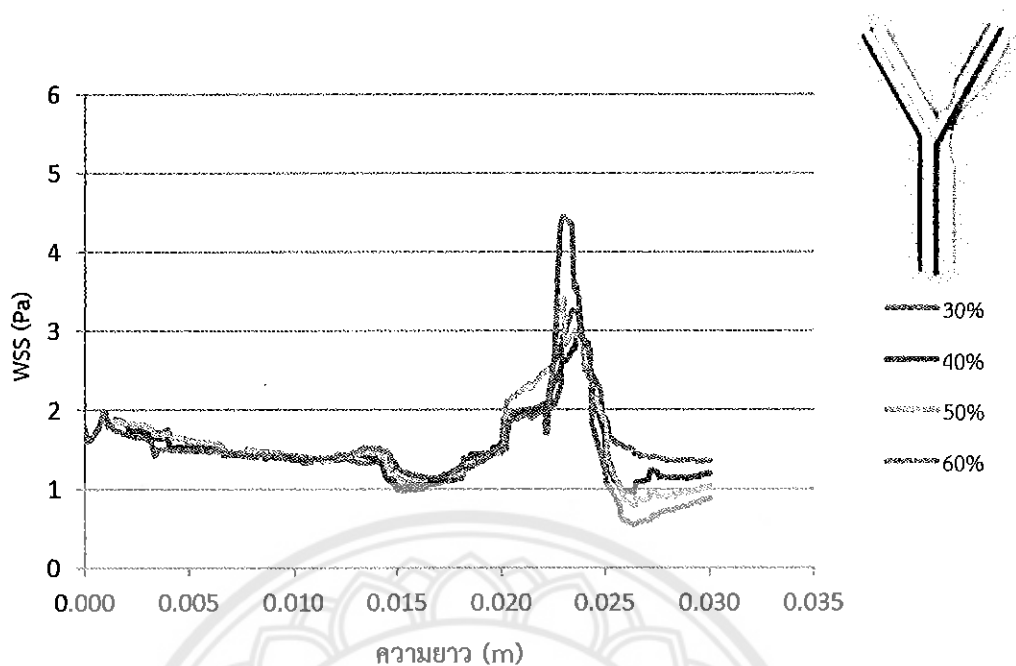
ต่อมาเมื่อการไหลออกจากบริเวณที่มีพื้นที่การไหลน้อยที่สุดค่า WSS จะลดลงอย่างรวดเร็วลงมาถึง 0.5-1 Pa ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ขยายใหญ่และผลของ Flow Separation ที่จุดสิ้นสุดการอุดตัน จากนั้นเมื่อเข้าสู่หลอดเลือดปกติค่า WSS จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่ระดับปกติ ซึ่งจะเห็นว่าการอุดตันในหลอดเลือดแยกสองง่ามนี้อาจเกิดบริเวณ Bifurcation เนื่องจากบริเวณดังกล่าวจะมีความเร็วต่ำ ทำให้มี WSS ต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ขยายใหญ่ขึ้น และการไหลแยกเป็น 2 ทางเข้าสู่หลอดเลือดแขนงทั้งสอง ในทางตรงกันข้ามหากบริเวณใดที่มีความเร็วสูง ก็จะส่งผลให้มี WSS สูง ซึ่งเป็นอันตรายต่อหลอดเลือดเช่นกันเพราะจะทำให้ผนังหลอดเลือดบริเวณดังกล่าวเกิดการฉีกขาดได้ [9]

### 5.3 ผลของระดับการอุดตันที่มีผลต่อค่า WSS

ในการศึกษาผลของระดับการอุดตันที่มีผลต่อค่า WSS ได้ทำการศึกษาในการกรณีการอุดตัน 3 รูปแบบ คือ 1m , 1s และ T เนื่องจากในกรณีอื่นพบปัญหาในการคำนวณในระดับที่ต้องการศึกษา คือการอุดตันที่ 30%, 40%, 50% และ 60% แต่อย่างไรก็ตาม 3 รูปแบบที่ใช้ในการศึกษาสามารถครอบคลุมได้ทุกรูปแบบเนื่องจากกรณีการอุดตันแบบ 1m เป็นการอุดตันหลอดเลือดแขนงหลัก ส่วนกรณีการอุดตันแบบ 1s เป็นการอุดตันหลอดเลือดแขนงรอง และกรณีการอุดตันแบบ T เป็นการอุดตันทั้งหลอดเลือดแขนงหลักและหลอดเลือดแขนงรอง

#### 5.3.1 เปรียบเทียบระดับการอุดตันกรณีการอุดตัน 1m

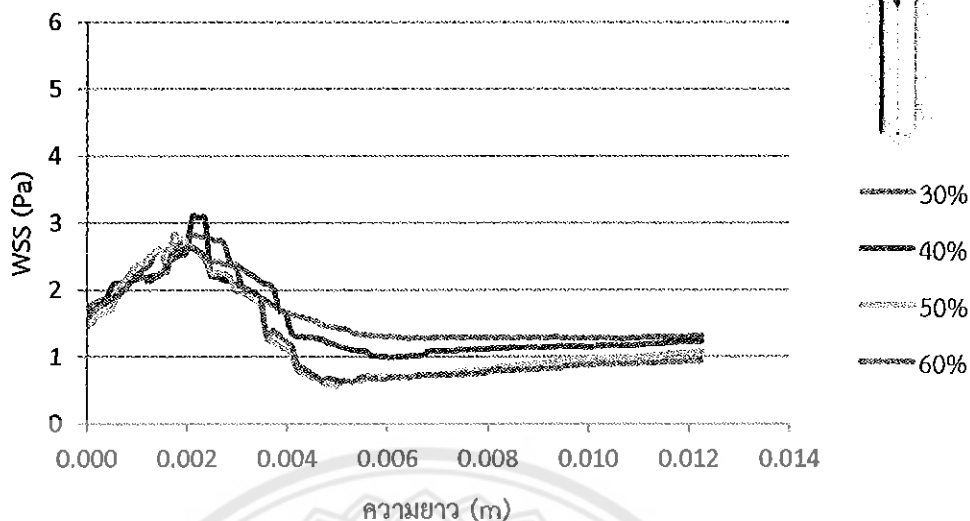
รูปที่ 5.40 แสดงผลของระดับการอุดตันที่มีผลต่อค่า WSS พบว่า ค่า WSS ในระดับการอุดตัน 60% มีค่า WSS สูงสุด มีค่าที่ 4.448 Pa รองลงมาคือที่ระดับการอุดตัน 50% มีค่า WSS ที่ 3.403 Pa ต่อมาคือที่ระดับการอุดตัน 30% มีค่า WSS ที่ 3.26 Pa และสุดท้ายที่ระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS ที่ 2.938 Pa และเมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันสูงที่สุดค่า WSS ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการอุดตันที่ระดับ 60% จะมีการลดลงมากที่สุด โดยมีค่า WSS ลดลงมาถึง 0.538 Pa จากนั้นจึงเป็นที่ระดับการอุดตัน 50% มีค่า WSS ลดลงมาถึง 0.789 Pa ต่อมาคือที่ระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS ลดลงมาถึง 0.955 Pa และที่ระดับการอุดตัน 30% มีค่า WSS ลดลงมาถึง 1.052 Pa



รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS หลอดเลือดแขนงรองที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60% กรณีการอุดตันรูปแบบ 1m

### 5.3.2 เปรียบเทียบระดับการอุดตันกรณีการอุดตัน 1s

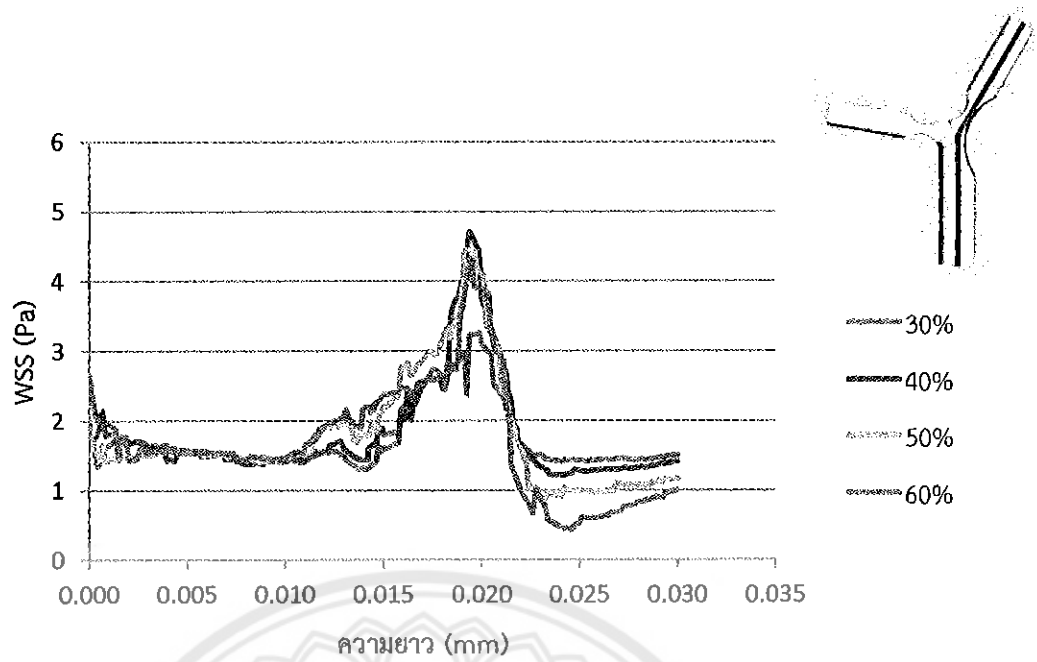
รูปที่ 5.41 แสดงผลของระดับการอุดตันที่มีผลต่อค่า WSS พบว่า ค่า WSS ในระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS สูงสุด มีค่าที่ 3.086 Pa รองลงมาคือที่ระดับการอุดตัน 50% มีค่า WSS ที่ 2.832 Pa ต่อมาคือที่ระดับการอุดตัน 30% มีค่า WSS ที่ 2.830 Pa และสุดท้ายที่ระดับการอุดตัน 60% มีค่า WSS ที่ 2.626 Pa และเมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันสูงที่สุดค่า WSS ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการอุดตันที่ระดับ 50% จะมีการลดลงมากที่สุด โดยมีค่า WSS ลดลงมาที่ 0.552 Pa จากนั้นจึงเป็นที่ระดับการอุดตัน 60% มีค่า WSS ลดลงมาที่ 0.633 Pa ต่อมาคือที่ระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS ลดลงมาที่ 0.996 Pa และที่ระดับการอุดตัน 30% มีค่า WSS ลดลงมาที่ 1.271 Pa



รูปที่ 5.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS หลอดเลือดแขนงรองที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60% กรณีการอุดตันรูปแบบ 1s

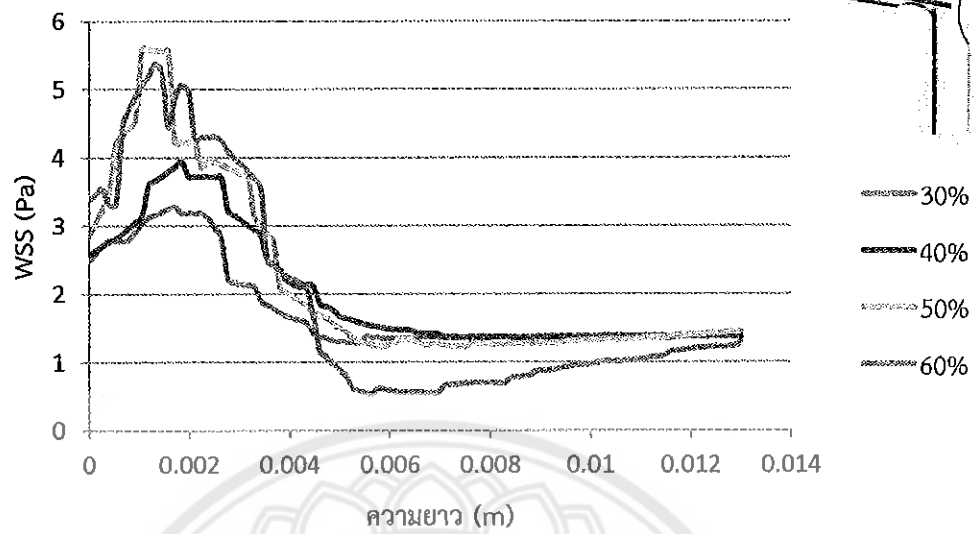
### 5.3.3 เปรียบเทียบระดับการอุดตันกรณีการอุดตัน T

รูปที่ 5.42 แสดงผลของระดับการอุดตันด้านหลอดเลือดแขนงหลักที่มีผลต่อค่า WSS พบว่า ค่า WSS ในระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS สูงสุด มีค่าที่ 4.705 Pa รองลงมาคือที่ระดับการอุดตัน 50% มีค่า WSS ที่ 4.443 Pa ต่อมาคือที่ระดับการอุดตัน 60% มีค่า WSS ที่ 4.316 Pa และสุดท้ายที่ระดับการอุดตัน 30% มีค่า WSS ที่ 3.257 Pa และเมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันสูงที่สุดค่า WSS ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการอุดตันที่ระดับ 60% จะมีการลดลงมากที่สุด โดยมีค่า WSS ลดลงมาถึง 0.437 Pa จากนั้นจึงเป็นที่ระดับการอุดตัน 50% มีค่า WSS ลดลงมาถึง 0.884 Pa ต่อมาคือที่ระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS ลดลงมาถึง 1.217 Pa และที่ระดับการอุดตัน 30% มีค่า WSS ลดลงมาถึง 1.306 Pa



รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS หลอดเลือดแขนงหลักที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60% กรณีการอุดตันรูปแบบ T

รูปที่ 5.43 แสดงผลของระดับการอุดตันหลอดเลือดแขนงรองที่มีผลต่อค่า WSS พบว่า ค่า WSS ในระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS สูงสุด มีค่าที่ 5.858 Pa รองลงมาคือที่ระดับการอุดตัน 60% มีค่า WSS ที่ 5.377 Pa ต่อมาคือที่ระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS ที่ 3.941 Pa และสุดท้ายที่ระดับการอุดตัน 30% มีค่า WSS ที่ 3.392 Pa และเมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันสูงที่สุดค่า WSS ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการอุดตันที่ระดับ 60% จะมีการลดลงมากที่สุด โดยมีค่า WSS ลดลงมาที่ 0.546 Pa จากนั้นจึงเป็นที่ระดับการอุดตัน 50% มีค่า WSS ลดลงมาที่ 1.228 Pa ต่อมาคือที่ระดับการอุดตัน 40% มีค่า WSS ลดลงมาที่ 1.361 Pa และที่ระดับการอุดตัน 30% มีค่า WSS ลดลงมาที่ 1.288 Pa



รูปที่ 5.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง WSS หลอดเลือดแขนงรองที่ระดับการอุดตัน 30%, 40%, 50% และ 60% กรณีการอุดตันรูปแบบ T

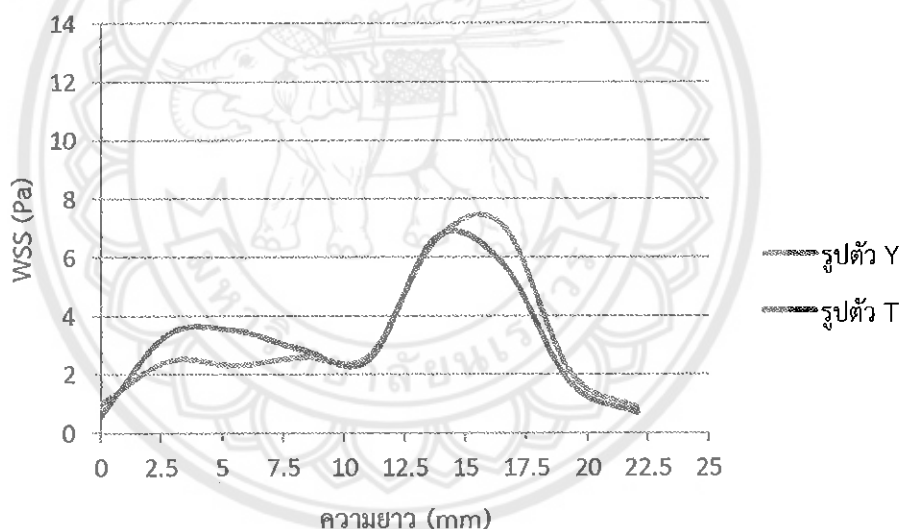
เราสังเกตได้ว่าที่ระดับการอุดตัน 30% นั้น ในทางการแพทย์ยังถือว่าปกติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า WSS ไม่สูงนักที่พื้นที่การอุดตัน และกลับเข้าสู่ค่าปกติที่ 1.5 Pa ในทุกรูปแบบการอุดตัน อย่างไรก็ตามที่ระดับการอุดตัน 40% นั้นอาจเริ่มมีอาการเจ็บหน้าอกในผู้ป่วยซึ่งแพทย์อาจวินิจฉัยให้เข้าในการรักษา แต่ที่ระดับการอุดตัน 50% ขึ้นไปนั้น การกระจายของ WSS ในจุดที่มีพื้นที่การไหลน้อย มี WSS สูง ซึ่งเสี่ยงต่อการปริของผนังหลอดเลือด รวมไปถึงเมื่อพื้นตำแหน่งที่อุดตัน WSS จะมีค่าต่ำกว่าค่าปกติ (1-1.5 Pa) ซึ่งส่งผลต่อแนวโน้มในการอุดตันต่อไปอีก

#### 5.4 การเปรียบเทียบ WSS ของหลอดเลือดอุดตันรูปตัว Y และตัว T

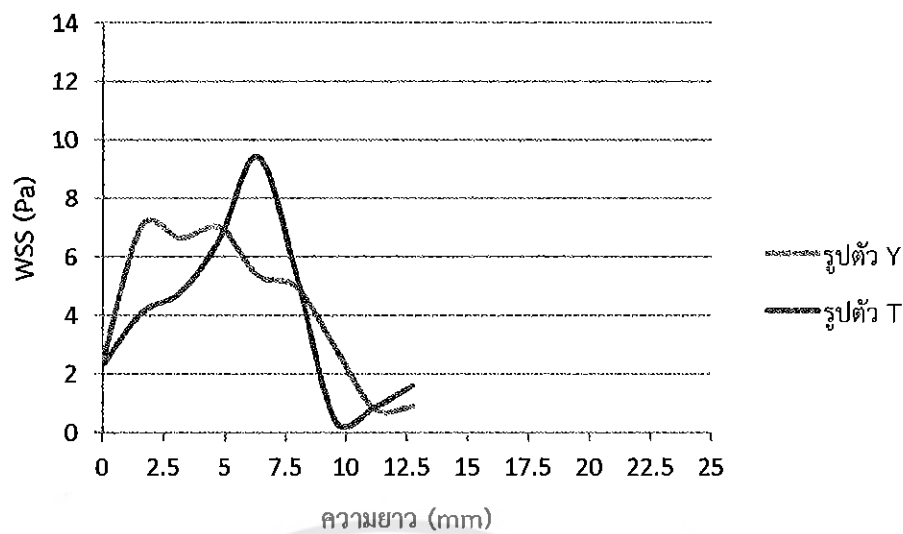
ในการอุดตันแบบตัว Y เลือกกรณีการอุดตันแบบ L-2-V เนื่องจากการอุดตันมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการอุดตันแบบตัว T คือมีการอุดตันทั้งแขนงหลัก และแขนงรอง โดยมีการอุดตันทั้งด้านในและด้านนอกของหลอดเลือด จึงเลือกใช้กรณีการอุดตันดังกล่าวในการเปรียบเทียบ WSS

รูปที่ 5.44 (ก) แสดงผล WSS ของบริเวณผนังการอุดตันด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก พบว่าหลอดเลือดอุดตันรูปตัว Y และตัว T มีลักษณะคล้ายกันคือที่จุดเริ่มต้น WSS จะยังอยู่ในระดับปกติ จากนั้น WSS จะมีค่าค่อนข้างคงที่บริเวณ Bifurcation จากนั้นจะ WSS จะขึ้นสูงที่สุด บริเวณที่มีการอุดตันสูงที่สุด โดยมีค่า WSS ประมาณ 7-7.5 Pa และลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 1 Pa

รูปที่ 5.44 (ข) แสดงผล WSS ของบริเวณที่ผนังการอุดตันด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก พบว่าที่จุดเริ่มต้นการอุดตันค่า WSS ของทั้งสองหลอดเลือดมีค่าใกล้เคียงกันที่ 2.5 Pa จากนั้น WSS ก็สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยหลอดเลือดรูปตัว T จะมีค่า WSS สูงสุดที่ 9.5 Pa และลดลงเข้าใกล้ 0 มาก ส่วนหลอดเลือดรูปตัว Y มีค่า WSS สูงสุดที่ 7 Pa และมีค่าลดลงมาที่ประมาณ 1 Pa



(ก) บริเวณผนังการอุดตันด้านนอกของหลอดเลือดแขนงหลัก

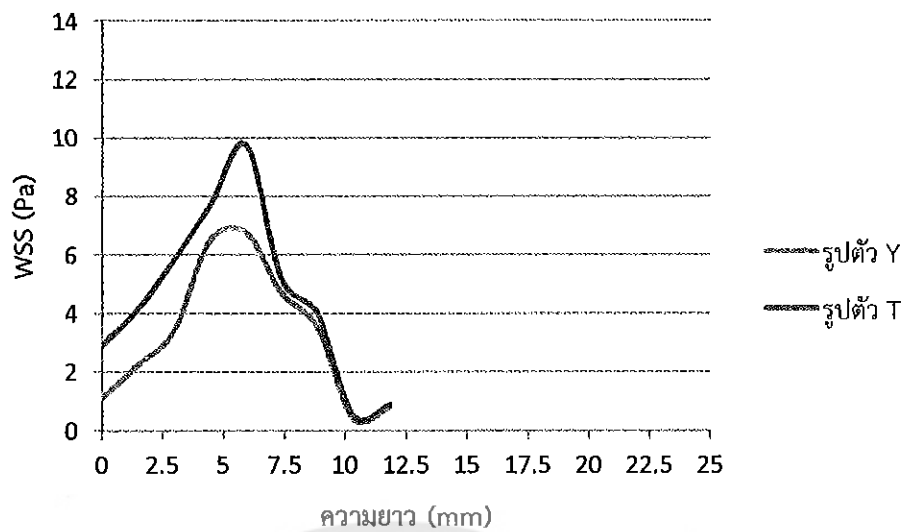


(ข) บริเวณผนังการอุดตันด้านในของหลอดเลือดแขนงหลัก

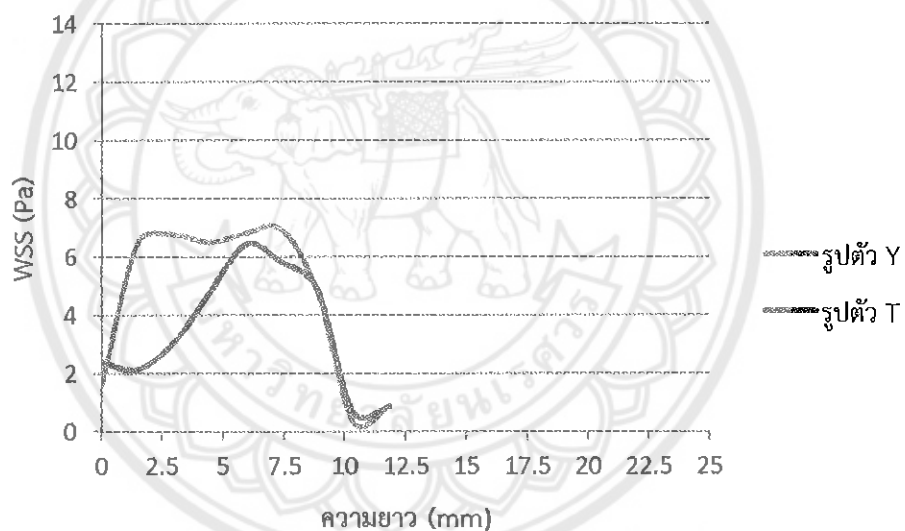
รูปที่ 5.44 เปรียบเทียบ WSS เฉพาะบริเวณผนังการอุดตันของหลอดเลือดแขนงหลักรูปตัว Y และตัว T

รูปที่ 5.45 (ก) แสดงผล WSS ของบริเวณผนังการอุดตันด้านนอกของหลอดเลือดแขนงรอง พบว่า WSS ของทั้งหลอดเลือดรูปตัว Y และตัว T มีลักษณะคล้ายกัน แต่ของหลอดเลือดรูปตัว T จะมีความรุนแรงมากกว่า โดยหลอดเลือดรูปตัว T มีค่า WSS สูงสุดที่ประมาณ 10 Pa จากนั้น WSS ก็ จะลดลงเข้าใกล้ 0 มาก ส่วนหลอดเลือดรูปตัว Y มีค่า WSS สูงสุดที่ 7 Pa จากนั้น WSS ลดลงมาที่ ประมาณ 1 Pa

รูปที่ 5.45 (ข) แสดงผล WSS ของบริเวณผนังการอุดตันด้านในของหลอดเลือดแขนงรอง พบว่า WSS ของหลอดเลือดรูปตัว Y จะมีค่าสูงกว่าหลอดเลือดรูปตัว T โดยหลอดเลือดรูปตัว Y มีค่า WSS สูงสุดที่ 7 Pa ส่วนหลอดเลือดรูปตัว T มีค่า WSS สูงสุดที่ 6.5 Pa จากนั้น WSS มีค่าลดลงเข้า ใกล้ 0 เหมือนกันทั้งสองรูปแบบ



(ก) บริเวณผนังการอุดตันด้านนอก



(ข) บริเวณผนังการอุดตันด้านใน

รูปที่ 5.45 เปรียบเทียบ WSS เฉพาะบริเวณผนังที่อุดตันของหลอดเลือดแขนงรูปตัว Y และตัว T

เมื่อเราพิจารณาบริเวณผนังการอุดตันทุกด้านของหลอดเลือดอุดตันแบบตัว Y และตัว T เรา จะพบว่าในหลอดเลือดรูปตัว T ที่บริเวณที่มีการอุดตันสูงที่สุดจะมีค่า WSS สูงกว่าหลอดเลือดรูปตัว Y จากนั้น WSS จะมีค่าลดลงเข้าสู่ 0 ในทุกด้าน แต่หลอดเลือดรูปตัว Y จะมีค่าลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 1 Pa ซึ่งยังคงอยู่ในระดับปกติ ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถสรุปได้ว่าการอุดตันในหลอดเลือดรูป ตัว T มีความรุนแรง และมีแนวโน้มในการเกิดอุดตันต่อไปได้มากกว่าหลอดเลือดรูปตัว Y



## บทที่ 6

### สรุปผลการคำนวณ

ในการศึกษาเชิงตัวเลขของการไหลผ่านหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ และหลอดเลือดแยกสองง่ามอุดตันกรณีต่างๆ ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลอง Carreau-Yasuda สามารถสรุปตามหัวข้อที่ศึกษาได้ดังนี้

1. เมื่อพิจารณาค่า WSS ของหลอดเลือดแยกสองง่ามปกติ โดยมี 2 แบบ ได้แก่รูปตัว Y และรูปตัว T ซึ่งจะมีลักษณะการกระจายของค่า WSS คล้ายๆ กัน โดยพบว่าที่บริเวณทางเข้าของหลอดเลือดหลัก จะมีค่าสูงกว่าปกติ (1-1.5 Pa) เล็กน้อย จากนั้นค่า WSS จะค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่ระดับปกติ และลดลงอีกครั้งที่บริเวณ Bifurcation เนื่องจากพื้นที่การของไหลขยายใหญ่ขึ้น และการไหลมีการแยกออกเป็น 2 ทางเข้าสู่หลอดเลือดแขนทั้งสอง เมื่อการไหลของเลือดเข้าสู่หลอดเลือดแขนแขนแล้ว WSS จะค่อยๆ สูงขึ้น จนเข้าสู่ระดับปกติ โดยจะเห็นว่า WSS ที่ลดลงบริเวณ Bifurcation อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแนวโน้มในการอุดตันบริเวณแยกสองง่ามนั้นเอง

2. เมื่อพิจารณา WSS ในกรณีการอุดตันแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับ WSS หลอดเลือดปกติ พบว่า ที่บริเวณทางเข้าหลอดเลือดหลัก มีค่า WSS สูงกว่าปกติเล็กน้อย เช่นเดียวกับหลอดเลือดปกติ จากนั้นก็จะลดลงเข้าสู่ระดับปกติ แต่เมื่อเข้าสู่บริเวณ Bifurcation ค่า WSS ของกรณีที่มีการอุดตันจะลดลงต่ำกว่าหลอดเลือดปกติไม่มากนัก จากนั้นเมื่อเข้าสู่หลอดเลือดแขนที่มีการอุดตันค่า WSS จะสูงขึ้นอีกครั้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่มีพื้นที่การไหลน้อยที่สุด โดยความรุนแรงของ WSS นั้นจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของรูปแบบการอุดตัน โดยยิ่งซับซ้อนมากขึ้น จะยิ่งทำให้มีค่า WSS สูงขึ้น เช่นกรณีการอุดตันแบบ L-2-V ที่เกิดการอุดตันของหลอดเลือดทั้งด้านในและด้านนอกของหลอดเลือดแขนทั้งสอง จากนั้นเมื่อออกจากบริเวณที่มีการอุดตันสูงสุด WSS จะลดลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่ 0 เนื่องจากเกิด Flow Separation และ/หรือ Back Flow และเมื่อการไหลเข้าสู่หลอดเลือดปกติ WSS จะค่อยๆ สูงขึ้นจนเข้าสู่ระดับปกติ

3. เมื่อพิจารณาผลของระดับการอุดตันมีผลต่อค่า WSS พบว่าระดับการอุดตัน ที่บริเวณที่มีการอุดตันมากที่สุด (ตีบมากที่สุด) ซึ่งทำให้มีพื้นที่การไหลน้อยไม่ส่งผลให้ WSS มีค่าสูงขึ้นตามระดับ

การอุดตัน แต่เมื่อการไหลออกจากบริเวณที่เกิดการอุดตันมากที่สุด ที่ระดับการอุดตันสูง WSS จะลดต่ำลงมากที่สุด (WSS : 60% < 50% < 40% < 30% )

#### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากศึกษาครั้งนี้มีการกำหนดขอบเขตเป็นการไหลแบบราบเรียบ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการคำนวณผลของระดับการอุดตันที่มีระดับการอุดตันสูง เมื่อมีการทำการศึกษาในอนาคต หากมีการศึกษาการไหลแบบปั่นป่วน อาจจะทำให้ทราบผล WSS ของระดับการอุดตันที่สูงขึ้น

2. ในอนาคต หากมีการศึกษาการไหลแบบ Pulsatile จะทำให้ได้ข้อมูลของ WSS และสนามการไหลที่เป็นประโยชน์ต่อการวินิจฉัยมากขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Movahed, M.R. (2008). Coronary artery bifurcation lesion classification, Interventional techniques and clinical outcome. *Expert Rev Cardiovasc Ther*, 6, 261-27
- [2] สถิติโรคหัวใจ. สืบค้นเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.thaincd.com/ncd-injured-archive.php>
- [3] Johnston, B.M., Johnston, P.R., Corney, S. and Kilpatrick, D. (2004). Non-Newtonian blood flow in human right coronary arteries: steady state simulations. *J.Biomechanics*, 37, 709-720
- [4] Truskey, George A., Fan Yuan and Katz, David F. (2008). *Transport Phenomena in Biological Systems*. (2). Lawrence, KS, U.S.A.: Prentice Hall.
- [5] Gijssen, F.J.H., van de Vosse, F.N., Janssen, J.D. (1998). The influence of the non-Newtonian properties of blood on the flow in large arteries: unsteady flow in a 90° curved tube. *J. Biomechanics*, 32, 705-713
- [6] Frank M. White, (1994). *Fluid Mechanics*. Singapore, McGraw-Hill Book Co.
- [7] Nicolas Benard., Damien Coisne., ErwanDonal., Robert Perrault., 2003. Experimental studt of laminar blood flow through an artery treated by a stent implantation: characterization of intra-stent wall shear stress. *Journal of Biomechanics* 36, 991-998.
- [8] Gijssen, F.J.H., van de Vosse, F.N., Janssen, J.D. (1999). The influence of the non-Newtonian properties of blood on the flow in large arteries: steady flow in a carotid bifurcation model. *J. Biomechanics*, 32, 601-608
- [9] Holdsworth, R.J., McCollum, P.T., Bryce, J.S. and Harrison, D.K. (1995). Sytoms, Stenosis and Carotid Plaque Morphology. Is Plaque Morphology Relevant?. *Vasc Endovasc Surg*, 9, 80-85





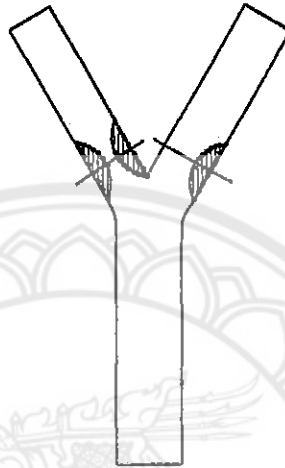
ภาคผนวก ก

การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของส่วนที่อุดตัน

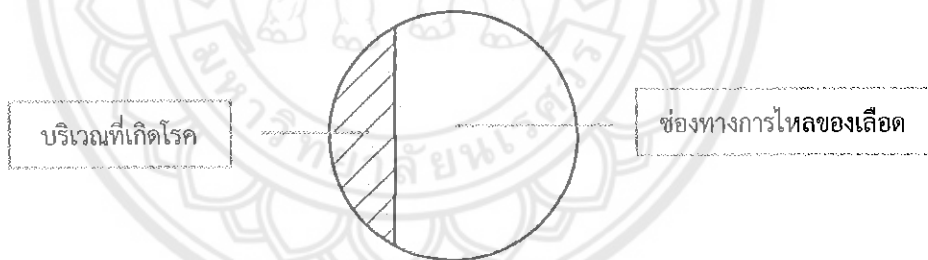
มหาวิทยาลัยสุรินทร์

พื้นที่หน้าตัดของส่วนที่อุดตันของหลอดเลือดจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ

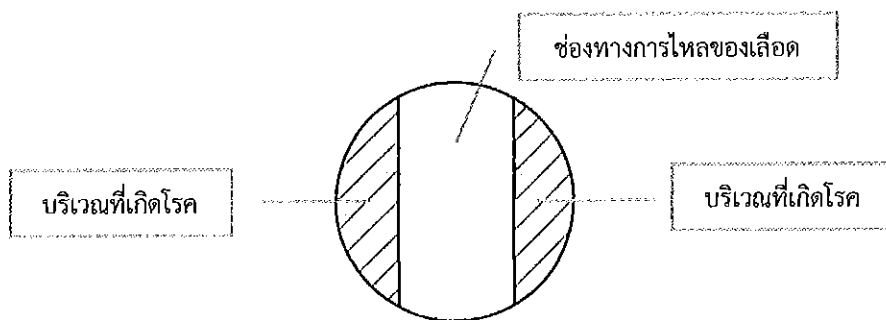
1. กรณีเกิดการอุดตัน 1 ด้าน
2. กรณีเกิดการอุดตัน 2 ด้าน



รูปที่ ก.1 cross section บริเวณที่เกิดโรค 1 ด้าน และ 2 ด้าน



รูปที่ ก.2 พื้นที่หน้าตัดของหลอดเลือดกรณีเกิดการอุดตัน 1 ด้าน

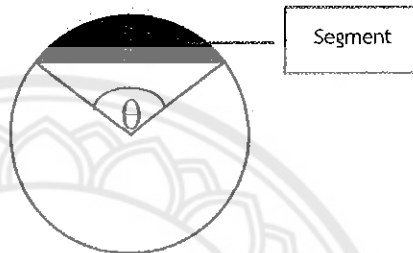


รูปที่ ก.3 พื้นที่หน้าตัดของหลอดเลือดกรณีเกิดการอุดตัน 2 ด้าน

การหาพื้นที่และความสูงของพื้นที่หน้าตัดจะใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ ได้แก่

$$\text{พื้นที่เซกเมนต์ของวงกลม} \quad : \quad A = \frac{r^2}{2}(\theta - \sin \theta)$$

$$\text{ความสูงของเซกเมนต์ของวงกลม} \quad : \quad h = r \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right)$$



รูปที่ ก.4 ลักษณะของเซกเมนต์ของวงกลม

ยกตัวอย่าง การอุดต้นหลอดเลือดแขนงรอง 60%

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของหลอดเลือดแขนงรองปกติ (ไม่อุดต้น)} = \frac{\pi}{4} \times 2.8^2 = 6.158 \text{ mm}^2$$

$$\text{พื้นที่ของการไหลของเลือดเหลือ 40% คิดเป็น} = 0.4 \times \frac{\pi}{4} \times 2.8^2 = 2.463 \text{ mm}^2$$

1. กรณีพื้นที่การอุดต้น 1 ด้าน

$$\text{พื้นที่หน้าตัดส่วนที่อุดต้น} \quad A = 6.158 - 2.463 = 3.695 \text{ mm}^2$$

$$\text{มุม} \quad \theta = 3.459 \text{ rad}$$

$$\text{ความสูงของส่วนที่อุดต้น} \quad h = 1.4 \left( 1 - \cos \left( \frac{3.459}{2} \right) \right) = 1.621 \text{ mm}$$

## 2. กรณีพื้นที่การอุดตัน 2 ด้าน

$$\text{พื้นที่หน้าตัดส่วนที่อุดตันด้านละ} \quad A = \frac{6.158 - 2.463}{2} = 1.847 \text{ mm}^2$$

$$\text{มุม} \quad \theta = 2.491 \text{ rad}$$

$$\text{ความสูงของส่วนที่อุดตัน} \quad h = 1.4 \left( 1 - \cos \left( \frac{2.491}{2} \right) \right) = 0.952 \text{ mm}$$

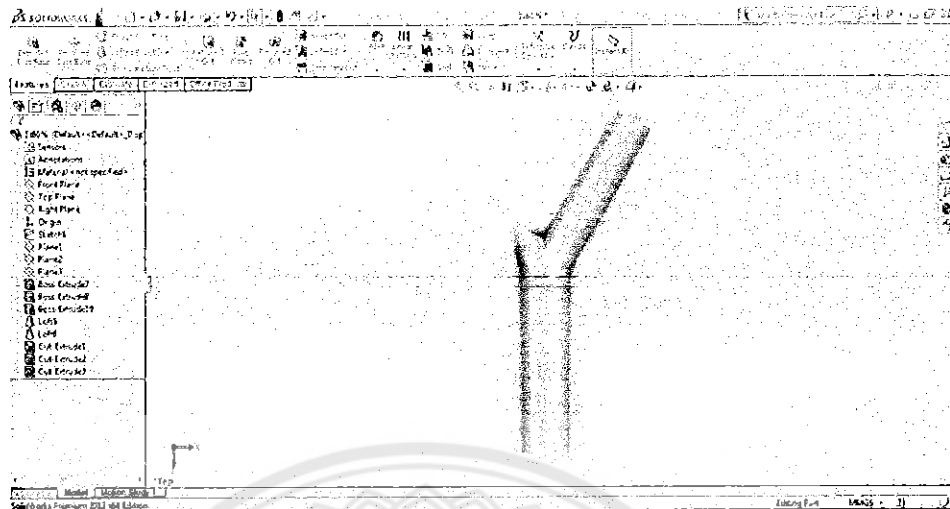
ตารางที่ ก.1 พื้นที่การอุดตัน มุม และความสูงของหลอดเลือดแขนงหลักและแขนงรองที่ระดับการอุดตันต่างๆ

เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดเลือด (mm)	อุดตัน (%)	พื้นที่ของการไหลของเลือด (mm <sup>2</sup> )	พื้นที่อุดตัน (mm <sup>2</sup> )		มุม (radian)		ความสูงของการอุดตัน (mm)	
			1 ด้าน	2 ด้าน	1 ด้าน	2 ด้าน	1 ด้าน	2 ด้าน
2.8	60.0	2.463	3.695	1.847	3.459	2.491	1.621	0.952
	50.0	3.079	3.079	1.539	3.142	2.310	1.400	0.834
	40.0	3.695	2.463	1.232	2.825	2.113	1.179	0.712
	30.0	4.310	1.847	0.924	2.491	1.892	0.952	0.581
3.2	60.0	3.217	4.825	2.413	3.458	2.491	1.852	1.089
	50.0	4.021	4.021	2.011	3.141	2.310	1.600	0.954
	40.0	4.825	3.217	1.608	2.825	2.113	1.348	0.813
	30.0	5.630	2.413	1.206	2.491	1.891	1.089	0.664

เราสามารถตรวจสอบพื้นที่ของการไหลของเลือดได้โดยใช้โปรแกรมเขียนแบบ Solidworks ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

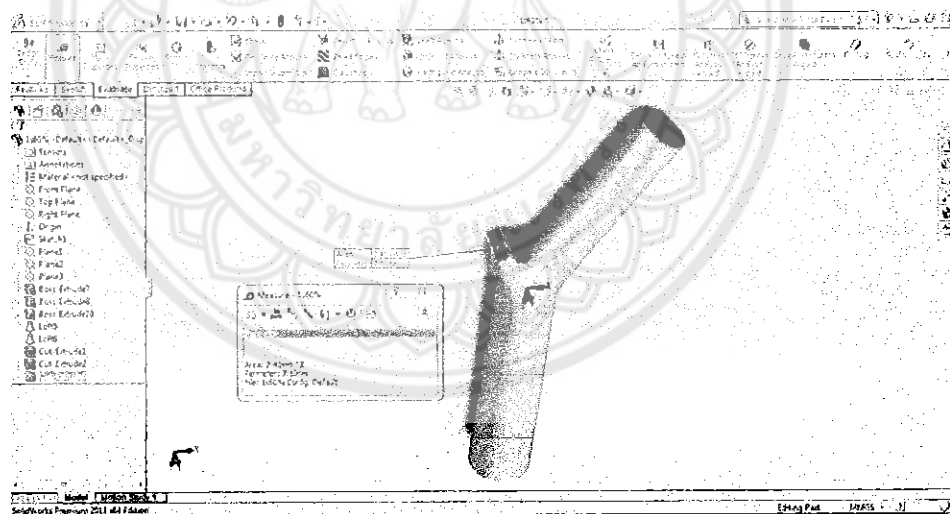
1. ตัดส่วนปลายของหลอดเลือดแขนงที่ต้องการตรวจสอบจนถึงบริเวณกึ่งกลางความยาวของการอุดตัน เพื่อให้เหลือเป็นพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ต้องการจะตรวจสอบ





รูปที่ ก.5 หลอดเลือดหลังทำการตัดให้เหลือพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่จะตรวจสอบ

- เลือกคำสั่ง Measure ในส่วนของ Evaluate จากนั้นคลิกเลือกพื้นที่ของการไหลของเลือดบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ



รูปที่ ก.6 การตรวจสอบพื้นที่การไหลของเลือดโดยการใช้โปรแกรม Solidworks

- ตรวจสอบค่าที่ได้จากโปรแกรม Solidworks และค่าที่คำนวณในตาราง

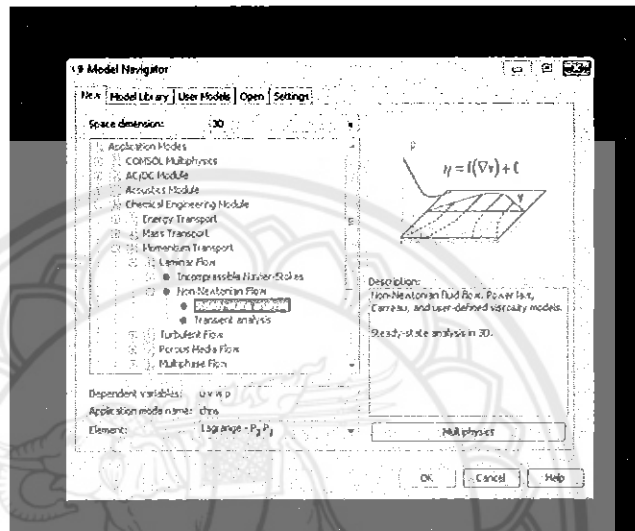


ภาคผนวก ข

การ Import file การสร้างเมชและการคำนวณในโปรแกรม COMSOL

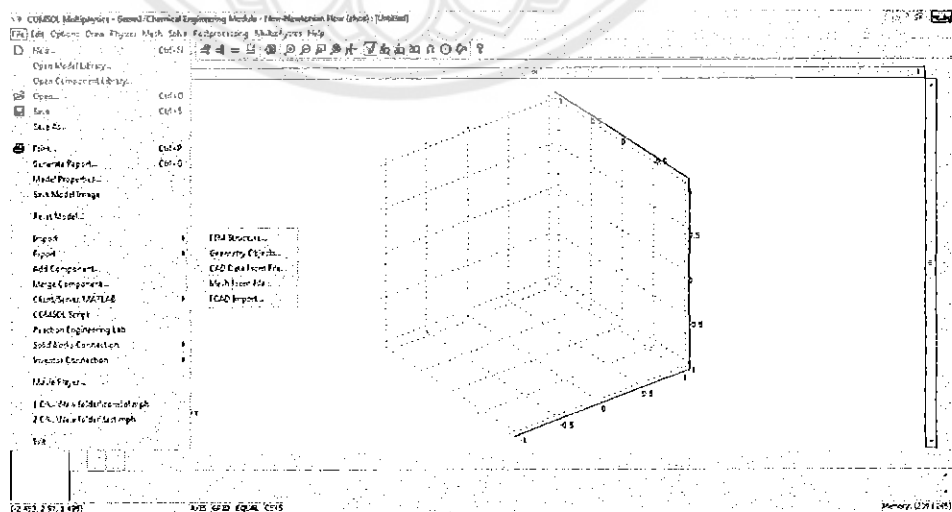
## 1. การ Import file เข้า COMSOL

1.1 เปิดโปรแกรม COMSOL เลือก 3D ที่คำสั่ง Space dimension หลังจากนั้นเลือก Chemical Engineering Module และ Momentum Transport ทำการเลือก Laminar Flow แล้วเลือก Non-Newtonian Flow จากนั้นเลือก Steady-state analysis และเลือกคำสั่ง OK



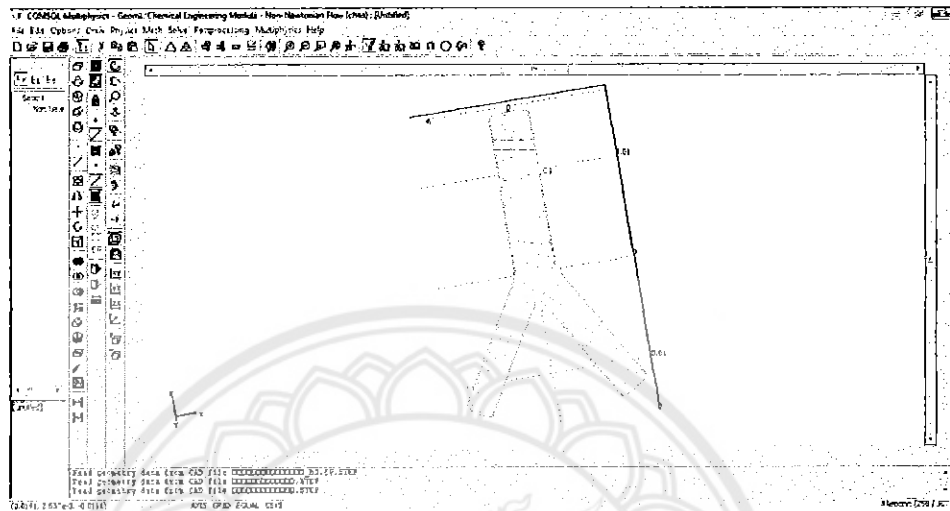
รูปที่ ข.1 การเข้าโปรแกรม COMSOL

1.2 การนำไฟล์งานจาก Solid work มาเปิดใน COMSOL ทำได้โดยการเลือกคำสั่ง File ต่อด้วย Import และ CAD Data From File



รูปที่ ข.2 การ Import file เข้า COMSOL

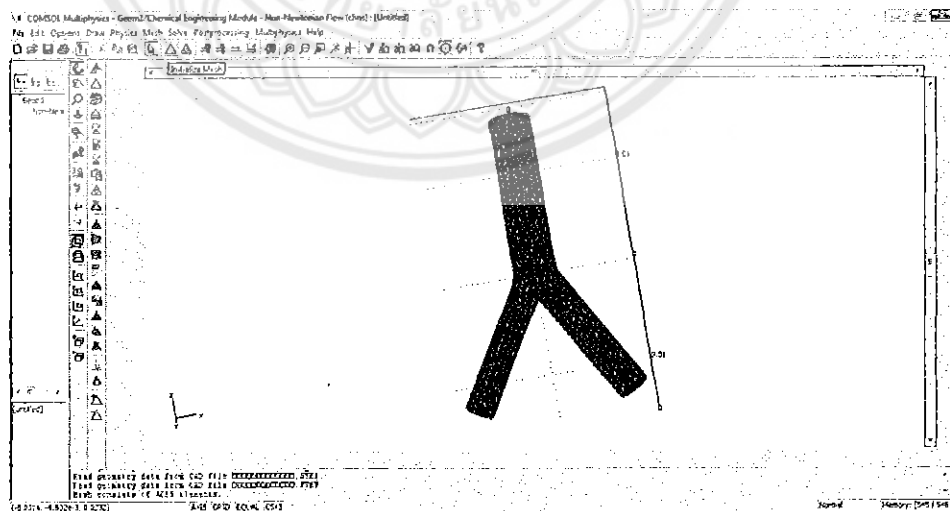
1.3 เลือกไฟล์งานนามสกุล STEP AP203 ที่ต้องการ แล้วคลิก Import โปรแกรมจะแสดงแบบจำลองที่เราเขียนไว้ ดังรูป



รูปที่ ข.3 การแสดงแบบจำลองที่ Import file เข้า COMSOL

## 2. การสร้างเมช

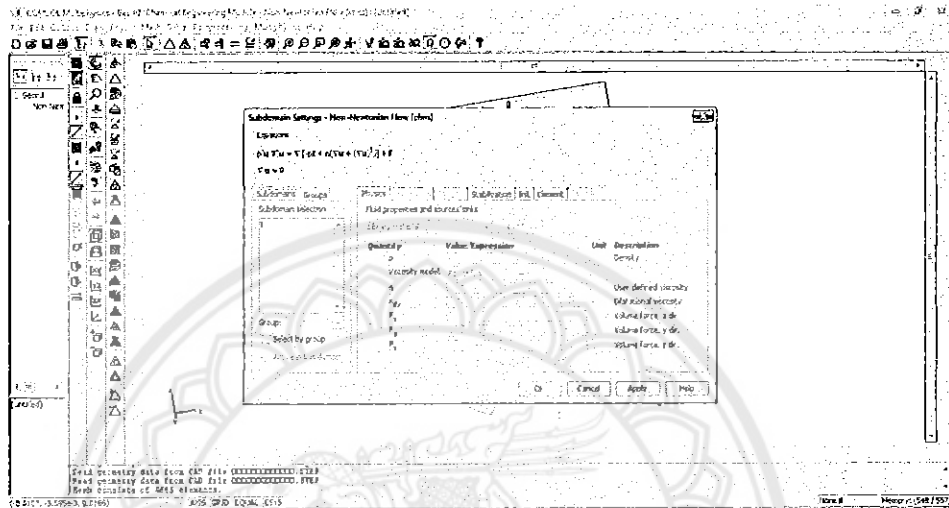
เมื่อนำไฟล์เข้าโปรแกรม COMSOL เสร็จแล้ว จึงทำการสร้างเมชโดยการคลิกที่ปุ่มคำสั่ง Mesh และเลือก Initialize Mesh หรือคำสั่งที่มีสัญลักษณ์เป็นรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ ข.4 แบบจำลองที่มีการสร้างเมช

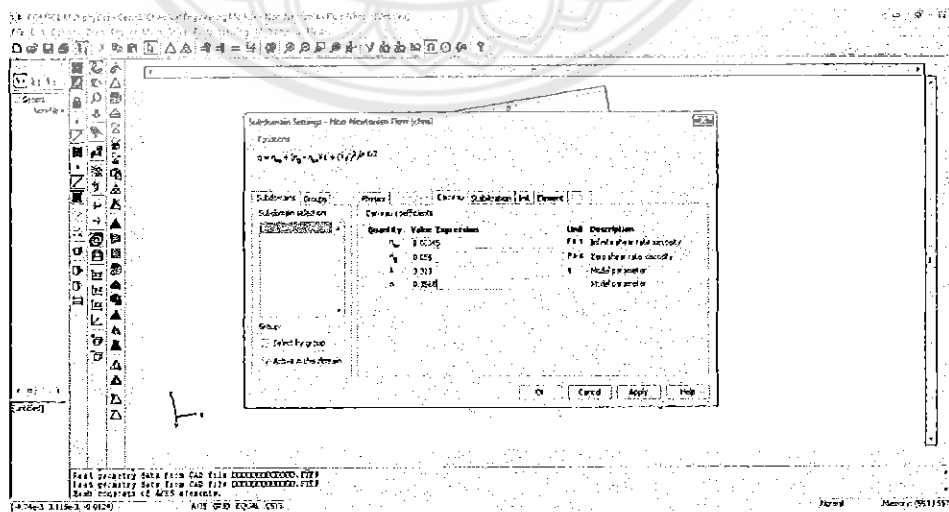
### 3. วิธีการคำนวณใน COMSOL

#### 3.1 เริ่มทำการคำนวณโดยเลือก Physic และ Subdomain Setting จะขึ้นหน้าต่างใหม่ ขึ้นมาตามรูป



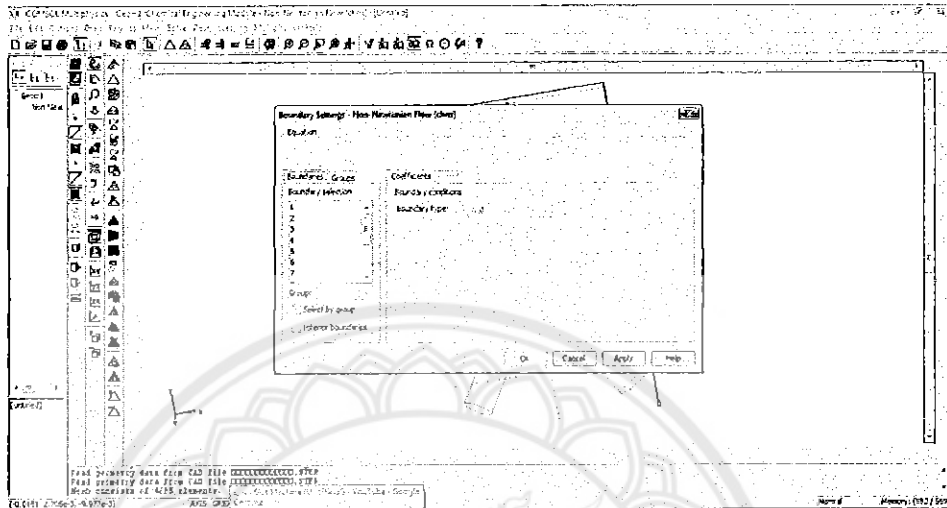
รูปที่ ข.5 วิธีการคำนวณข้อมูลใน COMSOL

3.2 จากนั้นที่ช่อง Subdomain selection เลือก เลข 1 ส่วนตรง Viscosity model เลือก Carreau model จากนั้นเลือก Tab เป็น Carreau แล้วใส่ค่าต่างๆ ที่คำนวณไว้ลงในช่อง แล้วคลิก OK ตามรูป



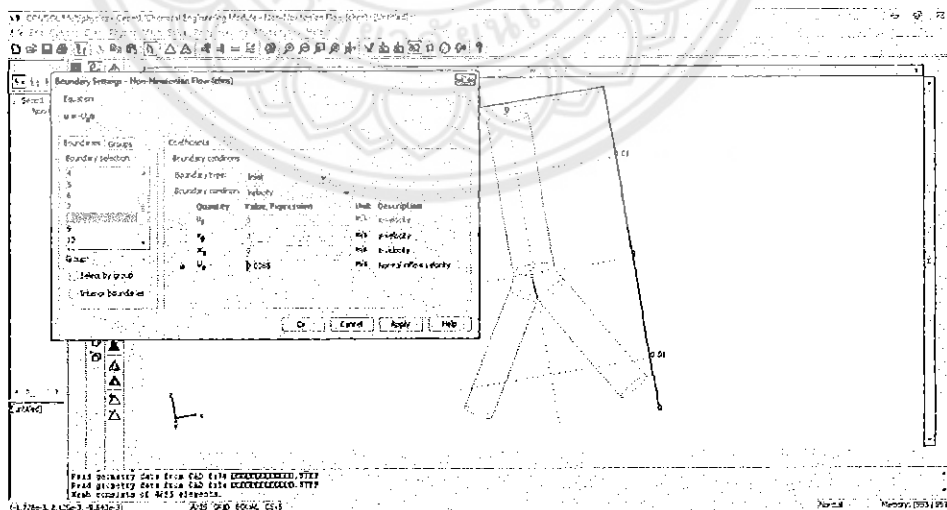
รูปที่ ข.6 วิธีการคำนวณข้อมูลใน COMSOL เมื่อใส่ค่า

3.3 หลังจากนั้นทำการกำหนดพื้นผิวของแบบจำลองโดยเลือก **Physic** จากนั้นเลือก **Boundary Setting** จะขึ้นหน้าต่างใหม่ขึ้นมาตามรูป



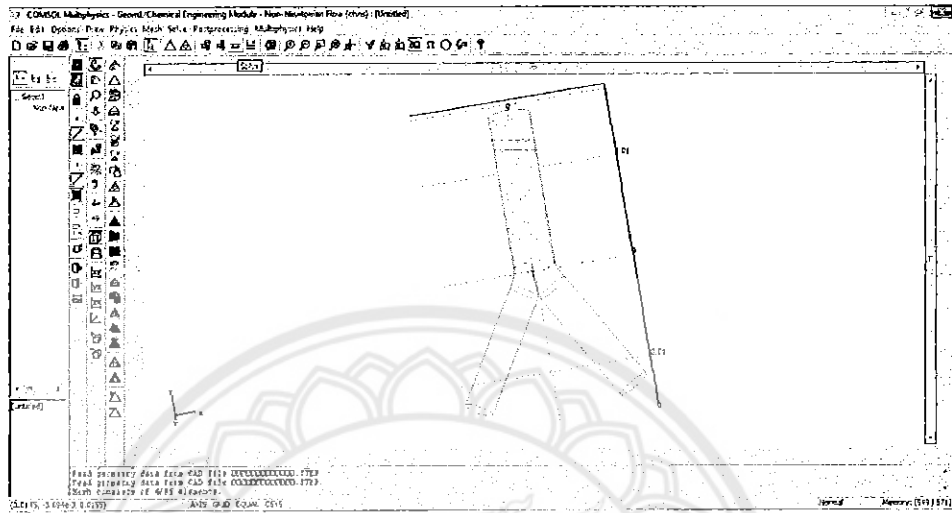
รูปที่ ข.7 หน้าต่างการกำหนดพื้นผิวของแบบจำลอง

3.4 ตรงทางเข้าของท่อกำหนดให้ **Boundary type** เป็น **Inlet** และใส่ค่า  $U_0=0.1664$  m/s ส่วนทางออกของท่อกำหนดให้ **Boundary type** เป็น **Outlet** และค่า  $P_0=0$  Pa และผนังของท่อที่เหลือกำหนดให้ **Boundary type** เป็น **Wall** และ **Boundary condition** เป็น **No slip** คลิก **OK**



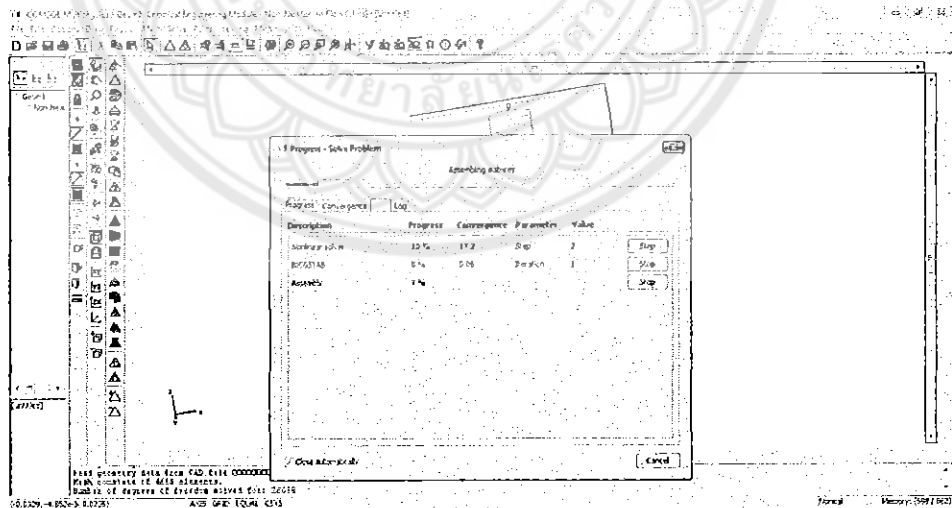
รูปที่ ข.8 การกำหนดพื้นผิวของแบบจำลอง

3.5 จากนั้นรันโปรแกรมโดยการคลิกที่ปุ่มคำสั่ง Solve ต่อด้วย Solve Problem หรือคำสั่งที่มีสัญลักษณ์เป็นเครื่องหมายเท่ากับ



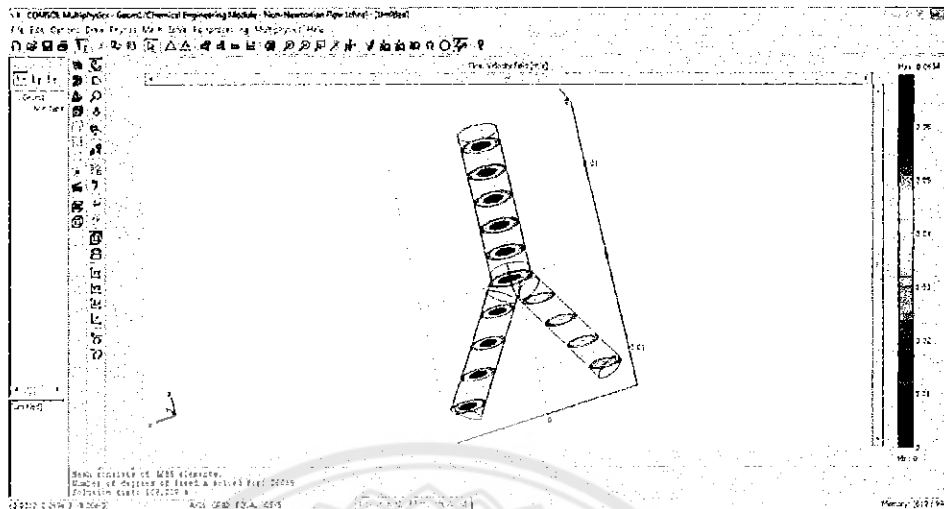
รูปที่ ข.9 การเข้าสู่การคำนวณใน COMSOL

3.7 เมื่อคลิกคำสั่ง Solve แล้วจะมีหน้าต่างขึ้นมาเพื่อให้ทราบถึงความคืบหน้าของการคำนวณ ทั้งนี้ระยะเวลาในการคำนวณขึ้นอยู่กับจำนวน Mesh และความซับซ้อนของตัวแบบ



รูปที่ ข.10 หน้าต่างแสดงความคืบหน้าของการคำนวณ

3.8 เมื่อคำนวณเสร็จแล้วหน้าต่างการคำนวณจะหายไปและแบบจำลองที่เรานำมาคำนวณ จะมีผลการคำนวณในรูปแบบต่างๆที่เรากำหนด ในรูปจะเป็นการแสดงผล Slice Plot



รูปที่ ข.11 ผลการคำนวณแบบจำลองของโปรแกรม COMSOL

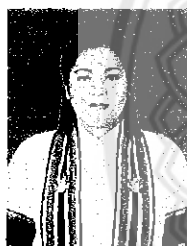




## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ/สกุล นายรัชชัย ตอนไพรอ่อน  
 เกิดเมื่อ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2535  
 ภูมิลำเนา 166/4 หมู่ 7 ตำบลบึงพระ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000  
 การศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน  
 พุทธชินราชพิทยา อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000  
 E-mail T\_donpraion@hotmail.com



ชื่อ/สกุล นางสาวเพ็ญพิชชา น้อยเดช  
 เกิดเมื่อ 24 กันยายน พ.ศ. 2535  
 ภูมิลำเนา 380/1 หมู่ 2 ตำบลบึงพระ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000  
 การศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน  
 พุทธชินราชพิทยา อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000  
 E-mail n.penphitcha@gmail.com



ชื่อ/สกุล นางสาวนันท์ตา พันธุ์ระ  
 เกิดเมื่อ 31 มีนาคม พ.ศ. 2535  
 ภูมิลำเนา 190/1 ตำบลล่อ อำเภอจุน จังหวัดพะเยา 56150  
 การศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน  
 จุนวิทยาคม อ.จุน จ.พะเยา 56150  
 E-mail nanthitaphanthura@gmail.com