

การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด



นางสาวอุรวิรัฐ วัฒนชนม์


สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-347-237-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR
MEASURING VASCULAR WALL STRUCTURE



Miss Ureerat Wattanachon

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Computer Science

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-347-237-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด
โดย นางสาวอุรวิรัฐ วัฒนชนม์
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ฤทธิ์ โค้ววิสารัช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิลักษณ์ ปทุมราช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ฤทธิ์ โค้ววิสารัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิลักษณ์ ปทุมราช)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.บัณฑิต ทิพากร)

คู่มือรัฐ วัฒนชนม์ : การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด (A DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR MEASURING VASCULAR WALL STRUCTURE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.นงลักษณ์ โค้ววิสารัช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.สุทธิลักษณ์ ปทุมราช, 104 หน้า. ISBN 974-347-237-1.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดโดยใช้การประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์กราฟิกมาช่วยในการวิเคราะห์ภาพ เนื่องจากลักษณะของภาพหลอดเลือดมีความแตกต่างหลากหลายมาก ทั้งจากลักษณะของหลอดเลือดเอง จากกระบวนการเตรียมสไลด์ และจากการที่ข้อมูลภาพที่นำมาใช้ต้องผ่านหลายสื่อ จึงทำให้โปรแกรมนี้มีข้อจำกัดที่ผู้ใช้ต้องคำนึงถึง และผู้ใช้ควรเลือกใช้รูปแบบการทำงานให้เหมาะสม งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโปรแกรมวัดเป็น 3 แบบคือ แบบอัตโนมัติ แบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบกำหนดเองโดยผู้วัด ในการวัดแบบอัตโนมัติโปรแกรมจะคัดเลือกจุดที่อยู่บนผนังหลอดเลือดที่เหมาะสมทั้งหมดเพื่อเป็นตัวแทนในการวัดโดยอัตโนมัติ แล้วคำนวณค่าโครงสร้างของผนังหลอดเลือดให้รวมทั้งความหนาของผนังหลอดเลือด สำหรับการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ ผู้ใช้สามารถเลือกที่จะตัด เพิ่ม หรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดที่การวัดแบบอัตโนมัติได้คัดเลือกมาได้ ในขณะที่การวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัดนั้นผู้ใช้สามารถคัดเลือกจุดการวัดได้เอง

งานวิจัยนี้ได้ประเมินผลโปรแกรมวัดกับชุดภาพวงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีที่สร้างขึ้นจำนวน 22 ภาพที่มีความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. ค่าความหนาที่วัดได้เป็น 0.994 ± 0.004 ซม. ($n = 313$) และ 1.981 ± 0.025 ซม. ($n = 242$) สำหรับความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. ตามลำดับ โปรแกรมวัดนี้ยังได้ทดลองวัดกับภาพหลอดเลือดจำนวน 27 ภาพ เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดโดยคนพบว่าจำนวนจุดที่วัดโดยโปรแกรมนี้มีมากกว่าการวัดด้วยคนมาก โดยเฉพาะภาพหลอดเลือดที่มีขอบของผนังหลอดเลือดชัดเจนซึ่งทำให้ค่าความหนาที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือมาก ในการทดลองใช้งานจริงในห้องปฏิบัติการ Microcirculation ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมนี้ช่วยให้การวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดทำได้สะดวกและมีประสิทธิภาพทางสถิติมากกว่าการวัดโดยคนซึ่งไม่สามารถเลือกจุดได้ละเอียดเท่า รวมทั้งช่วยลดปัญหาการวัดที่ทำโดยคนที่ยังมีความไม่แน่นอนซึ่งทำให้ค่าที่วัดได้มีความแปรปรวนสูงด้วย

ภาควิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2543	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070518421 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEY WORD: MEASURING/ VASCULAR WALL STRUCTURE/ IMAGE PROCESSING

UREERAT WATTANACHON : A DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR MEASURING VASCULAR WALL STRUCTURE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. NONGLUK COVAVISARUCH THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. SUTHILUK PATUMRAJ, Ph.D., 104 pp. ISBN 974-347-237-1.

The purposes of this research are to design and to develop a program for measuring vascular wall structure by using digital image processing and computer graphics to help analyzing images. Various different blood vessel shapes, slide preparation and image acquisition processes can all cause blood vessel images to vary widely. The designed measuring program, hence, has some limitations that users must be aware of, and they must select a suitable working mode. The measuring program is designed to work in 3 modes: automatic, semi-automatic and manual. Appropriate measuring points on vascular walls are automatically selected in the automatic mode. Vascular wall structure, which includes the vascular wall thickness, is calculated. With semi-automatic mode, users can choose to delete, to add or to change the measuring points selected from automatic mode. Users can freely select measuring points to measure vascular wall thickness in the manual mode.

In this research, the measuring program has been evaluated with 22 images of both circular rings and elliptical rings of 1 cm. and 2 cm. thick. The thicknesses resulting from the program are 0.994 ± 0.004 cm. ($n = 313$) and 1.981 ± 0.025 cm. ($n = 242$) for the 1 cm. and 2 cm., respectively. The program has been tested with 27 blood vessel images, when compared to human measuring results, shows that it provides more reliable measurements as many more measuring points are used in the program, especially for the distinct vascular walls images. A practical use at the Microcirculation Lab, Department of Physiology, Faculty of Medicine, Chulalongkorn University, shows that the program makes vascular wall measuring process work much more convenient. The results are more statistically efficient when compared to those done by human because human cannot select as many measuring points. The program also reduces human's uncertain measuring problems which cause measuring results to vary widely.

Department	Computer Engineering	Student's signature
Field of study	Computer Science	Advisor's signature
Academic year	2000	Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.นงลักษณ์ โค้ววิสารัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำ เสนอแนะข้อคิดเห็นและแนวทางในการค้นคว้า ด้วยดีตลอดมา ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.สุทธิลักษณ์ ปทุมราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมอย่างยิ่ง ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือข้อมูลทางการแพทย์ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณพี่อัมพร จาริยะพงษ์สกุล ที่ได้เอื้อเฟื้อภาพหลุดเลือด เพื่อนำมาใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานในห้องปฏิบัติการ CGCI ทุกท่าน โดยเฉพาะน้องทศพล ธนะทิพานนท์ และน้องนันทนา ธินรุ่งโรจน์ ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือด้วยดีตลอดมาในการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจในทุก ๆ ด้าน รวมทั้งส่งเสริมให้การศึกษาอย่างต่อเนื่องให้กับผู้วิจัยตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปัญหาและแนวทางแก้ปัญหาการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดในปัจจุบัน	
2.1 ขั้นตอนการวัดความหนาที่ใช้ในปัจจุบัน.....	5
2.2 ปัญหาและอุปสรรคในการวัดความหนาของผนังหลอดเลือด.....	8
2.3 แนวทางแก้ปัญหา	
2.3.1 ลักษณะของเครื่องมือวัด.....	10
2.3.2 โครงสร้างของผนังหลอดเลือดที่วัด.....	11
3 การประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์กราฟิกในงานวิจัย	
3.1 การกำจัดสัญญาณรบกวน.....	12
3.2 การทำเป็นภาพลักษณะฐานสอง	
3.2.1 ขั้นตอนการทำฮิสโทแกรมอีควอไลเซชัน.....	13
3.2.2 ขั้นตอนการหาค่าขีดแบ่ง.....	15
3.3 การสร้างเส้นองศา.....	17
3.4 การหาเส้นขอบของผนังหลอดเลือด	
3.4.1 วิธีการตามรอยขอบ.....	19
3.5 การหาพื้นที่	
3.5.1 การแผ่ขยายบริเวณ.....	25

3.6	การสร้างเส้นตั้งฉาก	27
4	ขั้นตอนวิธีการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดแบบอัตโนมัติ	
4.1	การหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด	32
4.2	การหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด	33
4.3	การวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด	
4.3.1	การวัดความหนาของผนังหลอดเลือด	36
4.3.2	การหาความยาวขอบของผนังหลอดเลือด	39
4.3.3	การหาพื้นที่	39
5	การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือและการทดลองใช้กับภาพหลอดเลือดจริง	
5.1	การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือ	40
5.2	ผลการตรวจสอบกับภาพที่สร้างขึ้น	41
5.3	การวิเคราะห์ผลของภาพที่สร้างขึ้น	45
5.4	การทดลองกับภาพหลอดเลือดจริง	45
5.5	ผลการทดลองของภาพหลอดเลือดจริง	45
5.6	การวิเคราะห์ผลของภาพหลอดเลือดจริง	45
6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1	สรุปผลการวิจัย	76
6.2	ข้อเสนอแนะ	77
	รายการอ้างอิง	78
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก	
	คู่มือการใช้เครื่องมือวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด	80
	ภาคผนวก ข	
	บทความที่ได้นำเสนอในงานการประชุมวิชาการ	94
	ประวัติผู้วิจัย	104

สารบัญตาราง

ตารางที่

- 5.1 ผลการวัดความหนักกับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้น.....44
- 5.2 ผลการวัดความหนาของภาพหลอดเลือดจริงที่วัดโดยแบบใช้คนเป็นผู้วัดและแบบอัตโนมัติ.....73



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่		
1.1	ภาคตัดขวางของหลอดเลือดแดงโคโรนารีของหนูแรทที่มองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดาซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย.....	3
1.2	ภาคตัดขวางของหลอดเลือดแดงโคโรนารีของหนูแรทในชั้นอินทรามูรอลที่มองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดาซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย.....	3
1.3	ภาคตัดขวางของหลอดเลือดแดงโคโรนารีขนาดเล็กในชั้นอินทรามูรอลของหัวใจห้องล่างซ้ายของคนที่ยังมีชีวิตที่มองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดาซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย	3
2.1	ลักษณะของภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในการศึกษาซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย.....	6
2.2	ลักษณะของแบบการวัดซึ่งมีเครื่องหมายแบ่งเป็น 6 ส่วน	6
2.3	ตัวอย่างภาพหลอดเลือดที่แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่ใช้วัดความหนาของผนังหลอดเลือดโดยใช้แบบการวัดเป็นตัวช่วยกำหนดบริเวณซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย.....	6
2.4	ภาพถ่ายสไลด์ไมโครมิเตอร์ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย	8
2.5	ตัวอย่างภาพหลอดเลือดที่เป็นปัญหาและอุปสรรคต่อการวัดซึ่งภาพมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย.....	9
3.1	ตัวอย่างภาพหลอดเลือดที่ผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวน	13
3.2	ภาพหลอดเลือดและฮิสโทแกรมที่มีลักษณะของฮิสโทแกรมหนาแน่นอยู่ในช่วงความเข้มแสงที่แคบและอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง.....	14
3.3	รูป (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงฮิสโทแกรมของภาพหลอดเลือดก่อนและหลังที่ผ่านการทำฮิสโทแกรมอีควอไลเซชันของภาพหลอดเลือดในรูปที่ 3.2ก 3.2ข 3.2ค และ 3.2ง ตามลำดับ	15
3.4	ลักษณะของฮิสโทแกรมที่ใช้ในการพิจารณาค่าขีดแบ่ง	16
3.5	ตำแหน่งของกราฟที่ใช้เลือกค่าขีดแบ่งของรูปที่ 3.2ก ถึงรูปที่ 3.2ง.....	16
3.6	ภาพลักษณะฐานสองของรูปที่ 3.2ก ถึงรูปที่ 3.2ง	17
3.7	ตำแหน่งของจุดภาพที่ใช้ในการสร้างเส้นองศา.....	18
3.8	ลักษณะเส้นองศา 36 เส้น จาก 360 เส้น.....	18
3.9	ลำดับของทิศที่ใช้ในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบ	19
3.10	ตำแหน่งของ s ซึ่งเป็นจุดภาพเริ่มต้น	20
3.11	กำหนดให้ c มีตำแหน่งเดียวกับ s.....	21
3.12	ลักษณะการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบภายในจุดภาพรอบ ๆ 8 จุดภาพของ c	21
3.13	ตำแหน่งของ c ที่ใช้ในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบครั้งต่อไป.....	21

3.14	ลักษณะของขอบในที่ตัดมาส่วนหนึ่งในภาพหลุดเลือดที่เป็นภาพลักษณะฐานสอง	22
3.15	ตำแหน่งของ s และ c ที่เป็นจุดภาพที่ใช้ในการตามรอยขอบ	23
3.16	จุดภาพในทิศ 0 ที่คิดว่าเป็นขอบด้านในของผนังหลุดเลือดซึ่งทำให้การตามรอยขอบ ผิดพลาดได้.....	23
3.17	ลักษณะการตามรอยขอบที่ไม่รู้จักเนื่องจาก s อยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม	23
3.18	ตำแหน่งของ t ที่ใช้ตรวจสอบ s	24
3.19	ตำแหน่งของ s' ซึ่งเป็นจุดภาพเริ่มต้นใหม่	24
3.20	ตำแหน่งของ s ตำแหน่งสดมภ์ L และตำแหน่งสดมภ์ R	26
3.21	ตำแหน่งของ s' ที่เก็บไว้ในกองซ้อน	27
3.22	เส้นตั้งฉากที่ลากจากจุดที่อยู่บนขอบด้านในไปยังขอบของภาพ.....	27
3.23	จุดภาพ A และจุดภาพ B ที่ใช้ในการหาความชันของเส้นสัมผัสของจุดที่อยู่บนขอบด้านใน....	28
3.24	ลักษณะการพิจารณาเส้นตั้งฉาก	29
3.25	ลักษณะของจุดภาพที่ใช้ในการพิจารณาเลือกส่วนของเส้นตั้งฉาก	30
4.1	ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของการวัดโครงสร้างของผนังหลุดเลือด	31
4.2	ขั้นตอนการทำงานย่อยของการหาเส้นขอบด้านในของผนังหลุดเลือด	32
4.3	เส้นขอบด้านในของผนังหลุดเลือด (แสดงด้วยเส้นสีขาว)	33
4.4	ขั้นตอนการทำงานย่อยของการหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลุดเลือด	34
4.5	ภาพหลุดเลือดที่เปลี่ยนสีขอบในของหลุดเลือด	35
4.6	เส้นขอบด้านนอกของผนังหลุดเลือด (แสดงด้วยเส้นสีดำ)	36
4.7	มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับเส้นสัมผัสของจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกอยู่ในช่วงเบี่ยงเบน ได้บวกลบ 10 องศา.....	37
4.8	ภาพหลุดเลือดที่แบ่งเป็น 6 ส่วนย่อยตามตำแหน่งขององศา.....	37
4.9	ระยะ 1 ของสเกลบนภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ซึ่งมีขนาดย่อยส่วนลงจากภาพถ่าย	38
5.1	ผลการตรวจสอบกับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังสมบูรณ์ซึ่งเป็นภาพ วงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีที่มีความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. ซึ่งมีขนาดย่อยส่วนลง จากภาพจริง	41
5.2	ผลการทดสอบกับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังขาดหายไปซึ่งเป็นภาพ วงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีในแนวตั้งที่มีความหนา 1 ซม. ซึ่งขนาดย่อยส่วนลงจาก ภาพจริง.....	42
5.3	ผลการทดสอบกับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังขาดหายไปซึ่งเป็นภาพ วงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีในแนวตั้งที่มีความหนา 2 ซม. ซึ่งขนาดย่อยส่วนลงจาก	

ก.4	หน้าจอที่ใช้ในการเลือกช่วงคู่จุดที่ต้องการตัดทิ้ง.....	84
ก.5	เมนูย่อยของเมนู Measure	84
ก.6	เมนูย่อยของเมนู View.....	85
ก.7	เมนูย่อยของเมนู Setting	86
ก.8	หน้าจอที่ใช้ในการรับค่าในการเทียบกลับจากผู้ซึ่งเป็นผู้กำหนดเอง	86
ก.9	หน้าจอที่ใช้ในการเลือกจำนวนคู่จุดในการวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัด	87
ก.10	หน้าจอที่ใช้แสดงผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด	88
ก.11	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแถบแสดงสถานะ	89
ก.12	ข้อความเตือนให้ผู้ใช้นำค่านวนค่าในการเทียบกลับก่อนที่จะทำการวัด.....	89
ก.13	หน้าจอที่ให้ผู้ผู้ใช้เปิดภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์	90
ก.14	หน้าจอแสดงคำถามเพื่อนำเข้าสู่หน้าจอแสดงฮิสโทแกรม	90
ก.15	หน้าจอแสดงฮิสโทแกรมของภาพหลอดเลือดที่ใช้ในการหาเส้นขอบด้านใน.....	91
ก.16	หน้าจอแสดงคำถามเพื่อนำเข้าสู่หน้าจอแสดงฮิสโทแกรม	91
ก.17	หน้าจอแสดงฮิสโทแกรมของภาพหลอดเลือดที่ใช้ในการหาเส้นขอบด้านนอก	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไหลเวียนเลือดเป็นระบบที่สำคัญยิ่งต่อร่างกาย ในปัจจุบันพบว่าเมื่อใดก็ตามที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของเซลล์ที่บุผนังหลอดเลือดแดง จะมีผลทำให้เกิดการเกาะตัวของไขมันที่ผนังหลอดเลือด แผ่นไขมันนี้เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ขนาดของช่องว่าง (lumen) ที่ให้เลือดไหลผ่านแคบลง ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการไหลของเลือดที่จะไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายลดลง [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่หัวใจ ถ้าเกิดความผิดปกติดังกล่าวนี้ที่หลอดเลือดแดงโคโรนารี (coronary arteries) ซึ่งเป็นหลอดเลือดที่ทำหน้าที่เลี้ยงหัวใจ จะมีผลทำให้อัตราการไหลของเลือดที่ไปเลี้ยงหัวใจลดลง ทำให้หัวใจเกิดภาวะขาดเลือดไปเลี้ยง และอาจนำไปสู่ภาวะหัวใจวายได้ในที่สุด ดังนั้นทางการแพทย์จึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของผนังหลอดเลือดที่หนาขึ้น เพราะเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิต เช่น โรคหัวใจขาดเลือด โรคหลอดเลือดตีตัน เป็นต้น ฉะนั้นในงานวิจัยหลาย ๆ งานจึงได้ศึกษาค้นคว้าและทดลองเพื่อหาตัวยาหรือสมุนไพรที่มีผลต่อการลดความผิดปกติของเซลล์ที่บุผนังหลอดเลือด ซึ่งการทดลองดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบความหนาของผนังหลอดเลือดเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังหลอดเลือด ทำให้ทราบได้ว่าตัวยาหรือสมุนไพรชนิดใดที่มีผลต่อการลดความหนาของผนังหลอดเลือด ในปัจจุบันการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดทำโดยผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้วัดจากภาพถ่ายหลอดเลือดหรือจากภาพหลอดเลือดที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ แต่การใช้คนเป็นผู้วัดจะมีโอกาสทำให้ค่าที่วัดได้ไม่แน่นอนและคลาดเคลื่อนสูง เพราะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น จำนวนจุดที่เลือกมาวัดไม่มากพอ เครื่องมือที่ใช้ในการวัด การคาดคะเนและการตัดสินใจเลือกตำแหน่งการวัดของผู้วัดเอง เป็นต้น

เนื่องจากในปัจจุบัน การประมวลผลภาพดิจิทัลและคอมพิวเตอร์กราฟิกได้เข้ามามีบทบาทต่องานต่าง ๆ เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงการแพทย์และการสาธารณสุข โดยใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการตรวจและวินิจฉัยโรค ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวคิดที่จะนำเทคนิควิธีการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์กราฟิกมาใช้ในการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลเพื่อช่วยในการวัดความหนาของผนังหลอดเลือด ตลอดจนช่วยวัด

โครงสร้างอื่นของผนังหลอดเลือด เพื่อสนับสนุนงานวิจัยทางการแพทย์ และเพื่อให้เกิดความสะดวกในการวัด ทำให้ได้ค่าที่แน่นอนและน่าเชื่อถือในการวัดมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

2. ตัวอย่างภาพดิจิทัลที่ใช้เป็นภาพดังนี้

2.1 ภาพหลอดเลือดในลักษณะภาคตัดขวาง (cross-section) ที่แสดงลักษณะทางพยาธิวิทยาของหลอดเลือดแดงโคโรนารีของหนูแรท (rat) โดยมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา (light microscope) ดังรูปที่ 1.1

2.2 ภาพหลอดเลือดในลักษณะภาคตัดขวางที่แสดงลักษณะทางพยาธิวิทยาของหลอดเลือดแดงโคโรนารีในชั้นอินทราмурอล (intramural coronary arteries) ของหนูแรทโดยมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา ดังรูปที่ 1.2

2.3 ภาพหลอดเลือดในลักษณะภาคตัดขวางที่แสดงลักษณะทางพยาธิวิทยาของหลอดเลือดแดงโคโรนารีขนาดเล็กในชั้นอินทราмурอลของหัวใจห้องล่างซ้าย (small-sized intramural coronary arteries of the left ventricle) ของคนโดยมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา ดังรูปที่ 1.3

3. โครงสร้างของผนังหลอดเลือดที่วัดมีดังนี้

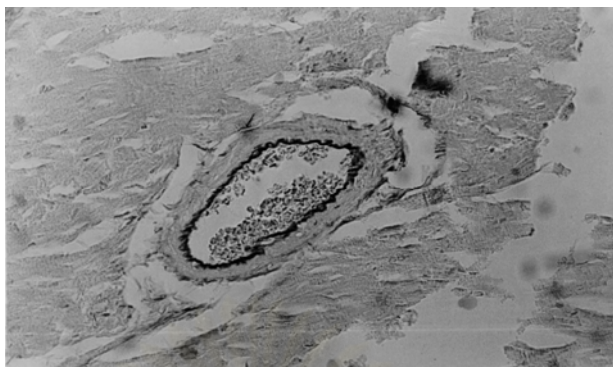
3.1 ความหนาของผนังหลอดเลือด โดยจะหาความหนามากที่สุด ความหนาน้อยสุด และความหนาเฉลี่ย

3.2 ความยาวขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด

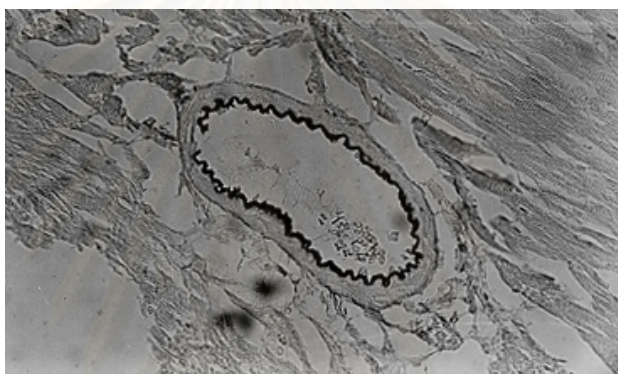
3.3 พื้นที่ของช่องว่างและของผนังหลอดเลือด

4. ลักษณะของโปรแกรมเป็นดังนี้

4.1 แบบอัตโนมัติ (automatic) โดยโปรแกรมนี้จะทำการคัดเลือกจุดที่อยู่บนผนังหลอดเลือดที่เหมาะสมทั้งหมดเพื่อเป็นตัวแทนในการวัด จากนั้นจะคำนวณค่าโครงสร้างของผนังหลอดเลือดให้โดยอัตโนมัติ



รูปที่ 1.1 ภาคตัดขวางของหลอดเลือดแดงโคโรนารีของหนูแรทที่มองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย [2]



รูปที่ 1.2 ภาคตัดขวางของหลอดเลือดแดงโคโรนารีในชั้นอินทราмурอลของหนูแรทที่มองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย [3]



รูปที่ 1.3 ภาคตัดขวางของหลอดเลือดแดงโคโรนารีขนาดเล็กในชั้นอินทราмурอลของหัวใจห้องล่างซ้ายของคน ที่มองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย [4]

4.2 แบบกึ่งอัตโนมัติ (semi-automatic) โปรแกรมนี้จะทำการคัดเลือกคู่จุดที่อยู่บนผนังหลอดเลือดที่เหมาะสมทั้งหมดเพื่อเป็นตัวแทนในการวัดให้โดยอัตโนมัติ รวมทั้งให้ผู้ใช้สามารถตัด เพิ่ม หรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคู่จุดที่การวัดแบบอัตโนมัติได้คัดเลือกมาได้เองอีกด้วย แล้วจึงคำนวณค่าโครงสร้างของผนังหลอดเลือดให้

นอกจากนี้โปรแกรมจะแสดงผลการวัด แสดงตำแหน่งคู่จุดที่ใช้ในการวัด รวมทั้งบันทึกผลการวัดเพื่อสามารถนำผลการวัดจัดทำเป็นสถิติต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและวิเคราะห์ขั้นตอนการวัดความหนาที่ใช้ในปัจจุบัน
2. ศึกษาแนวคิดและวิธีการต่าง ๆ ของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลภาพดิจิทัลและคอมพิวเตอร์กราฟิก
3. ออกแบบและทดสอบเทคนิคทางการประมวลผลภาพดิจิทัลและคอมพิวเตอร์กราฟิก
4. พัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด
5. ทดสอบและประเมินความถูกต้อง
6. แก้ไขข้อผิดพลาด
7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปช่วยในงานวิจัยทางการแพทย์ ทำให้สามารถหาความหนาของผนังหลอดเลือดได้สะดวกขึ้น
2. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลงานวิจัย ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์และการสาธารณสุขต่อไปในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปัญหาและแนวทางแก้ปัญหาการวัดโครงสร้างของ ผนังหลอดเลือดในปัจจุบัน

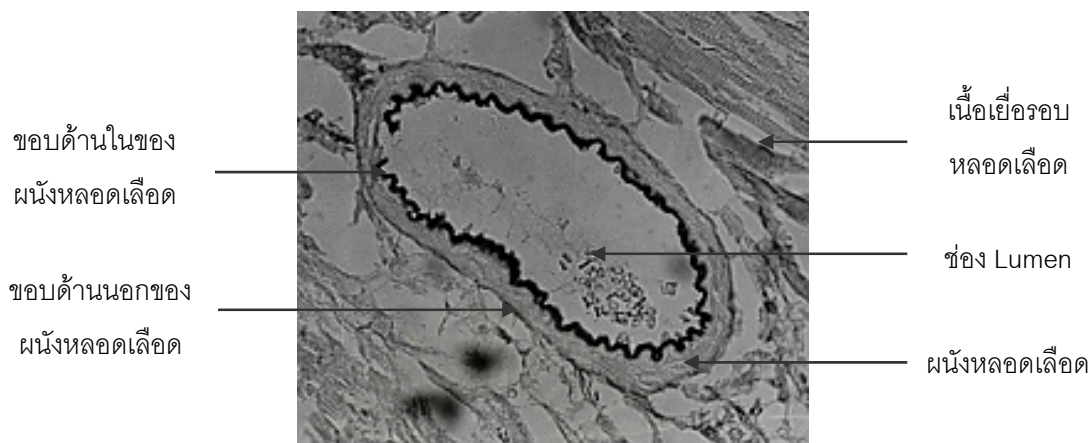
เนื่องจากโครงสร้างหลักของผนังหลอดเลือดที่ทำการวัดเพื่อสังเกตความผิดปกติของหลอดเลือดในปัจจุบันคือ *ความหนาของผนังหลอดเลือด* ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวัดความหนาของผนังหลอดเลือด เพื่อให้เห็นภาพรวมของกระบวนการวัดความหนาของผู้เชี่ยวชาญที่ใช้ในปัจจุบัน จากนั้นจะกล่าวให้เห็นถึงปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดจากขั้นตอนการวัดความหนา รวมทั้งเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาซึ่งจะได้นำเสนอรายละเอียดลักษณะของเครื่องมือวัดที่ได้ออกแบบ และนอกจากความหนาของผนังหลอดเลือดยังมีโครงสร้างอื่นของผนังหลอดเลือดที่สามารถวัดได้อีกด้วย

2.1 ขั้นตอนการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดที่ใช้ในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาขั้นตอนการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันที่ห้องปฏิบัติการ Microcirculation ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การวัดความหนาของผนังหลอดเลือดทำโดยผู้เชี่ยวชาญ* วัดจากภาพถ่ายของหลอดเลือดหรือจากภาพหลอดเลือดที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ที่ได้กล่าวมาแล้ว ภาพหลอดเลือดที่ใช้ในการศึกษาเป็นภาพหลอดเลือดแดงโคโรนารีในลักษณะภาคตัดขวางที่มองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา ซึ่งในภาพจะมีส่วนที่เป็นเนื้อเยื่ออยู่บริเวณรอบนอกของหลอดเลือด และมีส่วนที่เป็นหลอดเลือดซึ่งประกอบด้วยขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด เนื้อเยื่อที่อยู่ตั้งแต่ขอบด้านในและขอบด้านนอกของหลอดเลือดคือ “ผนังหลอดเลือด” และช่องว่างที่ให้เลือดไหลผ่านซึ่งเรียกว่า Lumen ดังแสดงในรูปที่ 2.1

การวัดความหนาที่ทำกันในห้องปฏิบัติการแห่งนี้ ทำโดยผู้เชี่ยวชาญกำหนดจุดที่จะใช้วัดความหนาจำนวน 6 จุด โดยใช้ *แบบการวัด* ซึ่งมีเครื่องหมายแบ่งเป็น 6 ส่วนดังรูปที่ 2.2 เป็นตัวช่วยในการกำหนดจุด

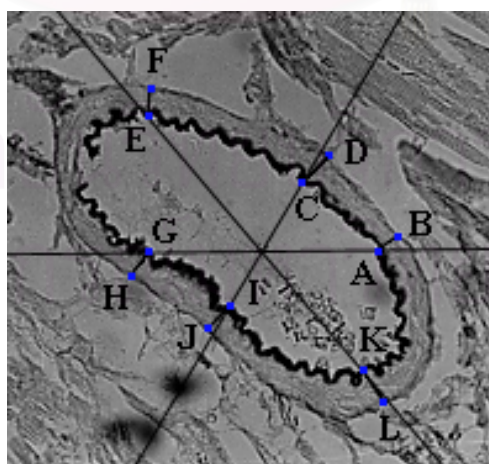
* ในงานวิจัยนี้ผู้เชี่ยวชาญหมายถึงผู้วิจัยที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ Microcirculation



รูปที่ 2.1 ลักษณะของภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในการศึกษาซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย [3]



รูปที่ 2.2 ลักษณะของแบบการวัดซึ่งมีเครื่องหมายแบ่งเป็น 6 ส่วน



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างภาพหลอดเลือดที่แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่ใช้วัดความหนาของผนังหลอดเลือดโดยใช้แบบการวัดเป็นตัวช่วยกำหนดบริเวณซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย [3]

จุด เพื่อให้มีการวัดค่ากระจายทั่วหลอดเลือด รูปที่ 2.3 แสดงภาพหลอดเลือดที่มีแบบการวัดและคู่จุดที่เลือก มาวัดความหนาของผนังหลอดเลือด สำหรับขั้นตอนการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดคู่จุดบนผนังหลอดเลือด

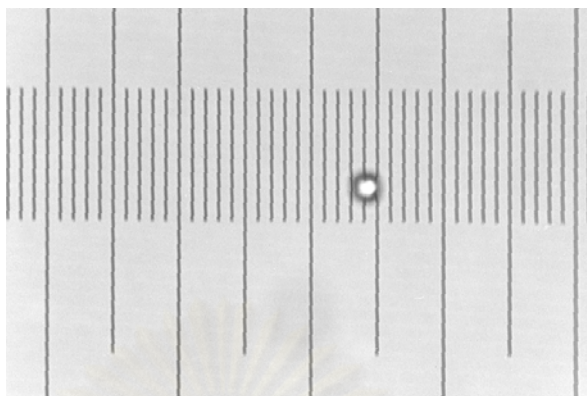
- การกำหนดตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือด โดยการวางแผนการวัดลงบนภาพเพื่อกำหนดตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือดเป็นตำแหน่งอ้างอิงในการวัด ผู้วัดอาจใช้ตำแหน่งอ้างอิงการวัดดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.3 นั่นคือ ตำแหน่ง A C E G I และ K ที่ขอบด้านในของผนังหลอดเลือดเป็นตำแหน่งอ้างอิงการวัด

- การกำหนดตำแหน่งคู่จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด หาตำแหน่งของคู่จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดที่เหมาะสมกับจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือด นั่นคือควรมีเส้นตั้งฉากกับจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือดและคู่จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดร่วมกัน ตัวอย่างเช่นตำแหน่ง A ซึ่งเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือด จะมีตำแหน่งคู่จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดที่เหมาะสมคือ ตำแหน่ง B เป็นต้น

- ในกรณีที่มีตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือคู่จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกตรงกับตำแหน่งที่ไม่สามารถทำการวัดได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากขอบของผนังหลอดเลือดไม่ชัดเจนหรือขาดหายไป ผู้วัดก็จำเป็นต้องหลีกเลี่ยงบริเวณดังกล่าว โดยการหาตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือดและคู่จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดใหม่ โดยการหมุนแบบการวัด ซึ่งจะมีผลทำให้ตำแหน่งอ้างอิงเดิมทุกตำแหน่งถูกเคลื่อนย้ายไป แต่เมื่อทำการหมุนแบบการวัดแล้วยังไม่มีตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือคู่จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกที่สามารถทำการวัดได้ ตำแหน่งคู่จุดดังกล่าวก็จะไม่ถูกนำมาใช้ในการวัด ทำให้จำนวนคู่จุดที่ใช้ในการวัดมีน้อยกว่าหาคู่จุด หรือให้การเลือกตำแหน่งคู่จุดทั้งหมดคู่จุดอยู่ในบริเวณที่มีความชัดเจนของขอบของผนังหลอดเลือดแทน

ขั้นตอนที่ 2 การวัดค่า

การวัดความหนาของผนังหลอดเลือดในขั้นตอนนี้ ทำโดยใช้ไม้บรรทัดวัดระยะห่างระหว่างคู่จุดที่ได้กำหนดไว้แล้ว โดยค่าที่วัดได้จะต้องทำการเทียบกลับเป็นหน่วยไมโครเมตร (μm) ซึ่งในการเทียบกลับนี้จะใช้ภาพไมโครมิเตอร์ซึ่งเป็นภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดของหน่วยวัดเป็นไมโครเมตรที่มองเห็นผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดาที่มีกำลังขยายเท่ากับกำลังขยายของภาพถ่ายหลอดเลือด ดังรูปที่ 2.4 จากนั้นคำนวณความหนาเฉลี่ยจากค่าที่วัด



รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายสไลด์ไมโครมิเตอร์ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย

2.2 ปัญหาและอุปสรรคในการวัดความหนาของผนังหลอดเลือด

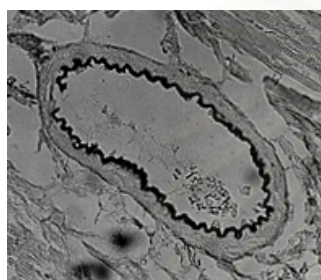
จากการศึกษาและสำรวจขั้นตอนการวัดความหนาที่ใช้ในปัจจุบัน พบว่าวิธีที่ใช้ในปัจจุบันมีโอกาสทำให้ผลการวัดความหนามีความแปรปรวนและคลาดเคลื่อนสูง ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุหลายประการ ดังนี้

1. **ลักษณะของหลอดเลือดที่แปรปรวนหลากหลายมาก** อาทิเช่น มีขอบในและขอบนอกของผนังหลอดเลือดที่ชัดเจน แต่ขอบในของผนังหลอดเลือดค่อนข้างหักมุมมากและมีส่วนที่ขาดหายไป เนื่องจากความผิดพลาดจากการตัดหลอดเลือดในการทดลอง ผิวผนังหลอดเลือดค่อนข้างเรียบ มีไขมันภายในช่องว่าง ตัวอย่างของหลอดเลือดประเภทนี้แสดงดังรูป 2.5ก บางหลอดเลือดจะมีขอบในที่ชัดเจนกว่าขอบนอกของผนังหลอดเลือด และขอบในของผนังหลอดเลือดไม่หักมุมมาก ดังรูปที่ 2.5ข ส่วนรูปที่ 2.5ค ถึงแม้ว่าจะมีขอบในและขอบนอกของผนังหลอดเลือดที่ชัดเจนมาก แต่มีผิวของผนังหลอดเลือดไม่เรียบ ทำให้ดูเหมือนมีขอบผนังหลอดเลือดหลายวงซ้อนกันอยู่ในรูปที่ 2.5ก จะมีลักษณะของขอบในของผนังหลอดเลือดที่หักมุมมากกว่ารูปที่ 2.5ก และมีขอบในที่ชัดเจนกว่าขอบนอกของผนังหลอดเลือด สำหรับรูปที่ 2.5จ มีขอบในที่ชัดเจนกว่าขอบนอก ขอบในไม่หักและมีลักษณะของขอบที่สมบูรณ์ และรูปที่ 2.5ฉ จะมีลักษณะของขอบในที่ค่อนข้างชัดเจนและสมบูรณ์ไม่ขาดหายไป แต่จะมีลักษณะขอบนอกที่ไม่ชัดเจน เป็นต้น

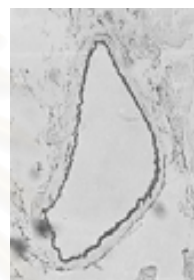
2. **ลักษณะของภาพหลอดเลือดไม่ชัดเจน** เนื่องจากการย้อมสีที่ไม่สม่ำเสมอจากการเตรียมสไลด์ในห้องปฏิบัติการ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.5ก 2.5ข และ 2.5จ รอยเปื้อนสีดำเกิดจากความผิดพลาดในการย้อมสีหลอดเลือด นอกจากนี้ภาพที่นำมาใช้ต้องผ่านหลายสื่อทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจากการพิมพ์ออกทางเครื่องพิมพ์ หรือจากการล้างอัดขยายรูป ตัวอย่างภาพประเภทนี้ได้แก่ รูปที่ 2.5ฉ และจากรูป 2.5ก ถึงรูปที่ 2.5ฉ จะเห็นได้ว่าแต่ละภาพมีความเปรียบต่าง (contrast) ที่แตกต่างกัน ซึ่งบางภาพมีความเปรียบต่างมาก ได้แก่ รูปที่ 2.5ก และรูปที่ 2.5จ ส่วนรูปที่ 2.5ข 2.5ค 2.5ง และ 2.5ฉ จะมีความเปรียบต่างน้อย

3. **ปัญหาและความยุ่งยากของคนที่วัดด้วยมือ** เนื่องจากลักษณะของหลอดเลือดและภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแตกต่างและแปรปรวนสูง ดังที่ได้กล่าวข้างต้น ทำให้การกำหนดตำแหน่งจุดที่ใช้ในการวัดทำได้ยากและต้องใช้เวลาาน ความยุ่งยากอีกประการหนึ่ง คือ การวัดค่าความหนาด้วยมือจากรูปภาพต้องมีการนำค่าที่ได้ไปคำนวณต่อ ซึ่งการทำงานหลายขั้นตอนหลาย ๆ ครั้ง ทำให้เกิดความเหนื่อยล้าและเกิดความสะเพร่าได้ ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการวัดได้ง่าย

4. **เครื่องมือที่ใช้วัดยังไม่มีมาตรฐาน** เพราะใช้ไม้บรรทัดธรรมดาความละเอียดของสเกลไม่เพียงพอ และไม่บรรทัดที่ใช้ในแต่ละครั้งก็อาจเป็นคนละอัน ทำให้การวัดคลาดเคลื่อนได้ง่าย



(ก) ขอบในและขอบนอกชัดเจน [3]



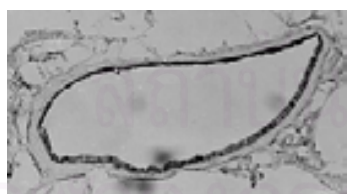
(ข) ขอบในชัดเจนกว่าขอบนอก [3]



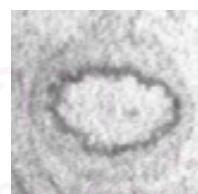
(ค) ผิวผนังหลอดเลือดไม่เรียบ [4]



(ง) ขอบในหยักมาก



(จ) ขอบในไม่หยักและมีการข้อมสีที่ไม่สม่ำเสมอ [3]



(ฉ) ขอบในชัดเจนและมีสัญญาณรบกวนจากการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างภาพหลอดเลือดที่เป็นปัญหาและอุปสรรคต่อการวัด ซึ่งภาพมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย

2.3 แนวทางแก้ปัญหา

จากปัญหาและอุปสรรคที่ได้กล่าวมาแล้ว งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลมาช่วยลดความซ้ำซากและลดเวลาทำงานจากการปฏิบัติงานที่ซ้ำ ๆ ที่ใช้คนวัดความหนาของผนังหลอดเลือดออกมาเป็นการใช้คอมพิวเตอร์ โดยจะใช้การประมวลผลภาพดิจิทัลและคอมพิวเตอร์กราฟิกมาช่วยในการกำหนดตำแหน่งคู้จุดในการวัด รวมทั้งการวัดโครงสร้างอื่น ๆ ของผนังหลอดเลือดด้วย ทำให้ผู้วัดเกิดความสะดวกในการวัดมากขึ้นและมีความแม่นยำในการวัดสูง แต่จากลักษณะของหลอดเลือดที่มีความแปรปรวนหลากหลายมาก และภาพหลอดเลือดที่นำมาศึกษาไม่ชัดเจนจึงทำให้เครื่องมือนี้ไม่สามารถให้ผลการวัดที่ดีกับทุกภาพได้ ดังนั้นเพื่อให้เครื่องมือวัดด้วยการประมวลผลภาพนี้มีความคล่องตัว จึงมีแนวคิดให้มีลักษณะที่ให้ผู้วัดมีส่วนในการคัดเลือกคู้จุดที่จะใช้งานได้อีกชั้นหนึ่งด้วย เครื่องมือนี้จึงถูกออกแบบไว้เป็น 3 ลักษณะคือ แบบอัตโนมัติ (automatic) แบบกึ่งอัตโนมัติ (semi-automatic) และแบบกำหนดเองโดยผู้วัด (manual) และในงานวิจัยนี้ได้เน้นในเรื่องของการหาความหนาของผนังหลอดเลือดเป็นสำคัญ เพราะเป็นโครงสร้างหลักที่ผู้วิจัยทางสรีรวิทยาใช้ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของหลอดเลือด ส่วนโครงสร้างอื่นของผนังหลอดเลือดเป็นเพียงส่วนประกอบที่สามารถนำมาใช้เพื่อช่วยในการพิจารณาความผิดปกติของหลอดเลือดได้ ฉะนั้นรายละเอียดที่นำเสนอในหัวข้อนี้จึงมีด้วยกัน 2 ส่วนคือ ลักษณะของเครื่องมือวัดที่ได้ออกแบบไว้ และโครงสร้างของผนังหลอดเลือดที่วัด

2.3.1 ลักษณะของเครื่องมือวัด

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องมือใน 3 ลักษณะด้วยกันคือ แบบอัตโนมัติ แบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบกำหนดเองโดยผู้วัด โดยแต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

1. **เครื่องมือวัดแบบอัตโนมัติ** เครื่องมือวัดแบบนี้จะค้นหาบริเวณที่ควรจะวัด จากนั้นจะคัดเลือกคู้จุดการวัดที่เหมาะสมทั้งหมดอย่างอัตโนมัติ แล้ววัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดและค่าสถิติให้ได้แก่ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและความแปรปรวนของความหนาของผนังหลอดเลือด
2. **เครื่องมือวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ** มีลักษณะคล้ายกับเครื่องมือวัดแบบอัตโนมัติ แต่จะมีคำสั่งให้ผู้ใช้เครื่องมือเป็นผู้มีส่วนในการตัดสินใจเลือกคู้จุดการวัดที่เครื่องมือเลือกมาจากการทำงานแบบอัตโนมัติว่ามีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวแทนในการวัดหรือไม่ โดยสามารถที่จะตัดทิ้งคู้จุดการวัดที่ไม่เหมาะสม หรือเพิ่มคู้จุดการวัดเพื่อให้ผลการวัดมีความถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือที่ขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดให้ถูกต้องได้ ทั้งนี้เนื่องจากภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความ

หลากหลายและแปรปรวนมาก ทำให้การใช้เครื่องมือวัดแบบอัตโนมัติไม่อาจให้ผลดีได้กับทุกภาพ จากนั้นจะวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดและคำนวณค่าสถิติให้โดยอัตโนมัติ

3. **เครื่องมือวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัด** เพื่อเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่ทำให้ผู้ใช้สามารถกำหนดจุดที่จะวัดเองทั้งหมด เพียงแต่เครื่องมือนี้จะช่วยในเรื่องของการแสดงผลของจุดวัดการวัดที่ผู้ใช้เลือก และการคำนวณหาค่าความหนาเฉลี่ยและค่าสถิติให้เท่านั้น

2.3.2 โครงสร้างของผนังหลอดเลือดที่วัด

จากลักษณะของภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในงานวิจัยซึ่งได้เสนอไว้ข้างต้น ทำให้สามารถวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดดังนี้ได้

1. **ความหนาของผนังหลอดเลือด** ซึ่งได้จากการวัดความหนาของแต่ละจุดที่เครื่องมือนี้คัดเลือกมา แล้วจึงคำนวณหาค่าความหนาเฉลี่ย พร้อมทั้งหาความหนาที่มากที่สุด และความหนาที่น้อยที่สุด
2. **ความยาวขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด** โดยที่ความยาวขอบด้านในคำนวณได้จากการหาความยาวของเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด และในทำนองเดียวกันความยาวขอบด้านนอกนั้นได้จากการหาความยาวของเส้นด้านนอกของผนังหลอดเลือด
3. **พื้นที่ของช่องว่างและของผนังหลอดเลือด** พื้นที่ของช่องว่างได้จากการนับจำนวนจุดภาพที่อยู่ภายในช่องว่างที่ให้เลือดไหลผ่าน ส่วนพื้นที่ของผนังหลอดเลือดก็คือการนับจำนวนจุดภาพของผนังหลอดเลือด ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ระหว่างขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด และนับจำนวนจุดภาพที่อยู่บนขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดด้วย

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้วิธีการประมวลผลภาพและ คอมพิวเตอร์กราฟิกในงานวิจัย

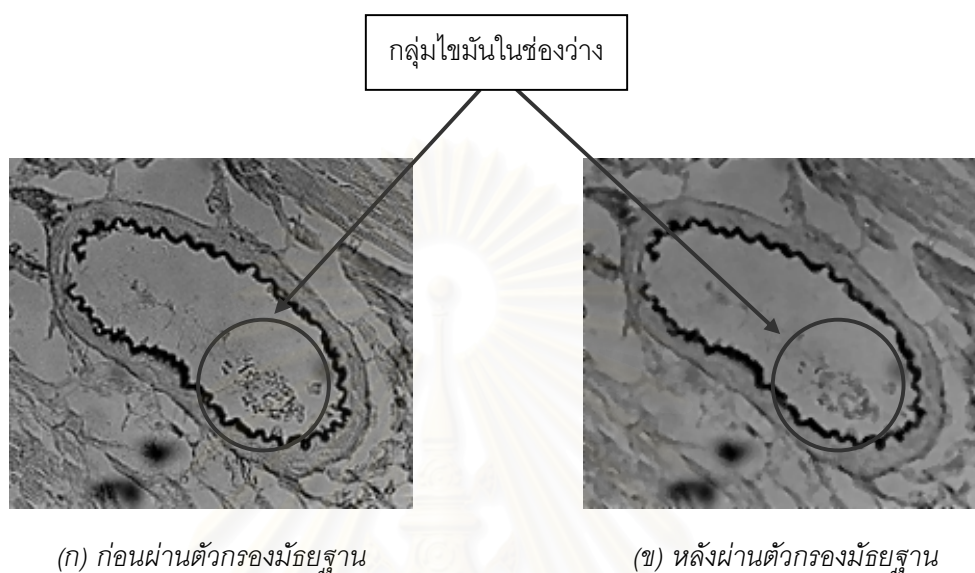
งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคทางการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์กราฟิกมาใช้ในการวิเคราะห์ภาพเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด และในงานวิจัยนี้พบว่า เทคนิคการประมวลผลภาพบางเทคนิคไม่สามารถนำมาใช้งานโดยตรงได้ แต่ต้องมีการประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับลักษณะของภาพด้วย ดังนั้นในบทนี้จึงจะกล่าวถึงรายละเอียดของแต่ละเทคนิคที่ใช้งาน ปัญหาที่พบ และแนวทางการประยุกต์ขั้นตอนวิธีเพื่อให้ใช้งานได้ผลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.1 การกำจัดสัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนในงานวิจัยนี้ได้แก่ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการได้มาของภาพที่ต้องผ่านหลายสื่อหลายกระบวนการ เช่น การล้างอัดขยายภาพ การสแกนภาพ เป็นต้น และสัญญาณรบกวนที่เป็นกลุ่มไขมันบริเวณช่องว่าง สัญญาณรบกวนเหล่านี้จะมีผลในการหาจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือด ในงานวิจัยนี้จึงกำจัดสัญญาณรบกวนต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อช่วยให้การหาจุดที่อยู่บนขอบด้านในถูกต้องมากขึ้น โดยได้เลือกใช้ตัวกรองมัธยฐาน (median filter) [5] มาช่วยในการกำจัดสัญญาณรบกวน ภาพที่ผ่านตัวกรองนี้จะมีลักษณะของภาพที่มีความเรียบกลมกลืนกัน ข้อดีของตัวกรองชนิดนี้คือ ยังทำให้ขอบของหลอดเลือดที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในภาพยังคงชัดเจนอยู่ ฉะนั้นจากรูปที่ 3.1ก และ 3.1ข เป็นภาพหลอดเลือดก่อนและหลังผ่านตัวกรองมัธยฐานตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าเมื่อภาพผ่านตัวกรองมัธยฐานแล้วเนื้อเยื่อบริเวณช่องว่างกลมกลืนกัน และยังทำให้กลุ่มไขมันบริเวณช่องว่างกลมกลืนกันมากขึ้นด้วย ส่วนขอบของหลอดเลือดนั้นก็ยังคงชัดเจนอยู่

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบภาพลักษณะฐานสอง (binary image) ของภาพหลอดเลือดในรูปที่ 3.1ก และ 3.1ข (ซึ่งขั้นตอนการทำเป็นภาพลักษณะฐานสองนี้จะกล่าวในหัวข้อถัดไป) พบว่า จุดภาพที่เกิดจากสัญญาณรบกวนและกลุ่มไขมันขนาดเล็กจะถูกกำจัดไปในภาพหลอดเลือดในรูปที่ 3.1ข ซึ่งจะช่วยในการหาจุดที่อยู่บนขอบด้านในที่มีความถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้ภาพหลอดเลือดที่ผ่านตัวกรองมัธยฐานนี้ยังช่วยใน

ขั้นตอนการกำหนดกลุ่ม (labeling) ให้กับจุดภาพ กล่าวคือ ทำให้การกำหนดกลุ่มทำได้เร็วขึ้นเพราะไม่ต้องกำหนดกลุ่มให้กับจุดภาพที่เกิดจากสัญญาณรบกวนเหล่านี้



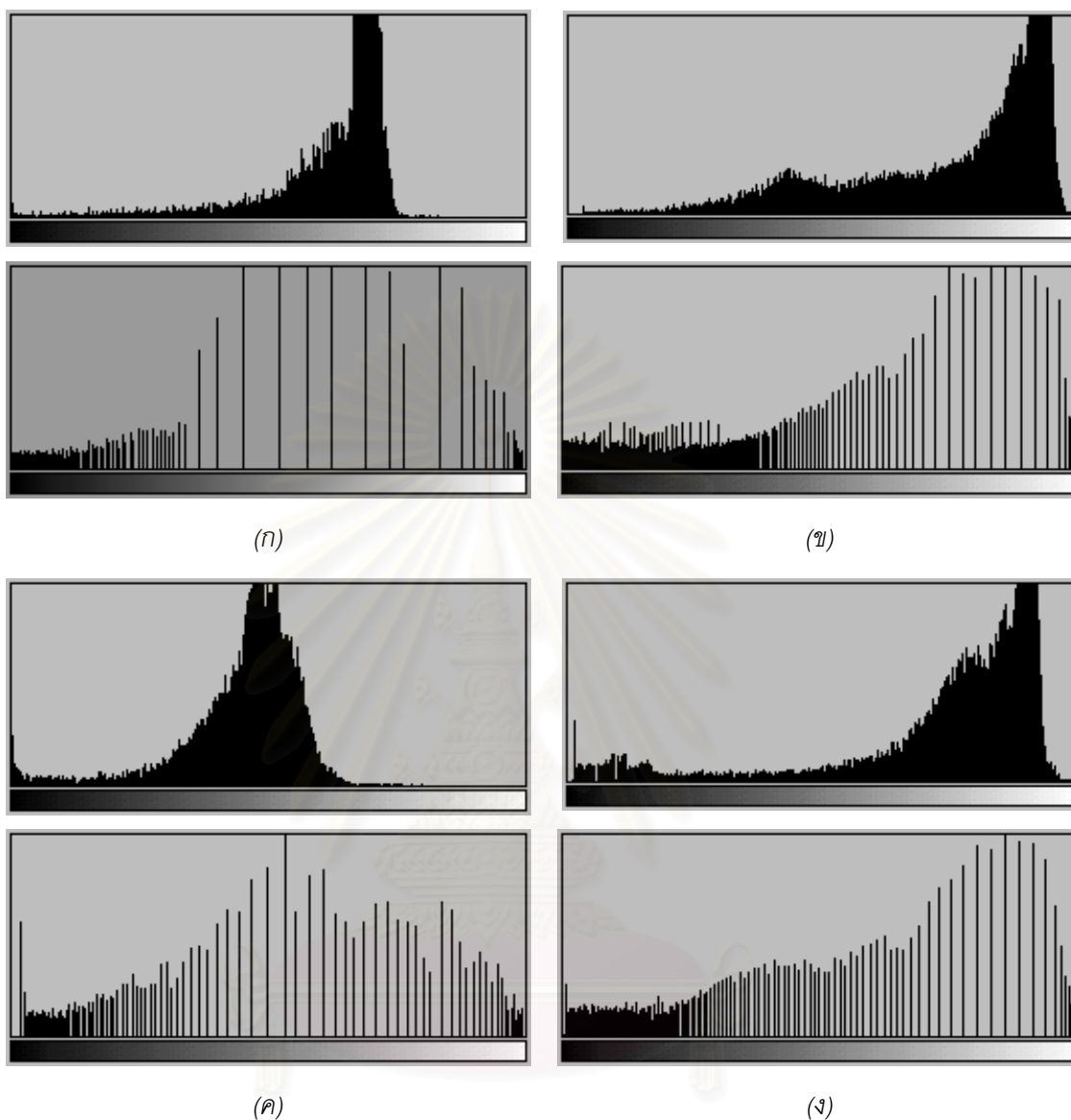
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างภาพหลอดเลือดที่ผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวน

3.2 การทำเป็นภาพลักษณะฐานสอง

เนื่องจากภาพหลอดเลือดที่นำมาศึกษามีความแปรปรวนหลากหลายมาก ดังนั้นภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในขั้นตอนการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดนี้จึงต้องแปลงเป็นภาพลักษณะฐานสอง เพื่อให้ภาพหลอดเลือดอยู่ในมาตรฐานเดียวกัน ซึ่งขั้นตอนการทำเป็นภาพลักษณะฐานสองนั้นมีด้วยกัน 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการทำฮิสโทแกรมอีควอลไลเซชัน (histogram equalization) [6] จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนของการหาค่าขีดแบ่ง (threshold value) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ขั้นตอนการทำฮิสโทแกรมอีควอลไลเซชัน

เนื่องจากภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีความเปรียบต่าง (contrast) น้อยซึ่งมีลักษณะของฮิสโทแกรมหนาแน่นอยู่ในช่วงที่แคบและหนาแน่นอยู่ในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง นอกจากนี้ลักษณะของฮิสโทแกรมของแต่ละภาพยังมีความแตกต่างกันอีกด้วยดังตัวอย่างในรูปที่ 3.2 จึงเป็นการยากที่จะหาค่าขีดแบ่งที่สามารถใช้กับทุกภาพได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ฮิสโทแกรมอีควอลไลเซชันมาปรับปรุงภาพที่มีความเปรียบต่างน้อยให้มีความเปรียบต่างมากขึ้น โดยทำให้ค่าระดับเทาภายในภาพมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ

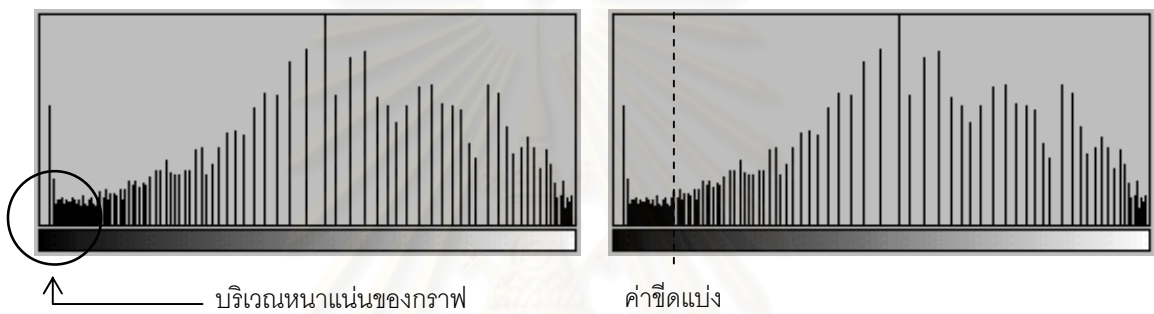


รูปที่ 3.3 รูป (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงฮิสโทแกรมของภาพหลอดเลือดก่อนและหลังที่ผ่านการทำฮิสโทแกรมอีควอไลเซชันของภาพหลอดเลือดในรูปที่ 3.2ก 3.2ข 3.2ค และ 3.2ง ตามลำดับ

3.2.2 ขั้นตอนการหาค่าขีดแบ่ง

เมื่อพิจารณาฮิสโทแกรมของภาพหลอดเลือดที่ผ่านการทำฮิสโทแกรมอีควอไลเซชันของภาพแต่ละภาพแล้ว จะสังเกตเห็นว่ามีฮิสโทแกรมที่คล้ายกัน กล่าวคือมีค่าระดับเทาติดต่อกันหนาแน่นในบริเวณที่มีค่าระดับเทาต่ำดังรูปที่ 3.4ก ซึ่งในการกำหนดบริเวณหนาแน่นดังกล่าวได้จากการหากลุ่มของแท่งกราฟที่อยู่ติดกันโดยไม่มีช่องว่างคั่นระหว่างแท่งกราฟที่มีจำนวนของแท่งกราฟมากที่สุด จากนั้นเลือกแท่งกราฟที่มีค่าระดับเทาต่ำสุดจนถึงแท่งกราฟสุดท้ายของกลุ่มที่มีความหนาแน่นของแท่งกราฟมากที่สุดเป็นบริเวณหนาแน่น

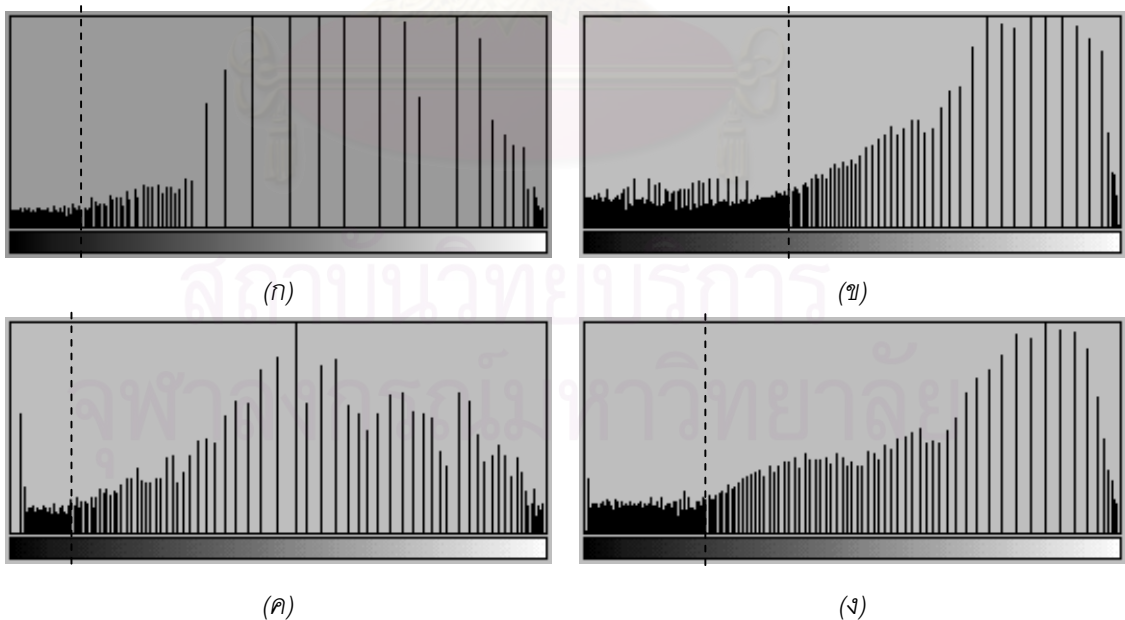
ดังกล่าว จากการศึกษาลักษณะภาพของหลอดเลือดพบว่าบริเวณที่เป็นขอบในของหลอดเลือดจะมีค่าระดับเทาต่ำและมีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่กันเป็นกลุ่มหนาแน่น และจากการทดลองโดยนำค่าระดับเทาในบริเวณหนาแน่นดังกล่าวมาคำนวณหาค่าระดับเทาเดิมในภาพต้นฉบับเพื่อทดสอบสมมติฐานที่ว่า บริเวณหนาแน่นดังกล่าวนี้น่าจะมีค่าระดับเทาของขอบใน พบว่าบริเวณหนาแน่นของช่วงกราฟนั้นจะมีค่าระดับเทาของขอบในของหลอดเลือดอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของภาพหลอดเลือด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกค่าขีดแบ่งที่ปลายบริเวณหนาแน่นดังกล่าว และสามารถแสดงตำแหน่งการเลือกค่าขีดแบ่งดังรูปที่ 3.4ข ส่วนรูปที่ 3.5 นั้นแสดงตำแหน่งการเลือกค่าขีดแบ่งของรูปที่ 3.2ก ถึงรูปที่ 3.2ง จากนั้นก็แปลงเป็นภาพลักษณะฐานสองเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป ดังตัวอย่างรูปที่ 3.6



(ก) บริเวณหนาแน่นของกราฟ

(ข) ตำแหน่งของกราฟที่ใช้เลือกค่าขีดแบ่ง

รูปที่ 3.4 ลักษณะของฮิสโทแกรมที่ใช้ในการพิจารณาค่าขีดแบ่ง



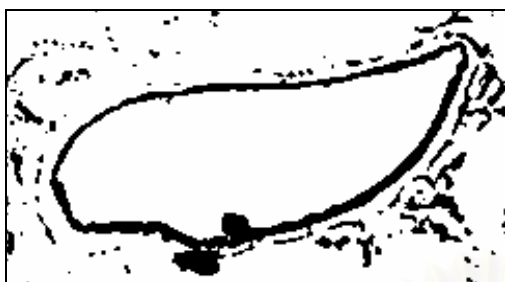
(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

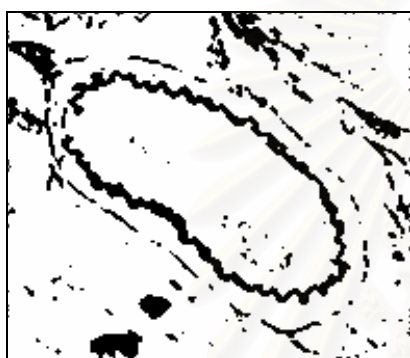
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งของกราฟที่ใช้เลือกค่าขีดแบ่งของรูปที่ 3.2ก ถึงรูปที่ 3.2ง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.6 ภาพลักษณะฐานสองของรูปที่ 3.2ก ถึงรูปที่ 3.2ง

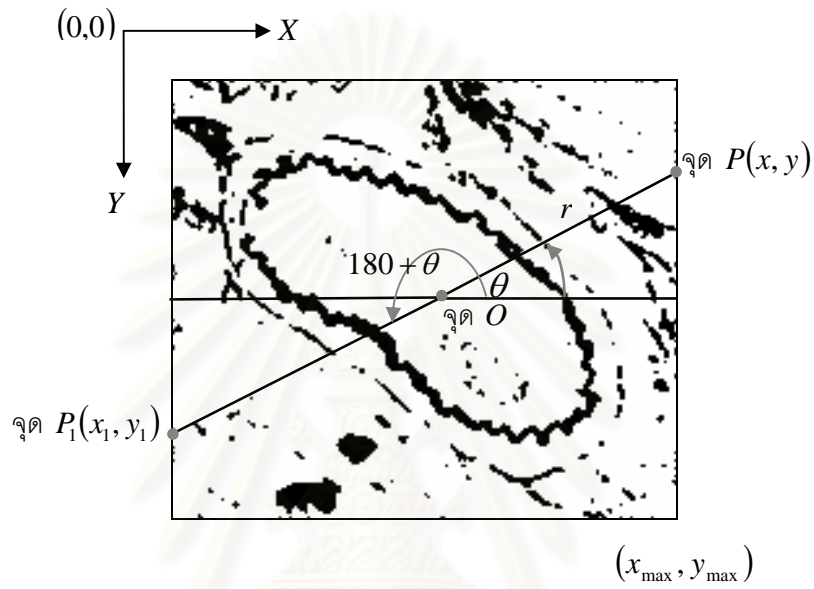
3.3 การสร้างเส้นองศา

เส้นองศา หมายถึงเส้นตรงที่ลากจากจุดศูนย์กลางของภาพไปยังขอบของภาพจำนวน 360 เส้น แต่ละเส้นห่างกัน 1 องศา เพื่อช่วยในการหาบริเวณขอบด้านในของหลอดเลือด ในการสร้างเส้นองศาแต่ละเส้นนั้น จะใช้วิธีการสร้างเส้นตรงระหว่างจุดภาพ 2 จุดภาพ โดยที่จุดภาพหนึ่งคือจุดศูนย์กลางของภาพ และอีกจุดภาพหนึ่งคือจุดภาพที่อยู่บนขอบของภาพ ดังนั้นจากรูปที่ 3.7 ให้จุด O เป็นจุดศูนย์กลางของภาพและสามารถหาจุด P ที่อยู่บนขอบภาพได้ ซึ่งบนขอบภาพดังกล่าว ค่า x จะเท่ากับ x_{\max} หรือเท่ากับความกว้างของภาพฉะนั้นค่า y สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 แต่ถ้าค่า y ที่ได้อยู่นอกช่วง $0 \leq y \leq y_{\max}$ จะเป็นการหาค่า x แทนซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2 โดยที่ทราบค่า y นั้นคือเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ขอบด้านบนของภาพ

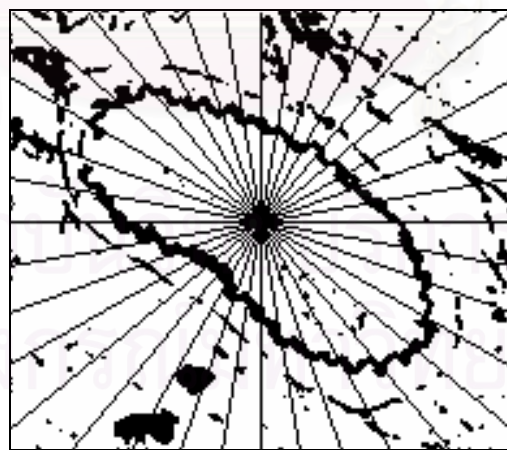
นอกจากนี้เมื่อทราบตำแหน่งของจุด P ก็จะทำให้ทราบตำแหน่งของจุด P_1 ที่อยู่บนขอบอีกด้านหนึ่งด้วย ซึ่งจะทำให้ได้เส้นองศาที่ $180 + \theta$ ดังนั้นจะได้เส้นองศาที่มีลักษณะในรูปที่ 3.8

$$y = r \sin \theta \quad \text{โดยที่} \quad r = \frac{x}{\cos \theta} \quad \dots (1)$$

$$x = r \cos \theta \quad \text{โดยที่} \quad r = \frac{y}{\sin \theta} \quad \dots (2)$$



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของจุดภาพที่ใช้ในการสร้างเส้นองศา



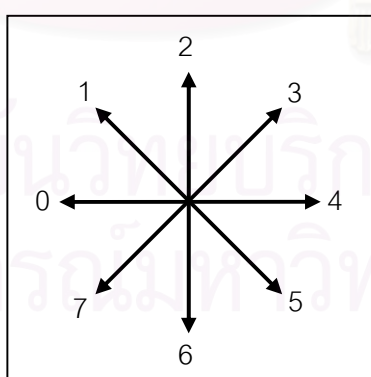
รูปที่ 3.8 ลักษณะเส้นองศา 36 เส้น จาก 360 เส้น

3.4 การหาเส้นขอบของผนังหลอดเลือด

เส้นขอบของผนังหลอดเลือดประกอบด้วยเส้นขอบด้านในและเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด เพื่อใช้ในการหาความยาวขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด ภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในการหาเส้นขอบนั้นต้องเป็นภาพลักษณะฐานสอง จากลักษณะของภาพลักษณะฐานสองที่ได้พบว่าลักษณะของขอบด้านในมีความต่อเนื่อง ดังนั้นการหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดสามารถใช้วิธีการตามรอยขอบ (edge tracing) มาใช้ในการหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดได้ แต่ลักษณะของขอบนอกไม่มีความต่อเนื่องเหมือนขอบในจึงไม่สามารถใช้วิธีการตามรอยขอบในการหาเส้นขอบด้านนอกได้ ดังนั้นเส้นขอบด้านนอกจึงได้จากการเชื่อมจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกที่หาได้ทุกจุดด้วยเส้นตรง

3.4.1 วิธีการตามรอยขอบ

เทคนิควิธีการตามรอยขอบที่นำมาใช้นี้ได้ดัดแปลงมาจากขั้นตอนวิธีการตามรอยขอบที่ R. Mukundan ได้นำเสนอไว้ในปี ค.ศ. 1999 [8] เพื่อหาขอบเขตของบริเวณที่สนใจ ซึ่งแสดงโดยเส้นแสดงรูปร่าง (contour) ขั้นตอนวิธีการตามรอยขอบของ R. Mukundan นี้จะเริ่มต้นจากกำหนดจุดภาพเริ่มต้น (starting point) ซึ่งเป็นจุดภาพที่อยู่บนขอบของบริเวณที่สนใจ และจากจุดภาพเริ่มต้นนี้ทำการหาจุดภาพที่เป็นขอบจากจุดภาพรอบข้าง 8 จุด ทิศในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบนี้จะมีลำดับการค้นหาในทิศตามเข็มนาฬิกา ดังรูปที่ 3.9 แล้วให้จุดภาพใหม่ที่ได้เป็นจุดที่ใช้ในการตามรอยขอบต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งกลับมาถึงจุดภาพเริ่มต้นอีกครั้ง ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้



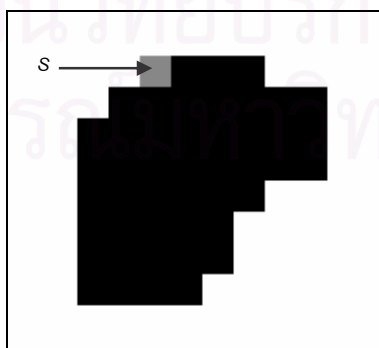
รูปที่ 3.9 ลำดับของทิศที่ใช้ในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบ

นิยามสัญลักษณ์ที่ใช้

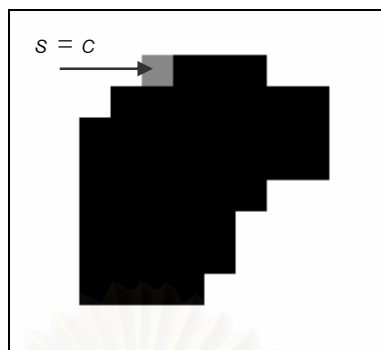
- s เป็นจุดภาพเริ่มต้น
- c เป็นจุดภาพล่าสุดที่ได้จากการตามรอยขอบ
- b เป็นทิศเริ่มต้นในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบต่อจากจุดภาพ c
- nbd เป็นเซตที่เก็บทิศ b ซึ่งเท่ากับ $\{6, 0, 0, 2, 2, 4, 4, 6\}$ เช่น nbd ตัวที่ 0 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6 ดังนั้น c จะเริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบต่อไปในทิศ 6 เป็นทิศแรก
- i เป็นทิศที่พบจุดภาพที่เป็นขอบ

ขั้นตอนการตามรอยขอบ

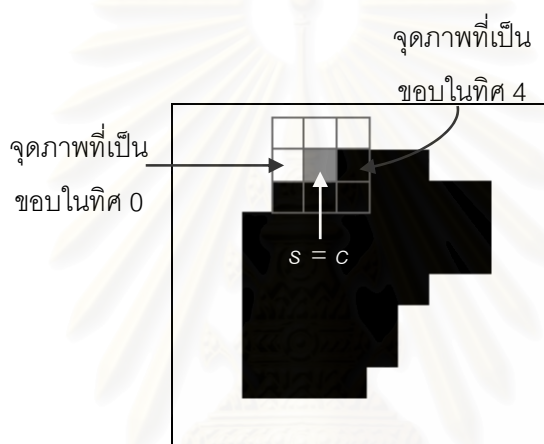
1. หา s ที่เป็นจุดภาพที่อยู่บนขอบของบริเวณที่สนใจ โดยการพิจารณาจากซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง ตัวอย่างดังในรูปที่ 3.10
2. ให้จุดภาพเริ่มต้นเป็นจุดภาพแรกที่ใช้ตามรอยขอบ นั่นคือกำหนด c เท่ากับ s ดังในรูปที่ 3.11
3. กำหนดให้ b เท่ากับทิศ 0 ซึ่งเป็นทิศที่อยู่ทางซ้ายของ s
4. จาก c ให้ค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบต่อไปจากจุดภาพรอบข้างทั้ง 8 จุด โดยให้เริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบในทิศ b เป็นทิศแรก และทำการค้นหาไปเรื่อย ๆ ทีละจุดภาพในทิศตามเข็มนาฬิกาที่มีลำดับการค้นหาดังรูปที่ 3.9 จนกว่าจะพบจุดภาพที่เป็นขอบ และเก็บค่าทิศของจุดภาพใหม่queพบไว้และกำหนดให้เป็น i ดังนั้นจากรูปที่ 3.12 c จะค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบจากจุดภาพรอบข้าง 8 จุดโดยเริ่มต้นค้นหาในทิศ 0 ไปเรื่อย ๆ จนพบจุดภาพทิศ 4 เป็นจุดภาพที่เป็นขอบ ซึ่งจะได้ i เท่ากับ 4
5. เปลี่ยน c เป็นจุดภาพใหม่ที่พบว่าขอบ และหาทิศ b ใหม่จากค่าในเซตของ nbd ตัวที่ $i-1$ ดังนั้น c ในรูปที่ 3.13 ทิศ b ของ c มีค่าเท่ากับค่าในเซต nbd ตัวที่ $i-1 = 4-1 = 3$ ซึ่งเท่ากับค่า 2 ฉะนั้น c จะเริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบต่อไปในทิศ 2 เป็นทิศแรก
6. กลับมาทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 และ 5 จนกระทั่ง c กลับมายัง s อีกครั้ง



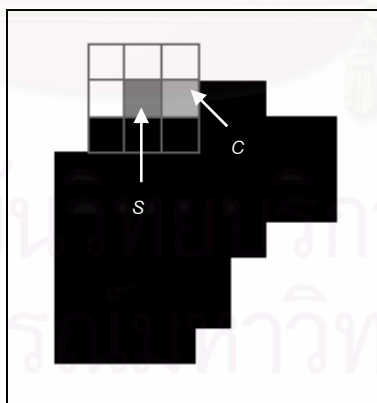
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของ s ซึ่งเป็นจุดภาพเริ่มต้น



รูปที่ 3.11 กำหนดให้ c มีตำแหน่งเดียวกันกับ s



รูปที่ 3.12 ลักษณะการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบภายในจุดภาพรอบ ๆ 8 จุดภาพของ c

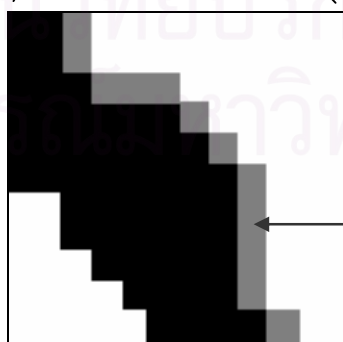
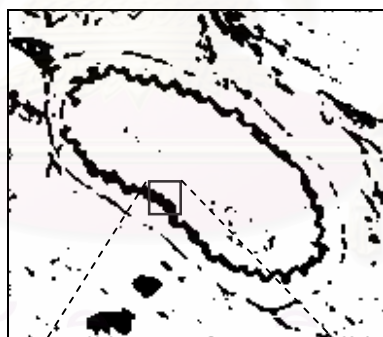


รูปที่ 3.13 ตำแหน่งของ c ที่ใช้ในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบครั้งต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้ขั้นตอนวิธีการตามรอยขอบของ R. Mukundan ข้างต้นนี้ โดยกำหนดให้จุดที่อยู่บนขอบด้านในทุกจุดเป็นจุดภาพเริ่มต้นและสิ้นสุดเมื่อกลับมาถึงจุดภาพเริ่มต้นอีกครั้ง ปัญหาที่พบคือมีการตามรอยขอบไม่รู้จบ กล่าวคือ การตามรอยขอบแล้วไม่สามารถกลับมาถึงจุดภาพเริ่มต้นได้ ทั้งนี้

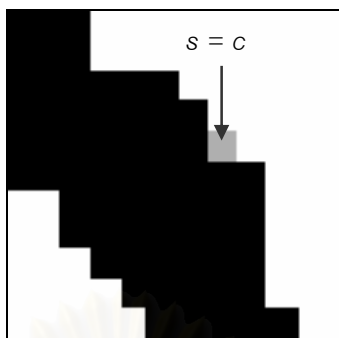
เนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการ ดังนั้นเพื่อให้เห็นลักษณะของปัญหา จึงได้แสดงส่วนของขอบในที่ตัดมาจากภาพหลอดเลือดที่เป็นภาพลักษณะพื้นฐานสองประกอบดังรูปที่ 3.14 ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

สาเหตุประการแรก คือ ตามขั้นตอนวิธีของ R. Mukundan ทิศเริ่มต้นในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบ (ทิศ b) สำหรับ s (จุดภาพเริ่มต้น) ที่กำหนดให้เริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบต่อไปในทิศ 0 นั้น (ในขั้นตอนข้อที่ 3) สามารถให้เริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบในทิศ 0 ได้ เนื่องจากในขั้นตอนดังกล่าวทราบว่าจุดภาพในทิศ 0 เป็นจุดภาพที่ไม่ใช่ขอบ เนื่องจาก s ได้จากการพิจารณาหาจุดภาพแรกที่เป็นขอบจากการพิจารณาจุดภาพในทิศซ้ายไปขวา และจากบนลงล่าง และทำให้ทราบว่าจุดภาพในทิศ 0 ที่เป็นจุดภาพทางซ้ายของจุดภาพ s เป็นจุดภาพที่ไม่ใช่ขอบ แต่ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถกำหนดให้ s เริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบต่อไปในทิศ 0 นี้ได้เสมอไป ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.15 ถ้าให้ s เริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบต่อไปในทิศ 0 ดังในรูปที่ 3.16 จะทำให้พบจุดภาพในทิศ 0 ที่ถือว่าเป็นจุดภาพที่เป็นขอบ และทำให้ได้จุดภาพในทิศนี้เป็นจุดภาพที่ใช้ในการตามรอยขอบต่อไปด้วย แต่จุดภาพใหม่ที่พบนี้ไม่ใช่จุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือดจริงจึงส่งผลให้การตามรอยขอบในครั้งต่อไปผิดพลาดด้วย ดังนั้นทิศเริ่มต้นในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบสำหรับ s นั้นควรเป็นทิศในตำแหน่งของจุดภาพที่ไม่ใช่ขอบ โดยในงานวิจัยนี้จึงต้องหาทิศเริ่มต้นในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบสำหรับ s ว่าควรเริ่มต้นจากทิศใดเป็นทิศแรกโดยจะกล่าวไว้ในรายละเอียดที่ทำในงานวิจัยนี้ต่อไป

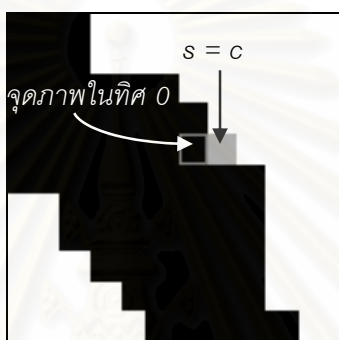


ขอบด้านในของ
ผนังหลอดเลือด

รูปที่ 3.14 ลักษณะของขอบในที่ตัดมาส่วนหนึ่งในภาพหลอดเลือดที่เป็นภาพลักษณะพื้นฐานสอง

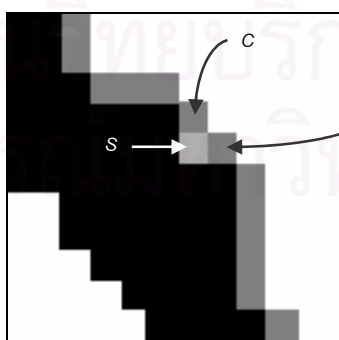


รูปที่ 3.15 ตำแหน่งของ s และ c ที่เป็นจุดภาพที่ใช้ในการตามรอยขอบ



รูปที่ 3.16 จุดภาพในทิศ 0 ที่คิดว่าเป็นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดซึ่งทำให้การตามรอยขอบผิดพลาดได้

สาเหตุประการที่สอง เกิดจาก s ซึ่งเป็นจุดภาพเริ่มต้นอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมดังตัวอย่างในรูปที่ 3.17 กล่าวคือในกรณีที่สมมติให้ s สามารถตามรอยขอบได้ ส่วน c เป็นจุดภาพล่าสุดที่ได้จากการตามรอยขอบและได้ดำเนินการตามรอยขอบถึงตำแหน่งดังในรูปที่ 3.17 เมื่อให้ c ตามรอยขอบต่อไปก็ควรสิ้นสุดการตามรอยขอบและกลับมายัง s แต่เมื่อให้ c นี้ตามรอยขอบต่อไปทำให้ c กลับมายังจุดภาพแรกที่ได้จากการตามรอยขอบ ทำให้การตามรอยขอบยังคงดำเนินต่อไป เพราะ s ซึ่งเป็นจุดภาพที่ใช้สิ้นสุดการตามรอยขอบด้วยอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม



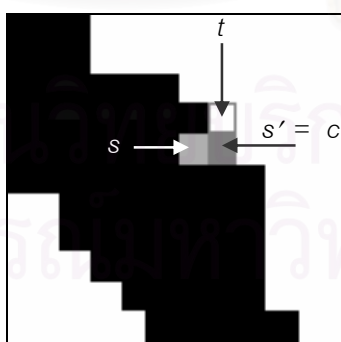
รูปที่ 3.17 ลักษณะการตามรอยขอบที่ไม่รู้จักจบเนื่องจาก s อยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม

จากทั้งสองสาเหตุของปัญหาที่เกิดจากการใช้ขั้นตอนวิธีตามรอยขอบของ R. Mukundan ดังกล่าวข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการแก้ปัญหาการตามรอยขอบไม่รู้จักโดยจะต้องตรวจสอบ s ว่าอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมหรือไม่ซึ่งถ้าอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมก็ต้องหาจุดภาพเริ่มต้นใหม่ และต้องคำนวณหา b ซึ่งเป็นทิศเริ่มต้นในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบสำหรับจุดภาพเริ่มต้นใหม่ (หรือ s ณ ขณะนี้) ดังนี้

1. การตรวจสอบความเหมาะสมของตำแหน่ง s ทำโดยการตรวจสอบกับ t ที่ได้จากการเดินจากจุดศูนย์กลางไปตามเส้นองค์ก่อนที่จะพบกับจุดแรกที่เป็นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด (s) ดังรูปที่ 3.18 จากนั้นหาว่า t อยู่ในทิศใดเมื่อเทียบกับ s ตามทิศในรูปที่ 3.9 ถ้าอยู่ในทิศ 1 หรือ 3 หรือ 5 หรือ 7 จะต้องหาจุดภาพเริ่มต้นใหม่ (s') เพื่อให้การตามรอยขอบมีการสิ้นสุด โดยค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบจากจุดภาพรอบ s ทั้ง 8 จุด โดยเริ่มต้นที่ทิศของ t เมื่อเทียบกับ s ดังตัวอย่างจากรูปที่ 3.18 จะได้ว่า t อยู่ในทิศ 3 เมื่อเทียบกับ s ทำให้ s เป็นจุดภาพเริ่มต้นที่ไม่เหมาะสม ซึ่งจะต้องหา s' โดยค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบจากจุดภาพรอบข้าง 8 จุดของ s โดยเริ่มต้นค้นหาในทิศ 3 เป็นทิศแรก ซึ่งจะได้จุดภาพในทิศ 4 เป็นจุดภาพที่เป็นขอบดังในรูปที่ 3.19 และให้จุดภาพใหม่ที่พบนี้เป็น s' เพื่อใช้เป็นจุดภาพเริ่มต้นใหม่ที่เหมาะสมในการตามรอยขอบต่อไป



รูปที่ 3.18 ตำแหน่งของ t ที่ใช้ตรวจสอบ s



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งของ s' ซึ่งเป็นจุดภาพเริ่มต้นใหม่

2. การหาทิศเริ่มต้นในการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบสำหรับจุดภาพเริ่มต้น โดยการหาว่า t อยู่ในทิศใดเมื่อเทียบกับ s' ตามทิศในรูปที่ 3.9 เช่นเดียวกัน และให้ s' นั้นเริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบ

ต่อไปในทิศดังกล่าว ดังนั้นจากตัวอย่างในรูปที่ 3.19 จะได้ t อยู่ในทิศ 2 เมื่อเทียบกับ s' ดังนั้น s' จะเริ่มต้นการค้นหาจุดภาพที่เป็นขอบต่อไปในทิศ 2

3.5 การหาพื้นที่

การหาพื้นที่เป็นการวัดโครงสร้างอย่างหนึ่งของผนังหลอดเลือด โดยในงานวิจัยนี้หาพื้นที่ของช่องว่างและพื้นที่ของผนังหลอดเลือดได้จากการนับจำนวนจุดภาพที่ได้จากวิธีการแผ่ขยายบริเวณ (region growing) ภายในบริเวณช่องว่างและผนังหลอดเลือดตามลำดับ

3.5.1 วิธีการแผ่ขยายบริเวณ

วิธีการแผ่ขยายบริเวณเป็นวิธีการแบ่งส่วน (segmentation) วิธีหนึ่งเพื่อให้ได้บริเวณที่ต้องการงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการแผ่ขยายบริเวณไปประยุกต์ใช้ในเรื่องการหาพื้นที่ของช่องว่างและพื้นที่ของผนังหลอดเลือด ขั้นตอนของการแผ่ขยายบริเวณเริ่มจากการกำหนดจุดเริ่มต้นของการแผ่ขยาย (seed point) ลงไปในส่วนที่ต้องการหาขอบเขตของบริเวณภายในภาพ จากนั้นทำการขยายขอบเขตของจุดเริ่มต้นออกไปทุกทิศทุกทางจนเต็มบริเวณที่เหมือนหรือคล้ายกัน ซึ่งในกรณีของภาพระดับเทาตั่งเช่นภาพหลอดเลือดนั้น ค่าระดับเทาของจุดเริ่มต้นจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตในการแผ่ขยายบริเวณ โดยจะแผ่ขยายไปยังจุดภาพที่อยู่รอบ ๆ ที่มีค่าระดับเทาใกล้เคียงกับจุดเริ่มต้นโดยให้ค่าคลาดเคลื่อนได้ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง และจากจุดภาพที่แผ่ขยายได้นี้ก็จะเหมือนจุดภาพเริ่มต้นของการแผ่ขยายที่ทำการแผ่ขยายไปยังจุดภาพอีกรอบด้านต่อไป จนกระทั่งพบจุดภาพที่มีความแตกต่างของค่าระดับเทาเกินช่วงของความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้จึงหยุดการแผ่ขยาย ดังนั้น ความถูกต้องของการแบ่งส่วนจึงขึ้นอยู่กับจุดเริ่มต้นของการแผ่ขยายและช่วงของความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้

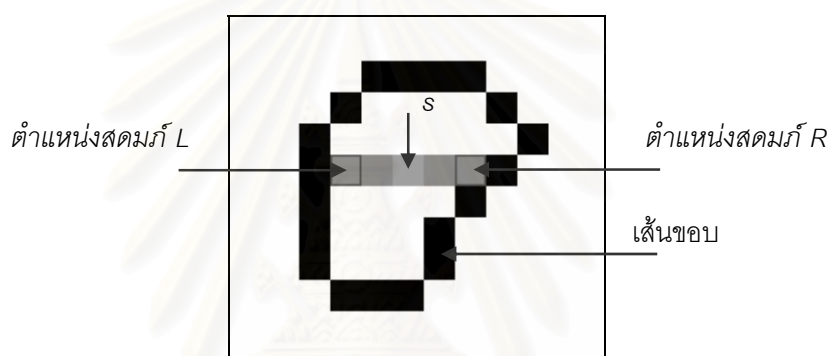
สำหรับงานวิจัยนี้ ภาพที่ใช้ในการแผ่ขยายบริเวณจะเป็นภาพลักษณะฐานสองที่มีพื้นหลัง (background) เป็นสีขาว โดยขั้นตอนวิธีการแผ่ขยายบริเวณจะใช้ลักษณะการแผ่ขยายเป็นแถว [9] ซึ่งจะหาจุดเริ่มต้นของการแผ่ขยายในแต่ละแถวเพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการแผ่ขยายต่อไป และการหาพื้นที่ของบริเวณช่องว่างของหลอดเลือดทำโดยกำหนดจุดศูนย์กลางของหลอดเลือดเป็นจุดเริ่มต้นของการแผ่ขยายในครั้งแรก จากจุดเริ่มต้นของการแผ่ขยายนี้จะแผ่ขยายไปจุดภาพสีขาวที่อยู่ในแถวเดียวกันจนกระทั่งพบจุดภาพที่เป็นเส้นขอบของผนังหลอดเลือดจึงสิ้นสุดการแผ่ขยายบริเวณในแถวนั้น จากนั้นพิจารณาแถวถัดขึ้นไปด้านบนและแถวถัดลงไปด้านล่างเพื่อหาตำแหน่งในการกำหนดจุดเริ่มต้นในการแผ่ขยายของแถวนั้นและเก็บตำแหน่งของจุดเริ่มต้นในการแผ่ขยายไว้ในกองซ้อน (stack) ให้ตัวบนสุดในกองซ้อนเป็นจุดเริ่มต้นในการแผ่ขยายต่อไป และสิ้นสุดการแผ่ขยายเมื่อกองซ้อนว่าง โดยมีรายละเอียดดังนี้

นิยามสัญลักษณ์ที่ใช้

s	เป็นจุดเริ่มต้นของการแผ่ขยาย
s'	เป็นจุดเริ่มต้นถัดไปที่จะทำการแผ่ขยาย
L	เป็นสดมภ์ซ้ายสุดของแถวที่ทำการแผ่ขยายแล้วและที่ไม่ใช่จุดภาพที่ อยู่บนเส้นขอบ
R	เป็นสดมภ์ขวาสุดของแถวที่ทำการแผ่ขยายแล้วและที่ไม่ใช่จุดภาพที่ อยู่บนเส้นขอบ

ขั้นตอนในการแผ่ขยาย

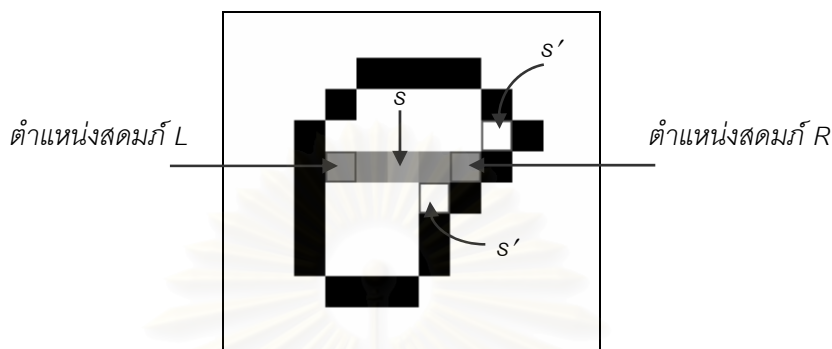
1. กำหนด s เป็นจุดเริ่มต้นของการแผ่ขยาย ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ตำแหน่งของ s ตำแหน่งสดมภ์ L และตำแหน่งสดมภ์ R

2. ทำการแผ่ขยายจาก s ไปยังจุดภาพข้าง ๆ ทางซ้ายมือจนกระทั่งพบเส้นขอบ และกำหนดให้ L เป็นตำแหน่งสดมภ์ของจุดภาพที่ติดกับเส้นขอบดังรูปที่ 3.20 จากนั้นทำการแผ่ขยายจากจุดภาพ s ไปยังจุดภาพข้าง ๆ ทางขวามือจนกระทั่งพบเส้นขอบ และกำหนดให้ R เป็นตำแหน่งของสดมภ์ของจุดภาพที่ติดกับเส้นขอบดังรูปที่ 3.20
3. พิจารณาแถวถัดขึ้นไปด้านบน เพื่อตรวจหาจุดเริ่มต้นถัดไปที่จะทำการแผ่ขยาย (s) ที่อยู่ระหว่างสดมภ์ L กับสดมภ์ R ซึ่งในการตรวจหาจะต้องพิจารณาดังนี้
 - ถ้าในขณะที่ทำการตรวจหาจากสดมภ์ L ไปยังสดมภ์ R พบเส้นขอบ แต่การตรวจหา นั้นยังไม่ถึงสดมภ์ R ให้เก็บตำแหน่งของจุดภาพที่ติดกับเส้นขอบไว้ในกองซ้อนเพื่อเป็น s' แล้วให้ตรวจหา s' จนกว่าถึงสดมภ์ R ซึ่งอาจทำให้ได้ s' มากกว่า 1 จุดในแถวเดียวกัน
 - ในกรณีการตรวจหาไปถึงสดมภ์ R แล้วยังไม่พบเส้นขอบก็ให้ทำการตรวจหาต่อไป จนกว่าจะพบเส้นขอบและให้เก็บจุดภาพที่ติดกับเส้นขอบเพื่อเป็น s' ไว้ในกองซ้อน
4. ทำการตรวจหา s' เช่นเดียวกันกับข้อ 3 ในแถวถัดลงไปทางด้านล่างซึ่งผลการหา s' จากข้อ 3 และ 4 จะได้ผลดังตัวอย่างรูปที่ 3.21

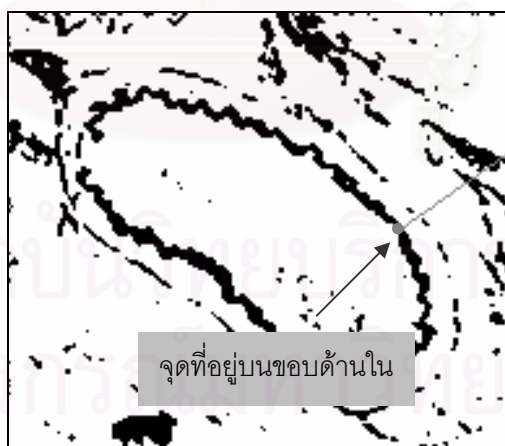
5. จากนั้นนำ s' ตัวบนสุดในกองซ้อนออกจากกองซ้อนเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นถัดไปของการแผ่ขยาย
6. กลับไปทำในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งในการแผ่ขยายบริเวณต้องพิจารณาด้วยว่าจุดภาพที่ได้ทำการแผ่ขยายแล้วจะไม่มี การแผ่ขยายอีก และสิ้นสุดการแผ่ขยายบริเวณก็ต่อเมื่อกองซ้อนนั้นว่าง



รูปที่ 3.21 ตำแหน่งของ s' ที่เก็บไว้ในกองซ้อน

3.6 การสร้างเส้นตั้งฉาก

เส้นตั้งฉาก ในงานวิจัยนี้หมายถึงเส้นตรงที่ “พุ่งออก” จากจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือดไปยังขอบของภาพ เพื่อช่วยในการหาบริเวณที่เป็นขอบด้านนอกของหลอดเลือด ซึ่งมีลักษณะในรูปที่ 3.22 แต่ขั้นตอนในการสร้างเส้นตั้งฉากนั้นไม่สามารถใช้วิธีเดียวกันกับการสร้างเส้นองศาได้ เนื่องจากไม่ทราบตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบของภาพที่แน่นอนเหมือนเส้นองศา ดังนั้นขั้นตอนในการสร้างเส้นตั้งฉากมีดังนี้



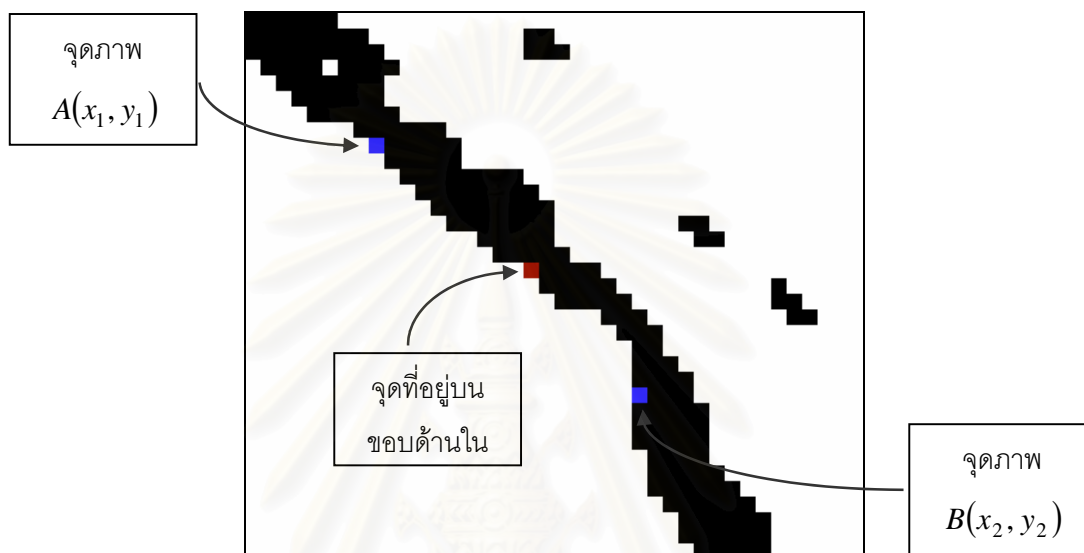
รูปที่ 3.22 เส้นตั้งฉากที่ลากจากจุดที่อยู่บนขอบด้านในไปยังขอบของภาพ

ขั้นตอนในการสร้างเส้นตั้งฉาก

1. หาความชันของเส้นสัมผัสของจุดที่อยู่บนขอบด้านใน โดยหาได้จากจุดภาพข้าง ๆ 2 จุดที่ได้จากจุดที่อยู่บนขอบด้านในไปในทิศทวนเข็มนาฬิกา 10 จุดภาพ และในทิศตามเข็มนาฬิกา 10

จุดภาพ ซึ่งจะได้จุดภาพ A และจุดภาพ B ตามลำดับดังรูปที่ 3.23 ดังนั้นสามารถหาความชันของเส้นสัมผัสได้จากสมการที่ 3

$$\text{ความชันของเส้นสัมผัส} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \dots (3)$$



รูปที่ 3.23 จุดภาพ A และจุดภาพ B ที่ใช้ในการหาความชันของเส้นสัมผัสของจุดที่อยู่บนขอบด้านใน

- จากนั้นหาความชันของเส้นตั้งฉากของจุดที่อยู่บนขอบด้านในได้จากสมการที่ 4

$$\text{ความชันของเส้นตั้งฉาก} = -\frac{1}{\text{ความชันของเส้นสัมผัส}} \quad \dots (4)$$

- สร้างเส้นตั้งฉากที่ผ่านจุดที่อยู่บนขอบด้านใน ซึ่งจะได้เส้นตั้งฉากในลักษณะดังรูปที่ 3.24ก
- เนื่องจากเส้นตั้งฉากที่ต้องการต้องเป็นเส้นที่ “พุ่งออก” จากจุดที่อยู่บนขอบด้านในไปยังขอบของภาพ ฉะนั้นจากรูปที่ 3.24ก สามารถแบ่งเส้นตั้งฉากนี้ออกเป็น 2 ส่วนด้วยจุดที่อยู่บนขอบด้านใน ดังในรูปที่ 3.24ข ซึ่งส่วนของเส้นตั้งฉากที่ต้องการจากรูปดังกล่าวคือ ส่วนที่สอง ดังนั้นต้องมีการพิจารณาเพื่อให้ได้ส่วนของเส้นตั้งฉากที่พุ่งออกไปยังขอบของภาพดังนี้

- เลือกจุดภาพ C ที่ปลายของเส้นตั้งฉากในตำแหน่งที่ x มีค่าน้อยดังในรูปที่ 3.25
- หาผลคูณภายนอก (cross product) ระหว่างเวกเตอร์ \overline{BA} กับ \overline{BC} ซึ่ง

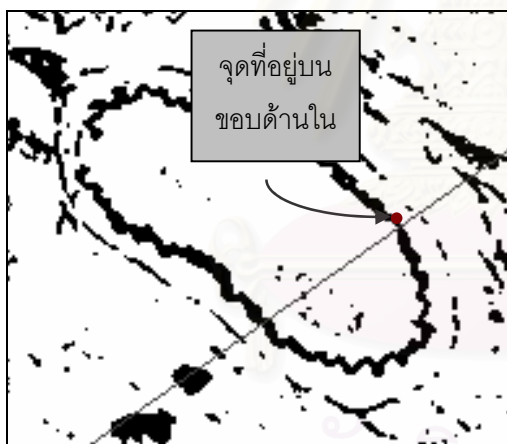
$$\overline{BA} = (x_1 - x_2)\bar{i} + (y_1 - y_2)\bar{j} \quad \text{และ}$$

$$\overline{BC} = (x - x_2)\bar{i} + (y - y_2)\bar{j}$$

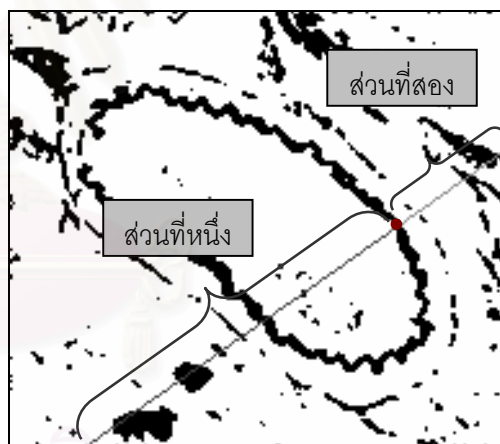
ฉะนั้น

$$\begin{aligned} \overline{BA} \times \overline{BC} &= \det \begin{bmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ (x_1 - x_2) & (y_1 - y_2) & 0 \\ (x - x_2) & (y - y_2) & 0 \end{bmatrix} \\ &= 0 \bar{i} + 0 \bar{j} + [(x_1 - x_2)(y - y_2) - (x - x_2)(y_1 - y_2)] \bar{k} \quad \dots (5) \end{aligned}$$

- พิจารณาว่าจุด C อยู่นอกหรืออยู่ในบริเวณ* โดยพิจารณาจากทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน z ในสมการที่ 5 นั่นคือถ้าผลคูณภายนอกของเวกเตอร์ 2 ตัวนี้ได้ทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน z เป็นลบ แสดงว่าจุด C อยู่ในบริเวณ ดังนั้นเส้นตั้งฉากที่ต้องการจะลากจากจุดที่อยู่บนขอบด้านในไปยังจุดปลายตรงข้ามกับจุด C ดังตัวอย่างในส่วนที่สองในรูปที่ 3.24 ในทางกลับกัน ถ้าผลคูณภายนอกของเวกเตอร์ 2 ตัวนี้ได้ทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน z เป็นบวก แสดงว่าจุด C อยู่นอกบริเวณ ดังนั้นเส้นตั้งฉากที่ต้องการจะลากจากจุดที่อยู่บนขอบด้านในไปยังจุด C



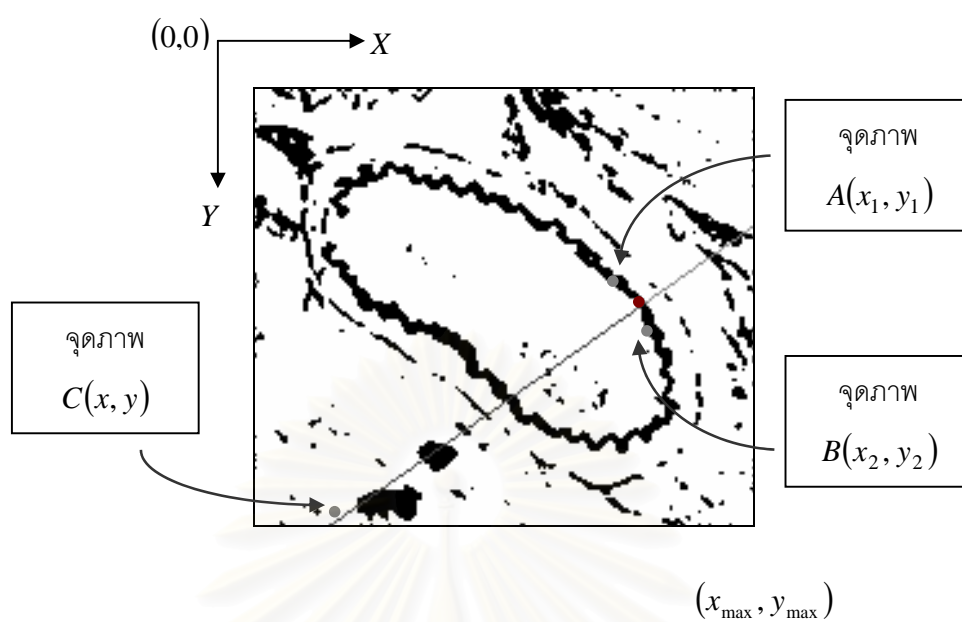
(ก) ลักษณะของเส้นตั้งฉากที่ผ่านจุดที่อยู่บนขอบด้านใน



(ข) การแบ่งเส้นตั้งฉากออกเป็นสองส่วน

รูปที่ 3.24 ลักษณะการพิจารณาเส้นตั้งฉาก

* ถ้าเส้นตรงในส่วนที่หนึ่งหรือส่วนที่สองตัดกับขอบในอีกด้านหนึ่งของหลอดเลือด เส้นตรงส่วนนั้นจะเป็นส่วนที่อยู่ในบริเวณ ซึ่งจุด C ก็จะเป็นจุดที่อยู่ในบริเวณด้วย เส้นตรงอีกส่วนหนึ่งก็จะเป็นส่วนที่อยู่นอกบริเวณ



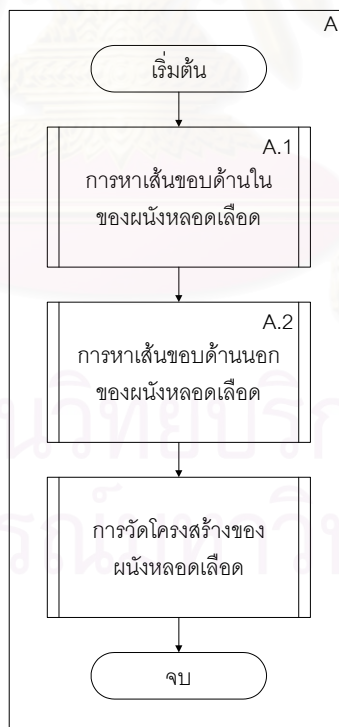
รูปที่ 3.25 ลักษณะของจุดภาพที่ใช้ในการพิจารณาเลือกส่วนของเส้นตั้งฉาก

บทที่ 4

ขั้นตอนการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดแบบอัตโนมัติ

ในบทนี้จะได้นำเสนอรายละเอียดเพื่อให้เห็นภาพโดยละเอียดของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างเครื่องมือช่วยวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์กราฟิกมาช่วย สำหรับรายละเอียดของเทคนิควิธีทางการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์กราฟิกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดแบบอัตโนมัติ โดยจะอธิบายถึงขั้นตอนทั้งหมดของการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดในหนึ่งภาพ

สำหรับการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดนี้สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นส่วนหลักต่าง ๆ รวม 3 ส่วนดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

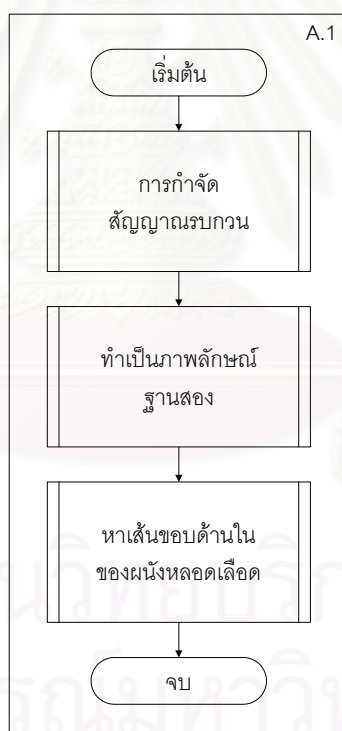


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

1. **การหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด** มีเป้าหมายเพื่อหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด ซึ่งจะคัดเลือกจุดที่อยู่บนขอบด้านในเพื่อใช้ในการวัดความหนาต่อไปด้วย
2. **การหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด** มีเป้าหมายเพื่อหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด ซึ่งเป็นการหาจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดที่เป็น "คู่จุด" ของจุดที่อยู่บนขอบด้านในด้วย
3. **การวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด** เป็นขั้นตอนการคำนวณเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด คือ ความหนาของผนังหลอดเลือด ความยาวขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด และพื้นที่ของช่องว่างและของผนังหลอดเลือด

4.1 การหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด

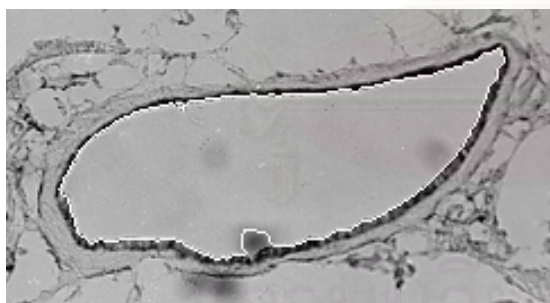
ในการหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ในรูปที่ 4.2 ดังนี้



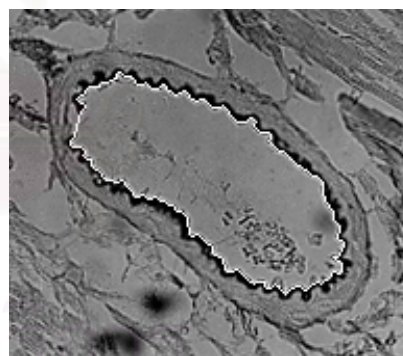
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานย่อยของการหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด

- ขั้นตอนที่ 1** กำจัดสัญญาณรบกวน โดยได้เลือกใช้ตัวกรองมัลติฐานที่มีขนาด 3×3
- ขั้นตอนที่ 2** ทำเป็นภาพลักษณะฐานสอง
- ขั้นตอนที่ 3** หาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- สร้างเส้นองศาจำนวน 360 เส้น เพื่อใช้ในการหาจุดที่อยู่บนขอบด้านใน
- จากจุดศูนย์กลางภาพ เดินไปตามเส้นองศาแต่ละเส้นจนกว่าจะพบจุดภาพที่เป็นจุดสีดำซึ่งเป็นจุดที่คาดว่าน่าจะเป็นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด แล้วให้ถือว่าจุดนั้นเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือด ซึ่งจะได้ผลมา 360 จุดหรือน้อยกว่าในกรณีที่ขอบในขาดหายไปและทำให้ไม่สามารถหาจุดที่อยู่บนขอบด้านในได้
 - ให้จุดแต่ละจุดที่อยู่บนขอบด้านในหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดโดยการตามรอยขอบ ซึ่งทำให้ได้เส้นขอบด้านในมา 360 เส้นหรือน้อยกว่า จากนั้นเลือกเส้นขอบด้านในที่มีความยาวสั้นที่สุดเพียงหนึ่งเส้น เพื่อเป็นตัวแทน “ชั่วคราว” ของเส้นขอบด้านใน
 - เลือกจุดที่เส้นองศาตัดกับตัวแทนชั่วคราวของเส้นขอบด้านในที่ได้คัดเลือกมา ซึ่งจะได้ผลมา 360 จุดหรือน้อยกว่าในกรณีที่ไม่มีเส้นองศาใดตัดกับตัวแทนชั่วคราวของเส้นขอบด้านใน จากนั้นจึงเชื่อมแต่ละจุดที่อยู่บนขอบด้านในทั้งหมด โดยใช้วิธีการตามรอยขอบจากจุดที่อยู่บนขอบด้านในจุดหนึ่งไปยังจุดที่อยู่บนขอบด้านในอีกจุดหนึ่ง ถ้าการตามรอยขอบไม่สามารถไปยังอีกจุดหนึ่งได้ นั่นแสดงได้ว่าเป็นบริเวณขอบในของผนังหลอดเลือดที่ขาด ก็จะทำกรเชื่อมส่วนที่ขาดนี้ด้วยเส้นตรงซึ่งจะทำให้ได้เส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดที่เหมาะสมที่จะเป็นตัวแทนของเส้นขอบด้านในเพื่อใช้ในการคำนวณความยาวเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดด้วย ดังรูปที่ 4.3 และกำหนดให้จุดที่อยู่บนเส้นขอบด้านในทุกจุดยกเว้นจุดที่อยู่บนเส้นตรงที่ใช้ในการเชื่อมต่อส่วนที่ขาดเป็น *จุดที่อยู่บนขอบด้านใน*



(ก)



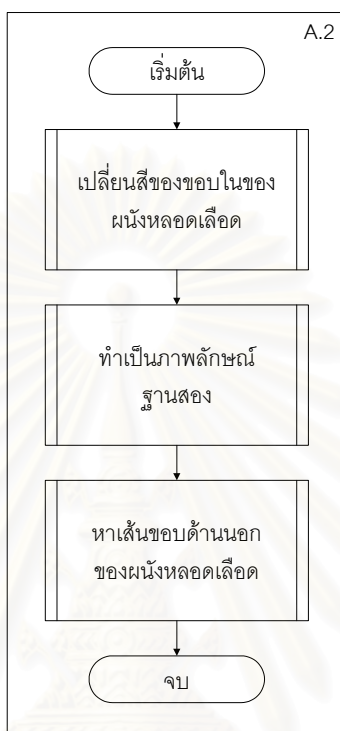
(ข)

รูปที่ 4.3 เส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด (แสดงด้วยเส้นสีขาว)

4.2 การหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด

สิ่งที่ได้จากขั้นตอนที่ผ่านมาคือเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด และตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบด้านในที่คัดเลือกมาจากจุดบนเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดที่ไม่รวมจุดบนเส้นตรงที่สร้างเพื่อเชื่อมต่อ

ส่วนที่ขาดหายไปของขอบใน ในขั้นตอนต่อไปเป็นการหาเส้นขอบด้านนอกและจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกที่เป็นจุดของจุดที่อยู่บนขอบด้านใน ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 4.4 ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการทำงานย่อยของการหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด

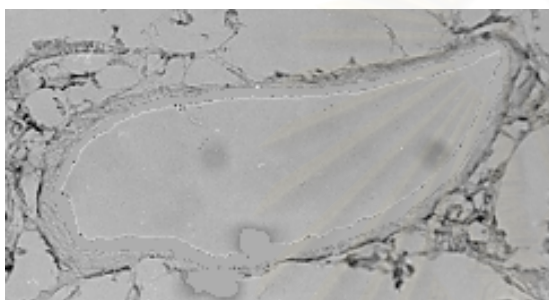
ขั้นตอนที่ 1 เนื่องจากภาพหลอดเลือดส่วนใหญ่มีขอบในของหลอดเลือดที่ค่อนข้างชัดเจนกว่าขอบนอก กล่าวคือ ขอบในมีค่าระดับเทาแตกต่างจากเนื้อเยื่อและช่องว่างมากกว่าขอบนอกมาก ซึ่งเมื่อนำภาพหลอดเลือดต้นฉบับมาผ่านการกำจัดสัญญาณรบกวนในขั้นตอนที่ 1 จากหัวข้อที่ 4.1 มีผลให้ขอบนอกของหลอดเลือดไม่ค่อยชัดเจน และทำให้ขอบนอกของหลอดเลือดในภาพลักษณะฐานสองขาดหายไปมาก ดังนั้นในการหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดจึงเริ่มด้วยการเปลี่ยนค่าระดับเทาของขอบในของหลอดเลือดในภาพต้นฉบับให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับเทาของช่องว่าง เพื่อลดความสำคัญของขอบในลงไม่ให้เห็นขอบในมีผลต่อการหาค่าขีดแบ่ง อีกทั้งยังช่วยกำจัดขอบในไม่ให้มีผลต่อการหาจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกอีกด้วย ในการเปลี่ยนสีของขอบในนั้นมีขั้นตอนดังนี้

- กำหนดกลุ่ม (labeling) [6] ให้แก่จุดภาพทุกจุดภายในภาพลักษณะฐานสองที่ได้จากขั้นตอนการหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด
- หากกลุ่มของจุดภาพที่เป็นกลุ่มของขอบใน โดยคำนวณหากรอบล้อม (bounding box) แต่ละกลุ่มด้วยสมการที่ 6 จากการหาจุดภาพที่อยู่บนสุดของกลุ่ม (topmost) ล่างสุดของกลุ่ม (bottommost)

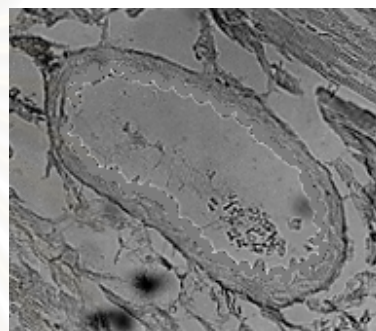
ซ้ายสุดของกลุ่ม (leftmost) และขวาสุดของกลุ่ม (rightmost) จากนั้นคัดเลือกกลุ่มที่มีกรอบล้อมที่ใหญ่ที่สุด และมีจุดที่อยู่บนขอบด้านในอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย ให้ถือว่าเป็นกลุ่มของขอบใน

$$\text{bounding box} = | \text{topmost} - \text{bottommost} | \times | \text{leftmost} - \text{rightmost} | \quad \dots (6)$$

- แทนที่สีรูปภาพในภาพต้นฉบับที่ตรงกับตำแหน่งของจุดภาพที่เป็นกลุ่มของขอบในด้วยค่าระดับเทาเฉลี่ยของทุกจุดภาพบนตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นองศาระหว่างจุดศูนย์กลางภาพกับจุดที่อยู่บนขอบด้านใน ซึ่งจะได้ภาพหลอดเลือดดังรูปที่ 4.5



(ก) แทนขอบในของหลอดเลือดด้วย
ค่าระดับเทาที่ระดับเทา 174



(ข) แทนขอบในของหลอดเลือดด้วย
ค่าระดับเทาที่ระดับเทา 125

รูปที่ 4.5 ภาพหลอดเลือดที่เปลี่ยนสีขอบในของหลอดเลือด

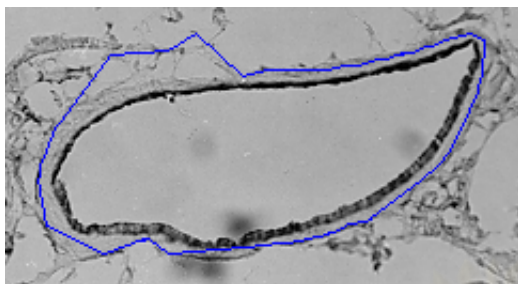
ขั้นตอนที่ 2 ทำเป็นภาพลักษณะฐานสองและกำจัดจุดภาพที่มีขนาด 1 จุดภาพซึ่งถือว่าเป็นสัญญาณรบกวน

ขั้นตอนที่ 3 หาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด มีขั้นตอนดังนี้

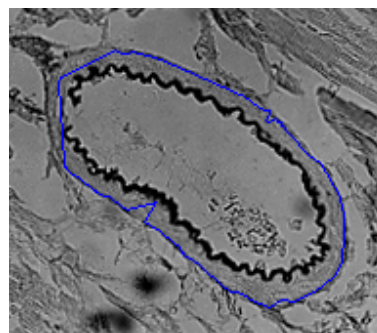
- สร้างเส้นตั้งฉากกับจุดที่อยู่บนขอบด้านในที่ได้คัดเลือกไว้แล้ว เพื่อใช้หาจุดที่อยู่บนขอบนอก

- จากแต่ละจุดที่อยู่บนขอบด้านใน ตามรอยขอบไปตามเส้นตั้งฉากจนกว่าจะพบจุดภาพที่เป็นสีดำซึ่งเป็นจุดที่คาดว่าน่าจะเป็นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด ให้ถือว่าจุดนั้นเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก ที่เป็นคู่จุดของจุดที่อยู่บนขอบด้านใน ถ้าไม่พบขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดก็แสดงว่าไม่มีจุดที่น่าจะเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก ก็จะทิ้งจุดที่อยู่บนขอบด้านในนั้นไป

- เชื่อมจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกด้วยเส้นตรง ทำให้ได้เส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด ดังรูปที่ 4.6



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 เส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด (แสดงด้วยเส้นสีดำ)

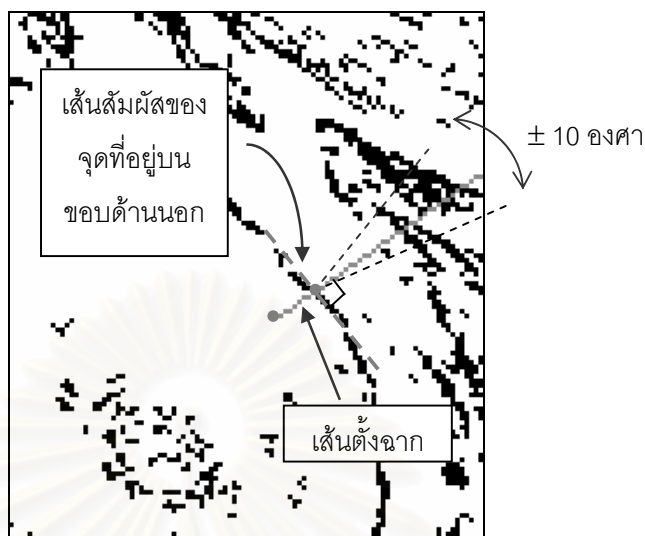
4.3 การวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

โครงสร้างของผนังหลอดเลือดที่ทำการวัดคือ ความหนาของผนังหลอดเลือด ความยาวขอบด้านใน และด้านนอกของผนังหลอดเลือด พื้นที่ของช่องว่างและของผนังหลอดเลือด โดยที่โครงสร้างแต่ละโครงสร้างมีรายละเอียดการวัดและการคำนวณดังนี้

4.3.1 การวัดความหนาของผนังหลอดเลือด

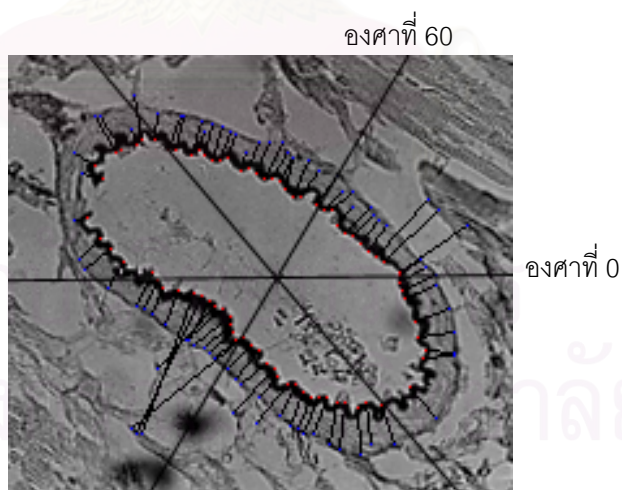
จากการหาเส้นขอบด้านในและการหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด ทำให้ได้จุดที่อยู่บนขอบด้านในและจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกที่เป็นคู่จุดกันที่จะนำมาใช้ในการวัดความหนา แต่คู่จุดการวัดที่เหมาะสมที่จะใช้วัดความหนานั้นควรมีเส้นตั้งฉากกับจุดที่อยู่บนขอบด้านในและจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก “ร่วมกัน” และเนื่องจากลักษณะของภาพมีความหลากหลาย งานวิจัยนี้จึงคัดเลือกคู่จุดที่มีเส้นตั้งฉากที่เบี่ยงเบนจากกันได้เล็กน้อย โดยการคัดเลือกคู่จุดที่มีมุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับเส้นสัมผัสของจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกอยู่ในช่วงเบี่ยงเบนได้ ± 10 องศาเป็น “คู่จุดที่น่าจะใช้” ในการวัดความหนาของผนังหลอดเลือด ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.7

เนื่องจากภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีความหลากหลายแตกต่างกันมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และภาพหลอดเลือดส่วนใหญ่มีขอบในของหลอดเลือดที่ค่อนข้างชัดเจนกว่าขอบนอก ซึ่งเมื่อผ่านขั้นตอนการทำให้เป็นภาพลักษณะฐานสองจะมีผลให้ขอบนอกของหลอดเลือดมีความไม่ต่อเนื่องเหมือนขอบในของหลอดเลือด ทำให้ขั้นตอนการหาเส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดไม่ได้จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกจริง และส่งผลให้การวัดความหนาที่มีความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงควรกำจัดคู่จุดที่น่าจะใช้ที่ได้เลือกมาข้างต้นที่จะทำให้ค่าความหนาคลาดเคลื่อนทั้งไป



รูปที่ 4.7 มุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับเส้นสัมผัสของจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก
อยู่ในช่วงเบี่ยงเบนได้บวกลบ 10 องศา

ในการกำจัดจุดที่น่าจะใช้ที่มีผลทำให้ค่าความหนาที่ได้มีความคลาดเคลื่อนนี้ ได้ใช้สมมุติฐานที่ว่า หลอดเลือดบริเวณใกล้เคียงกันน่าจะมีค่าความหนาไม่แตกต่างกันมากนัก ในงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งหลอดเลือดเป็น 6 ส่วนย่อยตามตำแหน่งขององศา ดังรูปที่ 4.8 จากนั้นหาค่าความหนาเฉลี่ยของแต่ละส่วนย่อย แล้วคัดเลือกเอาเฉพาะจุดจุดที่มีระยะห่างอยู่ในระยะเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มมาเป็น “จุดจุดที่ใช้” ในการวัดความหนา

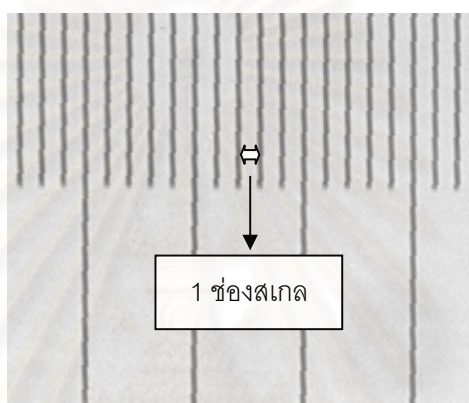


รูปที่ 4.8 ภาพหลอดเลือดที่แบ่งเป็น 6 ส่วนย่อยตามตำแหน่งขององศา

ค่าความหนาของผนังหลอดเลือดนั้นคำนวณได้จากการวัดระยะ Euclidean ระหว่างจุดบนขอบด้านในและจุดบนขอบด้านนอกของแต่ละจุดจุดที่ใช้ในการวัดที่ได้คัดเลือกมา ซึ่งจะให้ค่าความหนาของจุดจุดใน

หน่วยของจุดภาพ และจะต้องเทียบกลับให้อยู่ในหน่วยไมโครเมตรโดยใช้สมการที่ 7 แล้วจึงคำนวณค่าความหนาเฉลี่ยจากทุกคู่จุด

ในการเทียบกลับเป็นหน่วยไมโครเมตรนี้จะใช้ภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ที่มองผ่านกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดาที่มีกำลังขยายเท่ากับภาพหลอดเลือดเป็นตัวเทียบ โดยการวัดระยะ Euclidean ของแต่ละ 1 ช่องสเกลบนภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ดังรูปที่ 4.9 แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยของระยะ Euclidean ใน 1 ช่องสเกล ซึ่ง 1 ช่องสเกลนี้จะเท่ากับ 10 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.9 ระยะ 1 ช่องสเกลบนภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย

นั่นคือ ภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์สแกนด้วย dpi ภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ ^{ซึ่ง}

$$1 \text{ ช่องสเกลบนภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์} = n \text{ จุดภาพ} = 10 \mu\text{m}$$

และภาพถ่ายของหลอดเลือดสแกนด้วย dpi ภาพถ่ายของหลอดเลือด ดังนั้นเมื่อเทียบกลับให้อยู่ในหน่วยเดียวกันบน dpi ภาพถ่ายของหลอดเลือด จะได้

$$1 \text{ ช่องสเกลบนภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์} = \frac{n \times dpi_{\text{ภาพถ่ายของหลอดเลือด}}}{dpi_{\text{ภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์}}} \text{จุดภาพ} = 10 \mu\text{m}$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{ระยะของ 1 คู่จุด} = y \text{ จุดภาพ ยาวเท่ากับ } \frac{10 \times dpi_{\text{ภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์}} \times y}{n \times dpi_{\text{ภาพถ่ายของหลอดเลือด}}} \mu\text{m} \quad \dots (7)$$

4.3.2 การหาความยาวขอบของผนังหลอดเลือด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การวัดความยาวขอบของผนังหลอดเลือดจะประกอบด้วย การวัดความยาวขอบด้านในและความยาวขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด ซึ่งได้จากผลรวมของระยะ Euclidean ระหว่างจุดแต่ละจุดบนเส้นขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดตามลำดับ และค่าที่วัดได้จะอยู่ในหน่วยของจุดภาพ จากนั้นจะต้องเทียบให้อยู่ในหน่วยไมโครเมตรโดยใช้สมการที่ 7 เช่นเดียวกัน

4.3.3 การหาพื้นที่

สำหรับการหาพื้นที่นั้นจะมีด้วยกัน 2 ส่วนคือ การหาพื้นที่ของช่องว่างและของผนังหลอดเลือดซึ่งได้จากการนับจำนวนจุดภาพที่ได้จากวิธีการแผ่ขยายบริเวณภายในบริเวณช่องว่างและผนังหลอดเลือดตามลำดับดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 จากนั้นคำนวณให้อยู่ในหน่วยตารางไมโครเมตรจากสมการที่ 8 โดยที่

$$\text{พื้นที่ 1 จุดภาพ} = \left(\frac{10 \times \text{dpi}_{\text{ภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์}}}{n \times \text{dpi}_{\text{ภาพถ่ายของหลอดเลือด}}} \right)^2 \text{ ตารางไมโครเมตร}$$

ดังนั้น

$$\text{พื้นที่} = \left(\frac{10 \times \text{dpi}_{\text{ภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์}}}{n \times \text{dpi}_{\text{ภาพถ่ายของหลอดเลือด}}} \right)^2 \times \text{จำนวนจุดภาพ ตารางไมโครเมตร} \quad \dots (8)$$

บทที่ 5

การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือและ การทดลองใช้กับภาพหลุดเลือดจริง

เนื่องจากลักษณะของเครื่องมือที่ได้ออกแบบมีด้วยกัน 3 ลักษณะคือ แบบอัตโนมัติ แบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบกำหนดเองโดยผู้วัด ซึ่งในขั้นตอนการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดจะเกี่ยวข้องกับการกำหนดคจุดที่เหมาะสมในการวัด ดังนั้นจะมีผลต่อเครื่องมือวัดแบบอัตโนมัติและแบบกึ่งอัตโนมัติมากที่สุด แต่ไม่มีผลต่อเครื่องมือวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัด เนื่องจากผู้วัดเป็นผู้กำหนดคจุดที่จะวัดเองทั้งหมด ฉะนั้นในการทดสอบเครื่องมือวัดนี้จะทดสอบการคัดเลือกคจุดที่ใช้ในการวัดโดยอัตโนมัติเท่านั้น

รายละเอียดที่จะนำเสนอในบทนี้จะประกอบด้วย การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือ ผลจากการตรวจสอบ จากนั้นจะเป็นการทดลองกับภาพหลุดเลือดจริง พร้อมแสดงผลการทดลอง และสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ผล

5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือ

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบเครื่องมือด้วยภาพวงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีที่สร้างขึ้นเพื่อให้ทราบความหนาที่แท้จริงเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือนี้ เหตุผลที่ใช้ภาพลักษณะนี้เป็นภาพในการทดสอบ เพราะเป็นภาพลักษณะใกล้เคียงกับหลอดเลือด สาเหตุที่ไม่ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือนี้กับภาพหลุดเลือดทุกแบบโดยตรงโดยเทียบกับการวัดโดยคน เนื่องจากความไม่แน่นอนและความแปรปรวนในการวัดที่ทำโดยคนสูงมาก และความหลากหลายของลักษณะหลอดเลือดดังได้กล่าวมาแล้ว ภาพที่ใช้ในการตรวจสอบทุกภาพสแกนด้วยความละเอียด 150 dpi และแบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

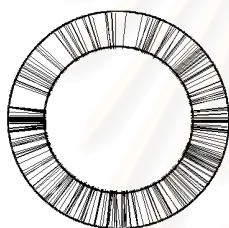
1. แบบที่ขอบของผนังสมบูรณ์ เป็นภาพวงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรี โดยภาพวงแหวนรูปวงกลมประกอบด้วยวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 4 ซม. และเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 6 ซม. (ความหนา 1 ซม.) กับวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 4 ซม. และเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 8 ซม. (ความหนา 2 ซม.) ส่วนภาพวงแหวนรูปวงรีประกอบด้วยรูปวงรีในแนวนอนและแนวตั้ง โดยรูปวงรีมีวงในที่มีแกนเอกยาว 4 ซม. และ

แกนโตยาว 2 ซม. วงนอกมีแกนเอกยาว 6 ซม. และแกนโทยาว 4 ซม. (ความหนาหนา 1 ซม.) กับรูปวงรีมีวงในที่มีแกนเอกยาว 4 ซม. และแกนโทยาว 2 ซม. วงนอกมีแกนเอกยาว 8 ซม. และแกนโทยาว 6 ซม. (ความหนา 2 ซม.)

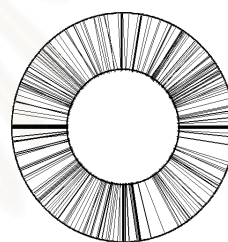
2. แบบที่ขอบของผนังขาด เพื่อให้คล้ายกับลักษณะของหลอดเลือดอีกประเภทหนึ่งที่ได้ในการปฏิบัติงานจริง กล่าวคือ มีขอบในของผนังขาด 1 บริเวณ และมีขอบนอกของผนังขาดได้มากกว่า 1 บริเวณ ซึ่งเป็นทั้งภาพวงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีในแนวตั้งที่มีขนาดเดียวกันกับแบบที่ขอบของผนังสมบูรณ์ นั่นคือความหนา 1 ซม. และ 2 ซม.

5.2 ผลการตรวจสอบกับภาพที่สร้างขึ้น

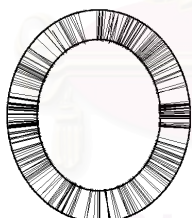
จากการตรวจสอบกับภาพที่สร้างขึ้นสามารถแสดงผลของการคัดเลือกจุดที่ใช้ในการวัดได้ในรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 และผลการวัดความหนาแสดงไว้ในตารางที่ 5.1



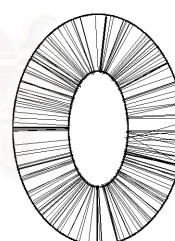
(ก) ภาพวงแหวนรูปวงกลม หนา 1 ซม.



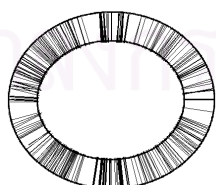
(ข) ภาพวงแหวนรูปวงกลม หนา 2 ซม.



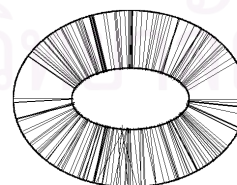
(ค) ภาพวงแหวนรูปวงรีแนวตั้ง หนา 1 ซม.



(ง) ภาพวงแหวนรูปวงรีแนวตั้ง หนา 2 ซม.

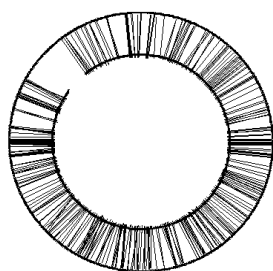


(จ) ภาพวงแหวนรูปวงรีแนวนอน หนา 1 ซม.

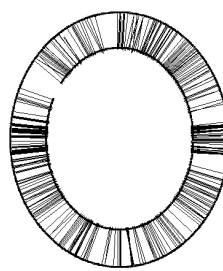


(ฉ) ภาพวงแหวนรูปวงรีแนวนอน หนา 2 ซม.

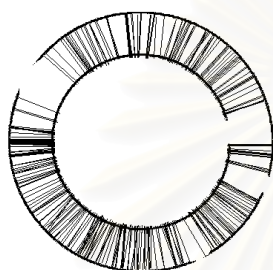
รูปที่ 5.1 ผลการตรวจสอบกับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังสมบูรณ์ ซึ่งเป็นภาพวงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีที่มีความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพจริง



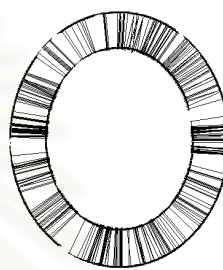
(ก) ภาพวงแหวนรูปวงกลม 1



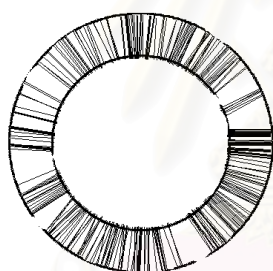
(ข) ภาพวงแหวนรูปวงรี 1



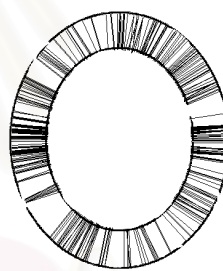
(ค) ภาพวงแหวนรูปวงกลม 2



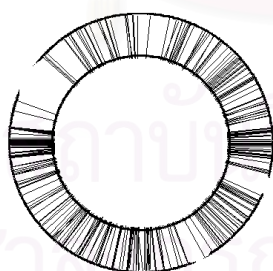
(ง) ภาพวงแหวนรูปวงรี 2



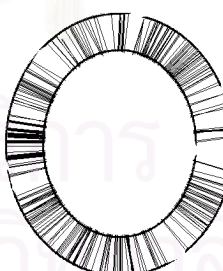
(จ) ภาพวงแหวนรูปวงกลม 3



(ฉ) ภาพวงแหวนรูปวงรี 3

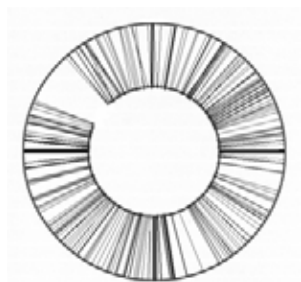


(ช) ภาพวงแหวนรูปวงกลม 4

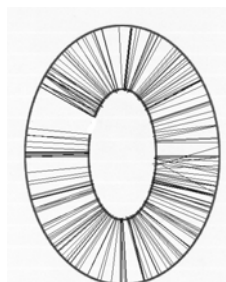


(ซ) ภาพวงแหวนรูปวงรี 4

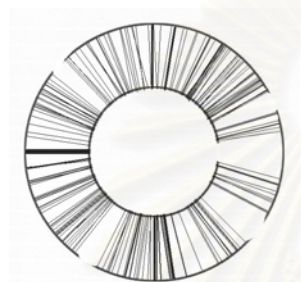
รูปที่ 5.2 ผลการทดสอบกับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังขาดหายไป ซึ่งเป็นภาพวงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีในแนวตั้งที่มีความหนา 1 ซม. ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพจริง



(ก) ภาพวงแหวนรูปวงกลม 5



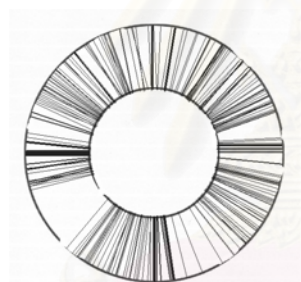
(ข) ภาพวงแหวนรูปวงรี 5



(ค) ภาพวงแหวนรูปวงกลม 6



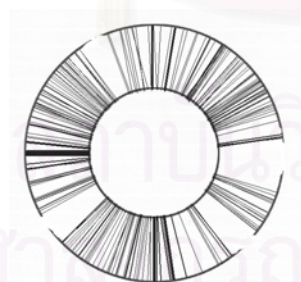
(ง) ภาพวงแหวนรูปวงรี 6



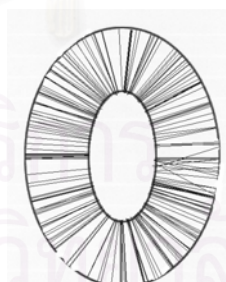
(จ) ภาพวงแหวนรูปวงกลม 7



(ฉ) ภาพวงแหวนรูปวงรี 7



(ช) ภาพวงแหวนรูปวงกลม 8



(ซ) ภาพวงแหวนรูปวงรี 8

รูปที่ 5.3 ผลการทดสอบกับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังขาดหายไป ซึ่งเป็นภาพวงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีในแนวตั้งที่มีความหนา 2 ซม. ซึ่งมีขนาดย่อส่วนลงจากภาพจริง

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดความหนากับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้น

ลักษณะของภาพที่สร้าง	ภาพวงแหวนทดสอบ	ความหนาจริง (ซม.)	ความหนาที่วัดได้ (ซม.) [*]	จำนวนคู่จุด (n)
ขอบผนังสมบูรณ์	รูปวงกลม	1	0.988 ± 0.011	304
	รูปวงรีแนวตั้ง	1	0.993 ± 0.024	339
	รูปวงรีแนวนอน	1	0.993 ± 0.024	338
	รูปวงกลม	2	2.006 ± 0.015	294
	รูปวงรีแนวตั้ง	2	1.958 ± 0.029	221
	รูปวงรีแนวนอน	2	1.955 ± 0.029	213
ขอบผนังขาด	รูปวงกลม 1	1	0.992 ± 0.015	334
	รูปวงกลม 2	1	0.995 ± 0.016	286
	รูปวงกลม 3	1	1.000 ± 0.029	309
	รูปวงกลม 4	1	0.989 ± 0.012	270
	รูปวงรี 1	1	0.993 ± 0.025	335
	รูปวงรี 2	1	0.996 ± 0.027	309
	รูปวงรี 3	1	0.993 ± 0.024	322
	รูปวงรี 4	1	0.998 ± 0.028	300
	รูปวงกลม 5	2	2.004 ± 0.018	290
	รูปวงกลม 6	2	2.007 ± 0.018	230
	รูปวงกลม 7	2	2.010 ± 0.028	275
	รูปวงกลม 8	2	2.007 ± 0.016	269
	รูปวงรี 5	2	1.958 ± 0.032	218
	รูปวงรี 6	2	1.961 ± 0.033	222
	รูปวงรี 7	2	1.960 ± 0.044	212
	รูปวงรี 8	2	1.965 ± 0.035	214

* ค่า Mean ± SD

5.3 การวิเคราะห์ผลของภาพที่สร้างขึ้น

จากการตรวจสอบกับภาพที่สร้างขึ้นพบว่า เครื่องมือนี้มีความน่าเชื่อถือในการวัดสูง เนื่องจากค่าความหนาที่วัดได้จากตารางที่ 5.1 ซึ่งทำกับภาพวงแหวนที่สร้างขึ้นโดยทราบความหนามีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมาก มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ และจุดที่ทำการวัดมีจำนวนมากด้วย และการตรวจสอบกับภาพที่สร้างขึ้นแบบผนังขาดก็มีผลที่สอดคล้องกัน จึงเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับเครื่องมือนี้อีกด้วย นอกจากนี้ จากการที่ได้ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของเครื่องมือก็ให้ผลการวัดที่เหมือนกันทุกครั้ง ทำให้แน่ใจได้ว่าเครื่องมือนี้มีความแม่นยำในการวัดสูง

5.4 การทดลองกับภาพหลอดเลือดจริง

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดกับภาพหลอดเลือดจริงที่มีกำลังขยาย 40 เท่า สแกนด้วยความละเอียด 150 dpi จำนวน 27 ภาพ นอกจากนี้ยังได้คัดเลือกภาพหลอดเลือดจำนวน 8 ภาพ ซึ่งเป็นภาพหลอดเลือดที่คนวัดสามารถกำหนดบริเวณของขอบในและขอบนอกของผนังหลอดเลือดได้ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากเครื่องมือนี้ได้ระดับหนึ่ง

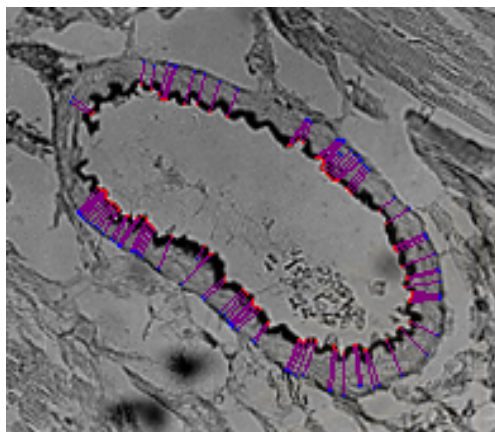
5.5 ผลการทดลองของภาพหลอดเลือดจริง

จากการทดลองวัดกับภาพหลอดเลือดจริง ภาพหลอดเลือด 1 ถึงภาพหลอดเลือด 26 ได้ผลการทดลองและผลการวัดดังรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.29 ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 5.30 เป็นภาพหลอดเลือด 27 ที่วัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดไม่ถูกต้อง ซึ่งทุกภาพที่แสดงไว้มีขนาดย่อและขยายจากภาพถ่าย ส่วนตารางที่ 5.2 เป็นผลการวัดความหนาที่วัดได้จากเครื่องมือนี้และที่วัดโดยใช้ผู้วิจัยที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ Microcirculation เป็นผู้วัด

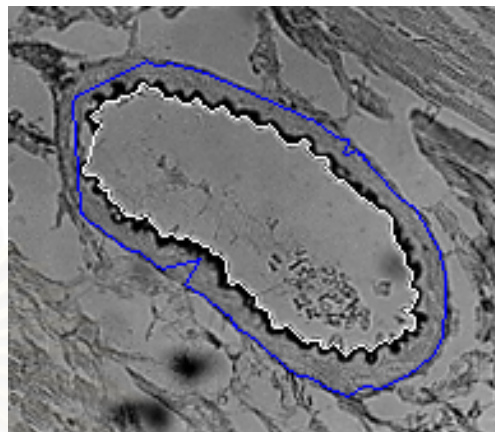
5.6 การวิเคราะห์ผลของภาพหลอดเลือดจริง

ในการทดลองวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดกับภาพหลอดเลือดจริง (ภาพหลอดเลือด 1 ถึงภาพหลอดเลือด 27) จำนวน 27 ภาพ จากรูปที่ 5.4 ถึงรูปที่ 5.30 สามารถแยกการพิจารณาได้ดังนี้

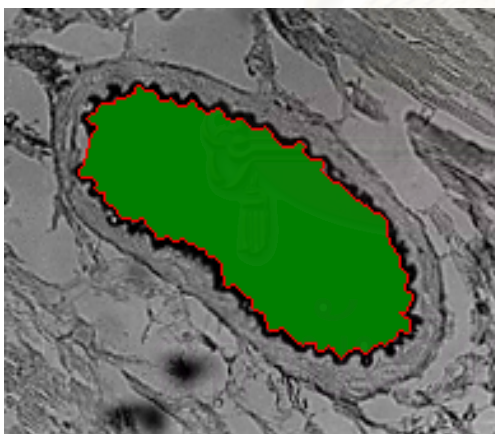
1. **ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด** โดยจะแบ่งการพิจารณาผลการวัดเป็นความหนาของผนังหลอดเลือด ความยาวขอบด้านในและพื้นที่ของช่องว่าง และความยาวขอบด้านนอกและพื้นที่ของผนังหลอดเลือด โดยมีรายละเอียดดังนี้



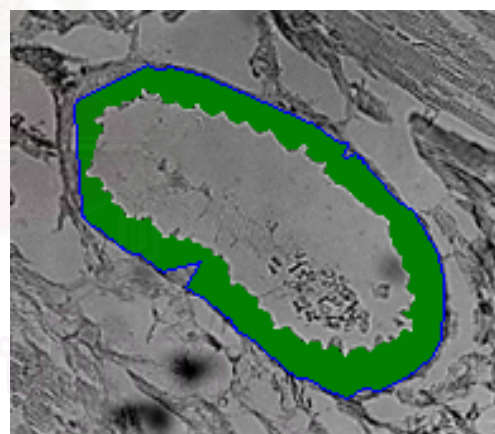
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $14.421 \mu\text{m}$
SD = 2.428 จำนวนจุด = 105



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $504.598 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $559.476 \mu\text{m}$

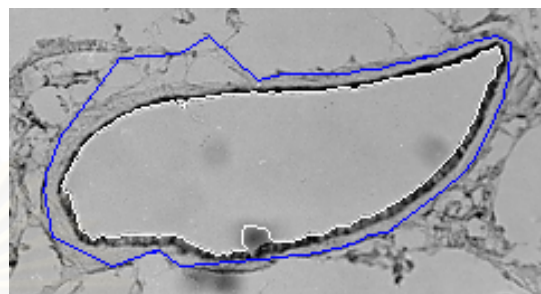
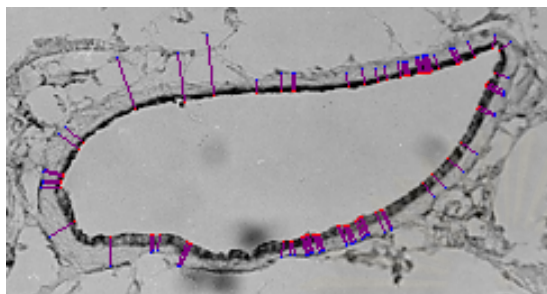


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $9,414.650 (\mu\text{m})^2$



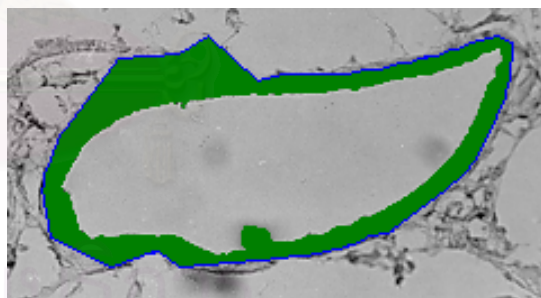
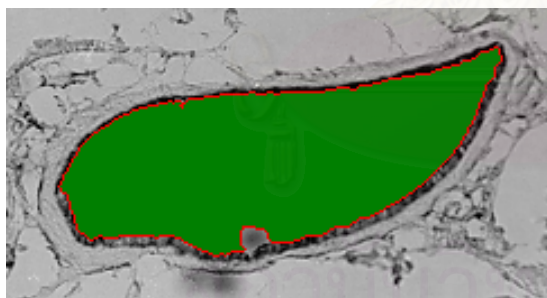
(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $6,529.169 (\mu\text{m})^2$

รูปที่ 5.4 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 1



(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $10.120 \mu\text{m}$
SD = 4.143 จำนวนจุด = 77

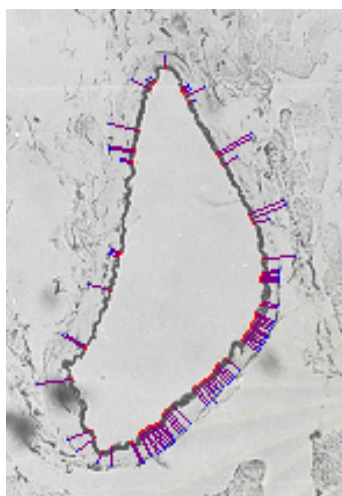
(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $606.964 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $669.909 \mu\text{m}$



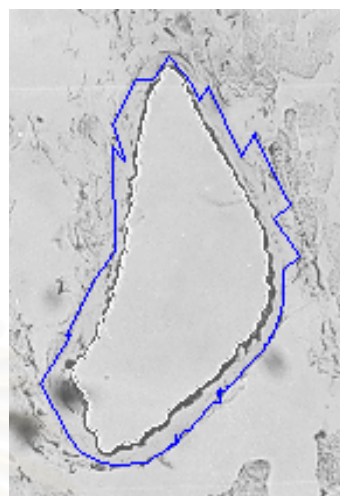
(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $13,604.893 (\mu\text{m})^2$

(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $7,367.754 (\mu\text{m})^2$

รูปที่ 5.5 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 2



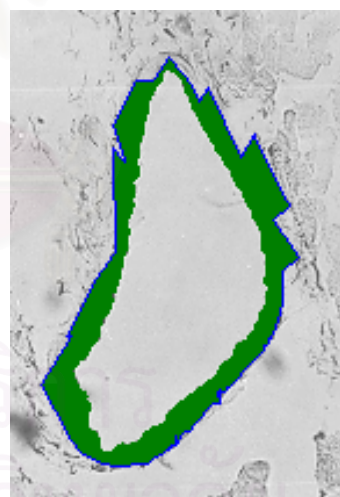
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $10.295 \mu\text{m}$
SD = 3.605 จำนวนจุด = 82



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $490.380 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $627.497 \mu\text{m}$

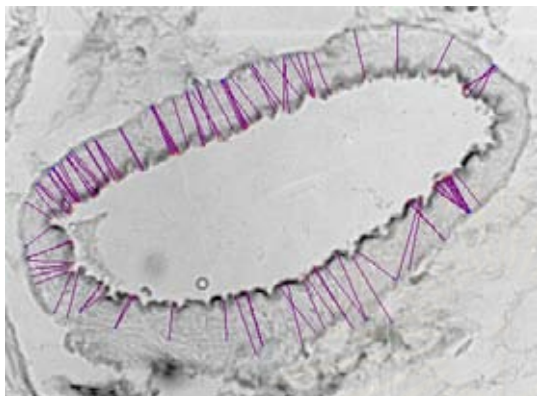


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $9,582.099 (\mu\text{m})^2$

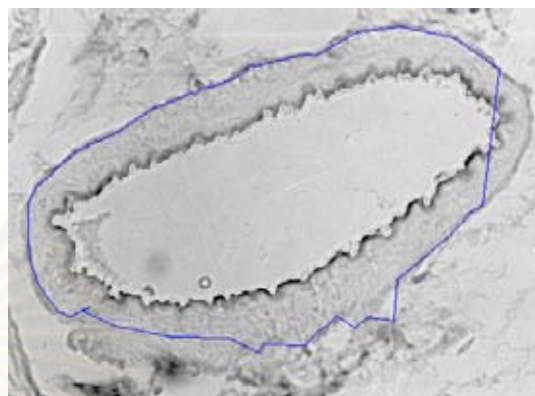


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $5,622.266 (\mu\text{m})^2$

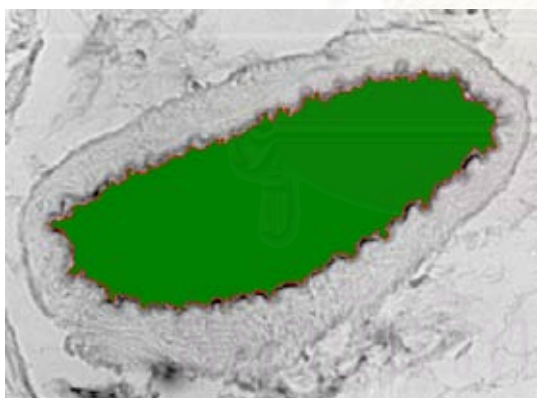
รูปที่ 5.6 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 3



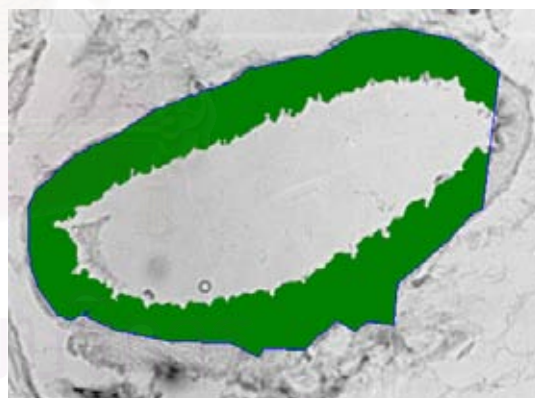
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $22.740 \mu\text{m}$
SD = 4.444 จำนวนจุด = 118



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $696.734 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $669.660 \mu\text{m}$

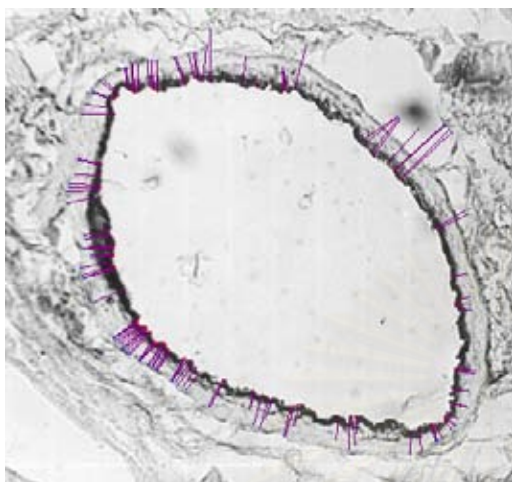


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $12,580.554 (\mu\text{m})^2$

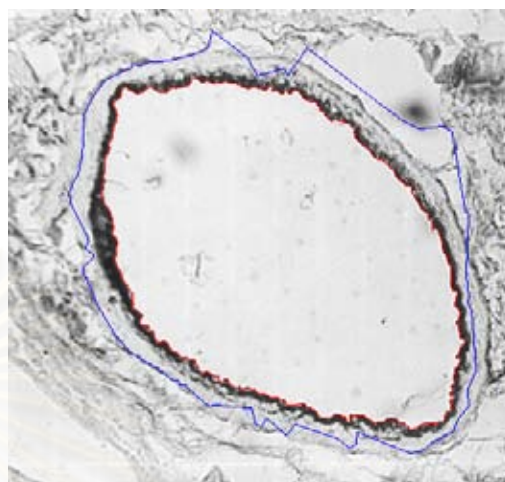


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $11,454.319 (\mu\text{m})^2$

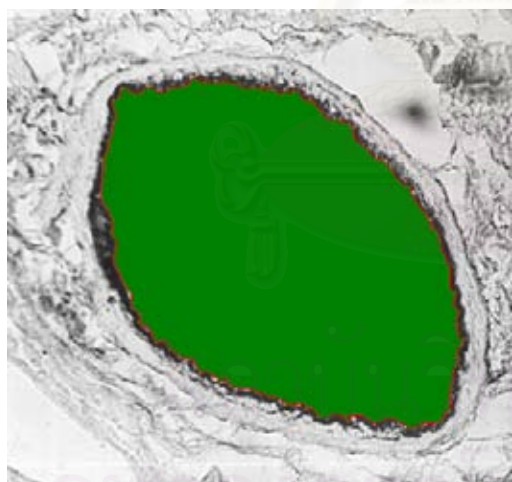
รูปที่ 5.7 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 4



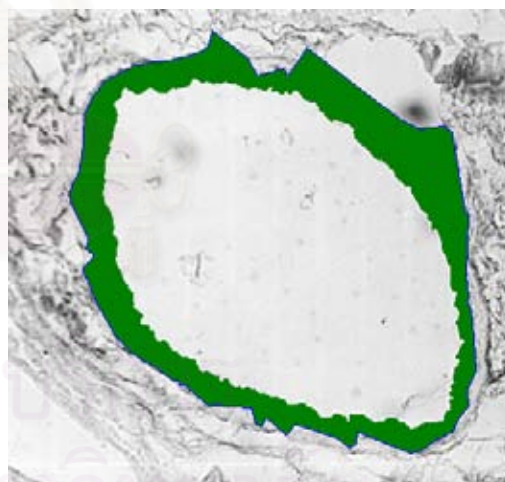
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $12.188 \mu\text{m}$
SD = 4.568 จำนวนจุด = 130



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $586.004 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $675.206 \mu\text{m}$

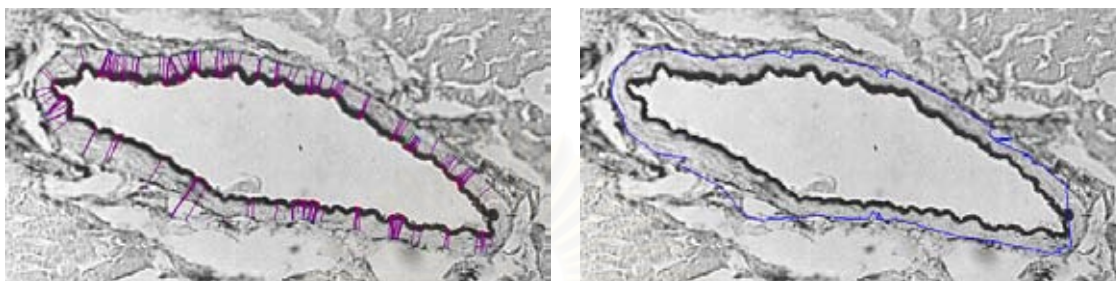


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $17,447.221 (\mu\text{m})^2$



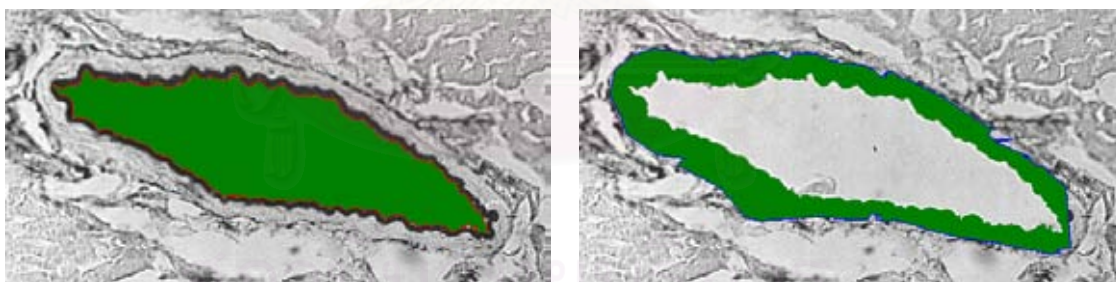
(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $6,963.580 (\mu\text{m})^2$

รูปที่ 5.8 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 5



(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $11.592 \mu\text{m}$
SD = 2.998 จำนวนจุด = 166

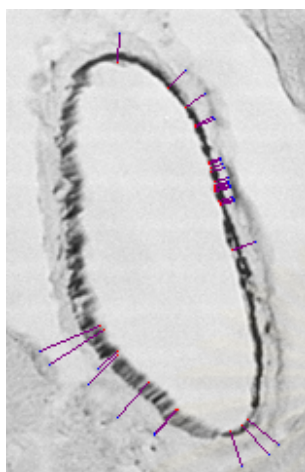
(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $583.190 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $667.526 \mu\text{m}$



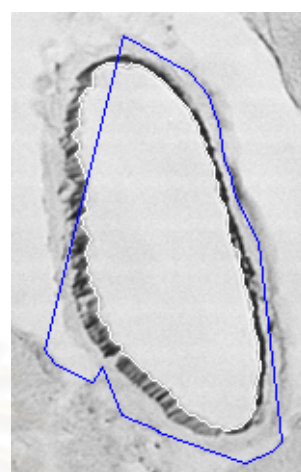
(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $8,339.196 (\mu\text{m})^2$

(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $6,618.826 (\mu\text{m})^2$

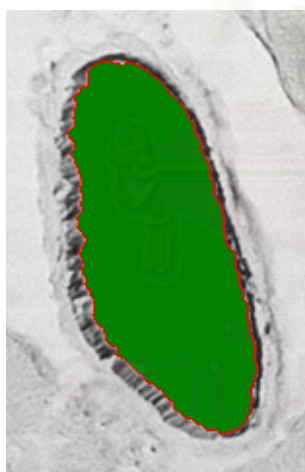
รูปที่ 5.9 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 6



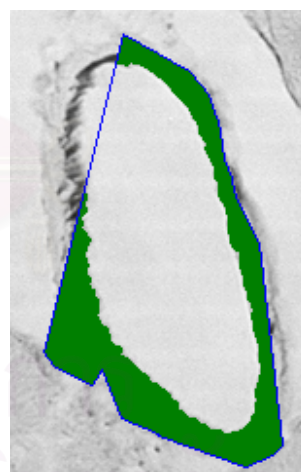
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $7.492 \mu\text{m}$
SD = 4.242 จำนวนจุด = 29



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $286.001 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $335.921 \mu\text{m}$

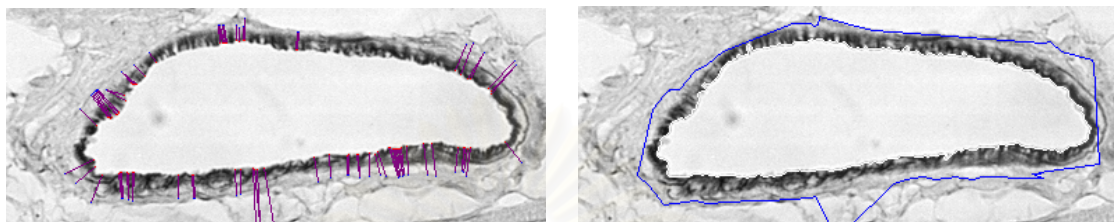


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $3,612.037 (\mu\text{m})^2$



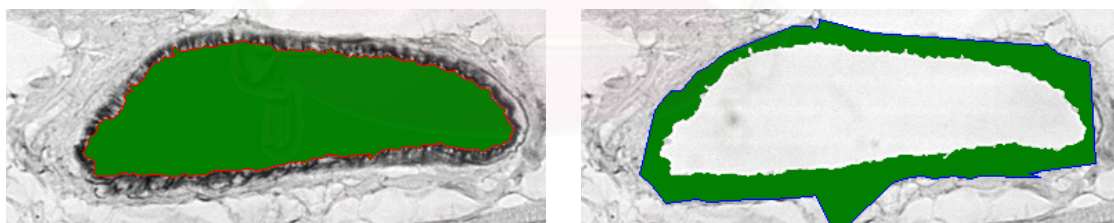
(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $1,684.259 (\mu\text{m})^2$

รูปที่ 5.10 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 7



(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $10.744 \mu\text{m}$
SD = 3.569 จำนวนจุด = 82

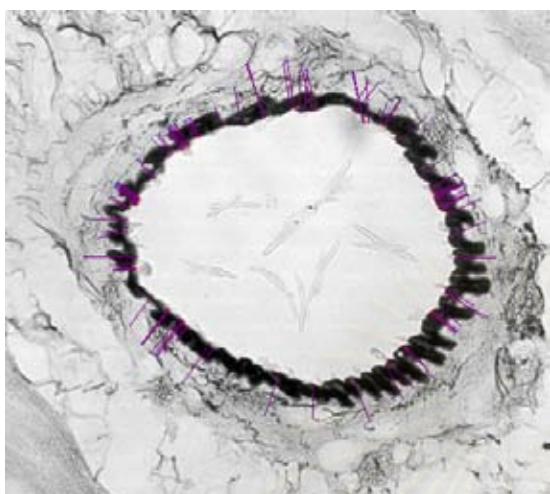
(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $452.971 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $495.044 \mu\text{m}$



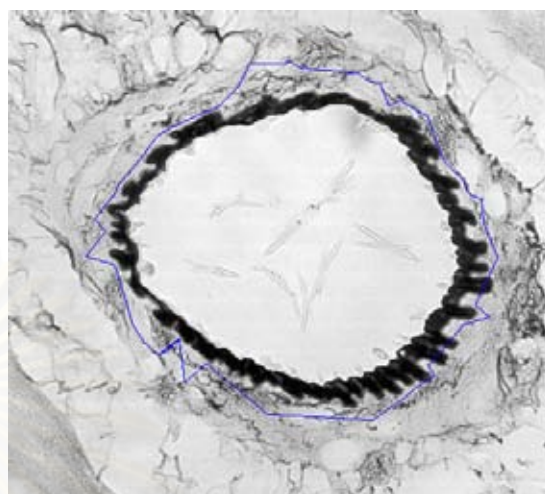
(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $6,410.185 (\mu\text{m})^2$

(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $4,114.506 (\mu\text{m})^2$

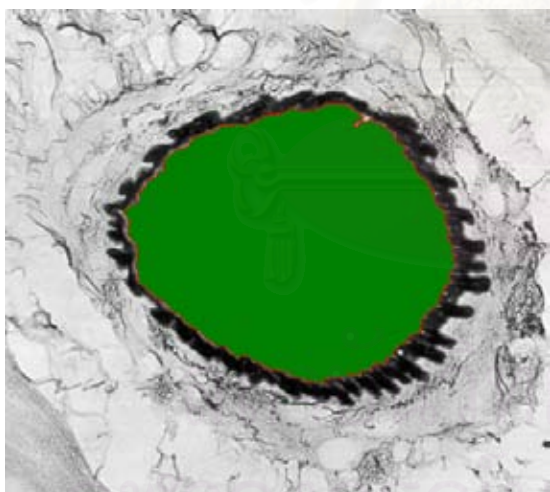
รูปที่ 5.11 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 8



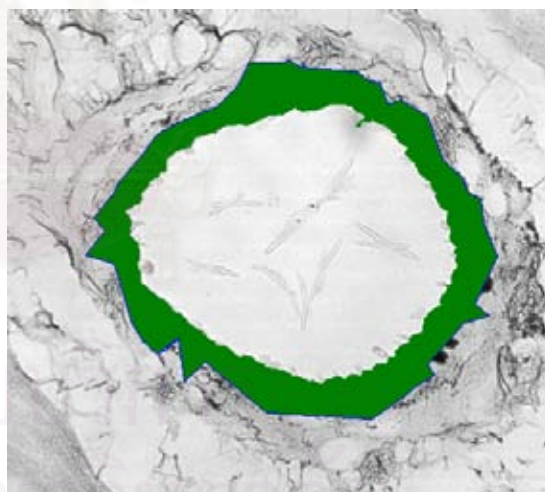
(ก) จุดจุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $15.869 \mu\text{m}$
SD = 4.487 จำนวนจุดจุด = 101



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $523.662 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $679.822 \mu\text{m}$

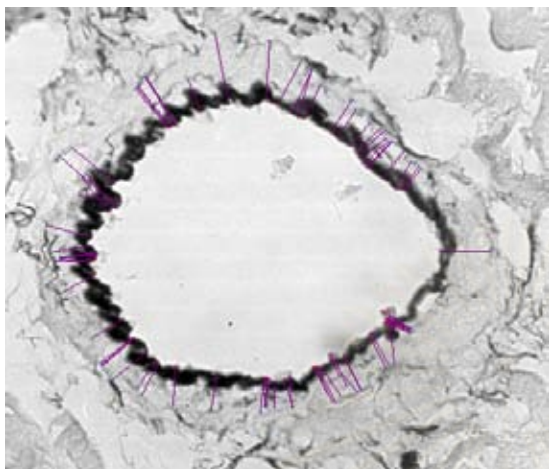


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $14,900.924 (\mu\text{m})^2$

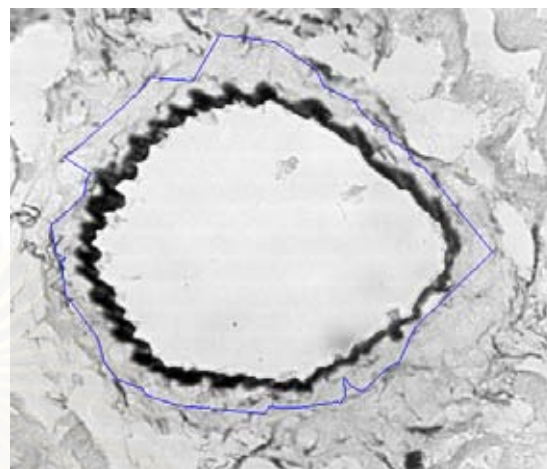


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $8,272.530 (\mu\text{m})^2$

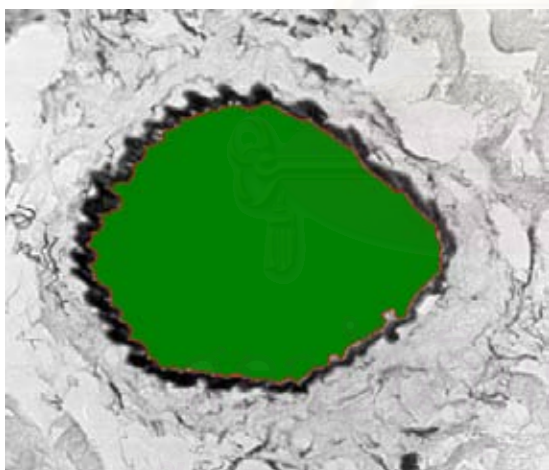
รูปที่ 5.12 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 9



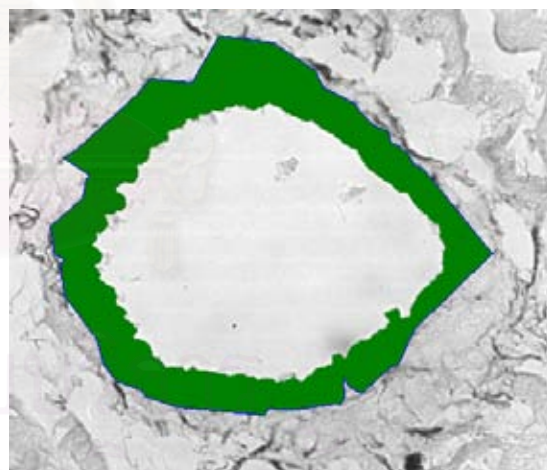
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $18.906 \mu\text{m}$
SD = 4.902 จำนวนจุด = 73



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $555.949 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $668.980 \mu\text{m}$

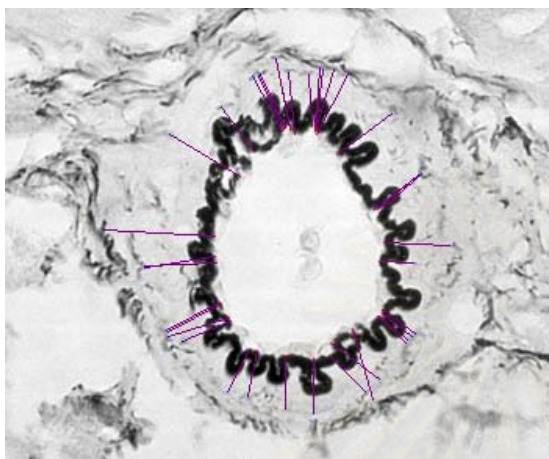


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $15,434.875 (\mu\text{m})^2$

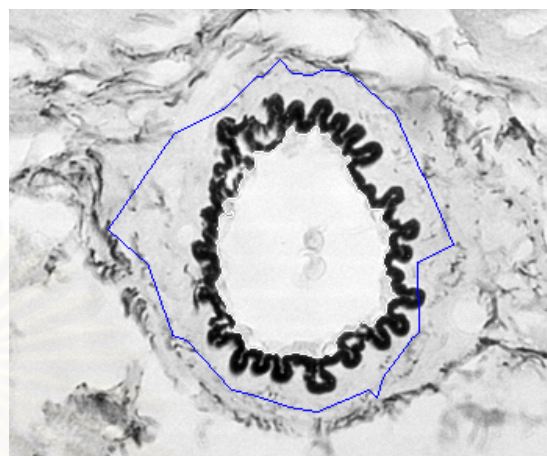


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $9,990.122 (\mu\text{m})^2$

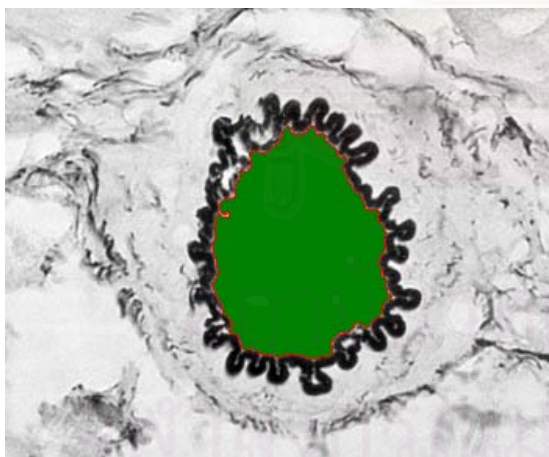
รูปที่ 5.13 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 10



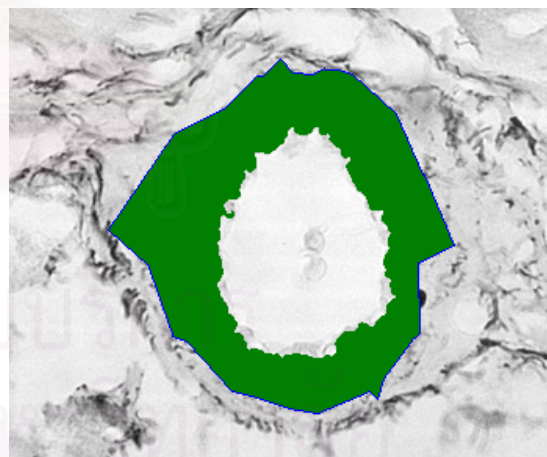
(ก) จุดจุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $20.986 \mu\text{m}$
SD = 5.032 จำนวนจุดจุด = 37



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $289.738 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $407.217 \mu\text{m}$

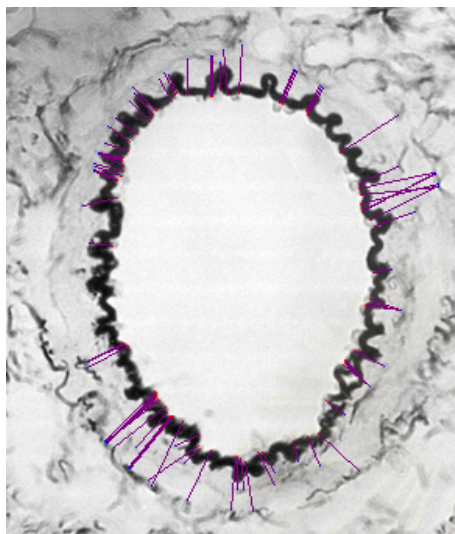


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $3,655.247 (\mu\text{m})^2$

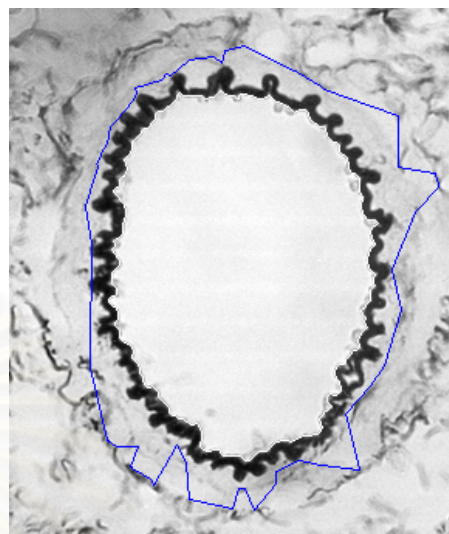


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $6,333.641 (\mu\text{m})^2$

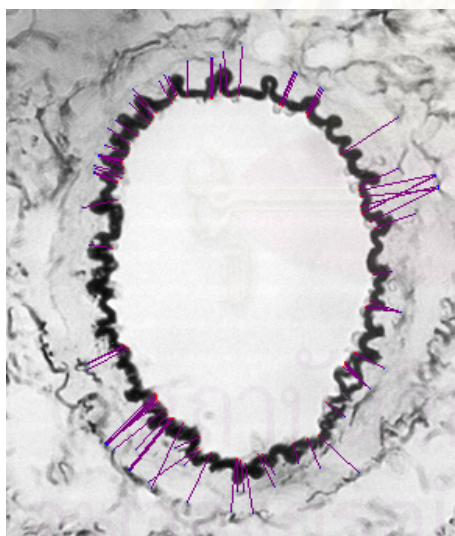
รูปที่ 5.14 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 11



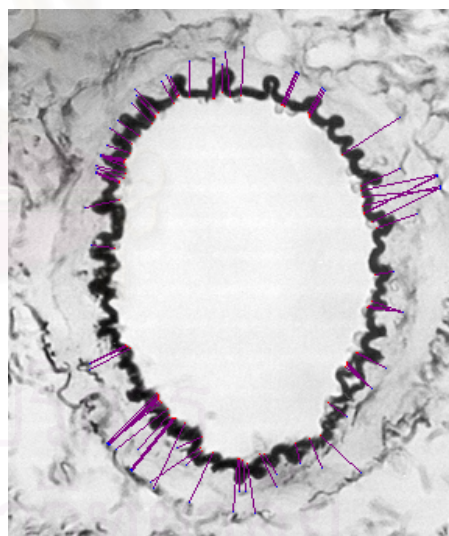
(ก) จุดจุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $15.094 \mu\text{m}$
SD = 6.551 จำนวนจุดจุด = 82



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $431.582 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $570.007 \mu\text{m}$

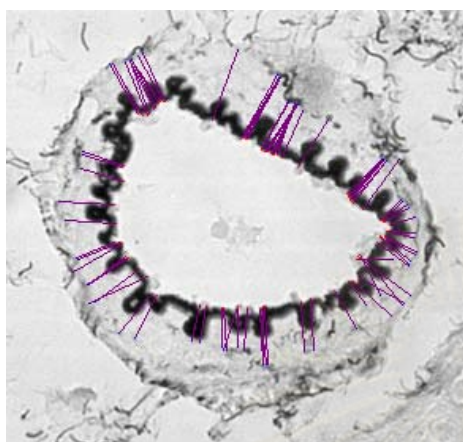


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $9,389.505 (\mu\text{m})^2$

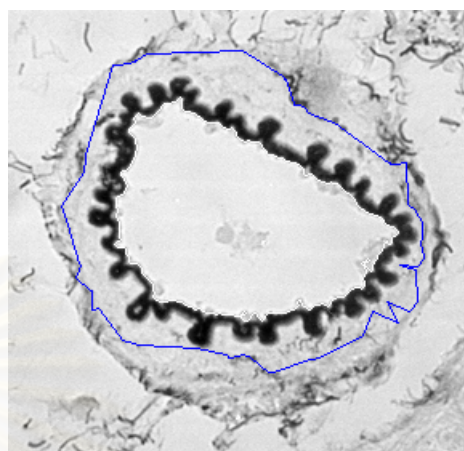


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $5,678.086 (\mu\text{m})^2$

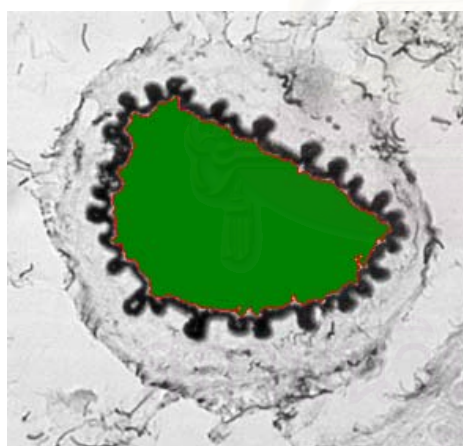
รูปที่ 5.15 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 12



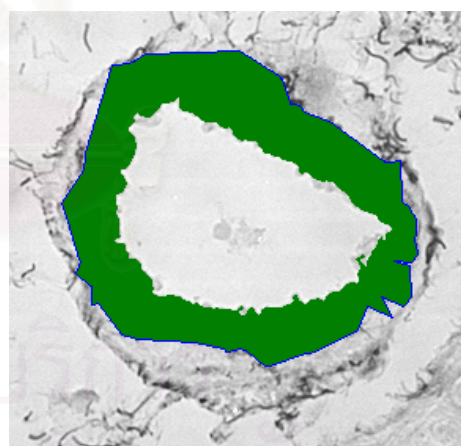
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $17.518 \mu\text{m}$
SD = 3.922 จำนวนจุด = 85



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $341.839 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $442.409 \mu\text{m}$

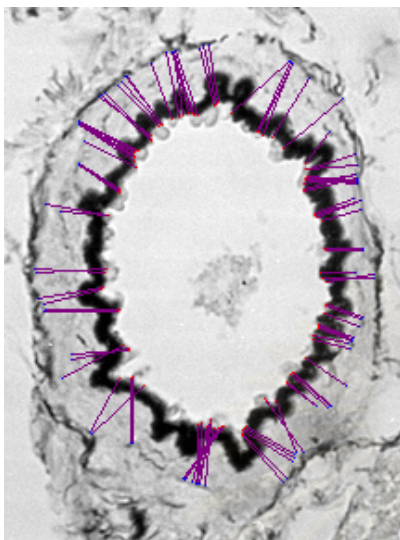


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $4,615.432 (\mu\text{m})^2$

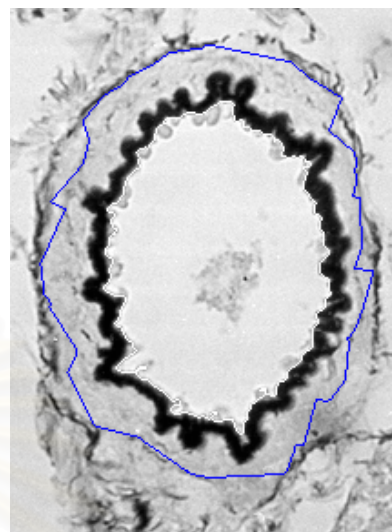


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $5,612.962 (\mu\text{m})^2$

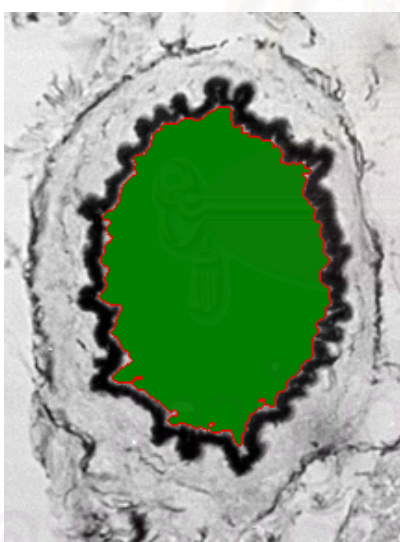
รูปที่ 5.16 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 13



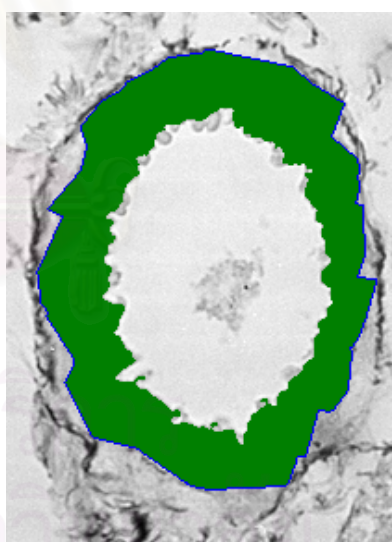
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $17.106 \mu\text{m}$
SD = 3.366 จำนวนจุด = 101



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $359.807 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $422.433 \mu\text{m}$

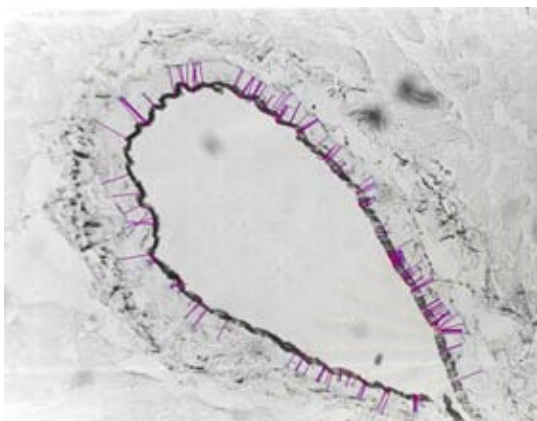


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $4,787.654 (\mu\text{m})^2$

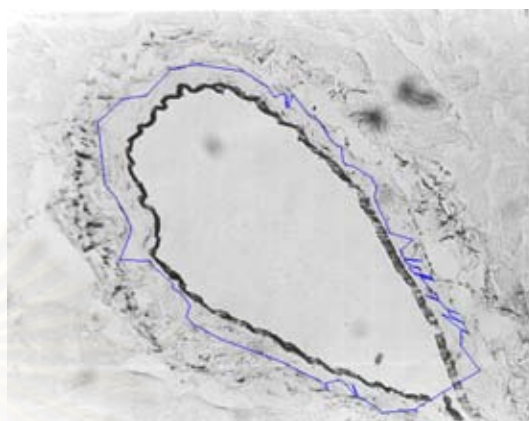


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $5,351.542 (\mu\text{m})^2$

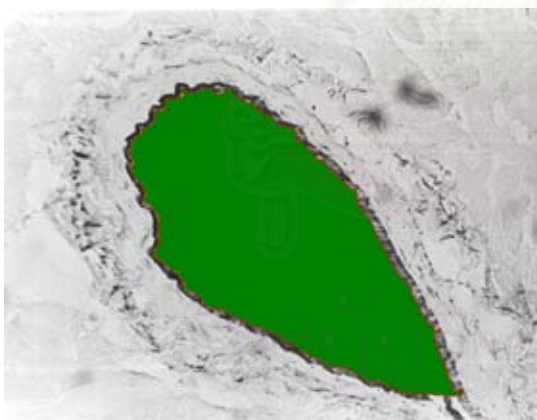
รูปที่ 5.17 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 14



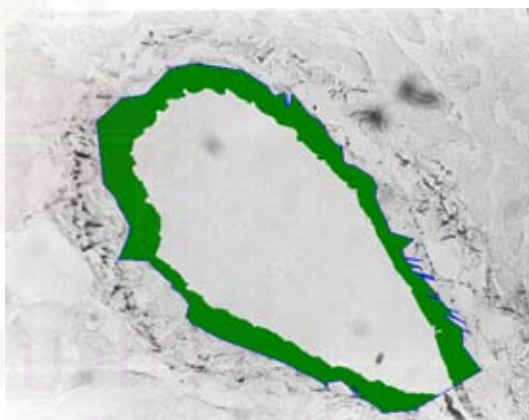
(ก) จุดจุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $12.982 \mu\text{m}$
SD = 4.368 จำนวนจุดจุด = 172



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $727.105 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $996.036 \mu\text{m}$



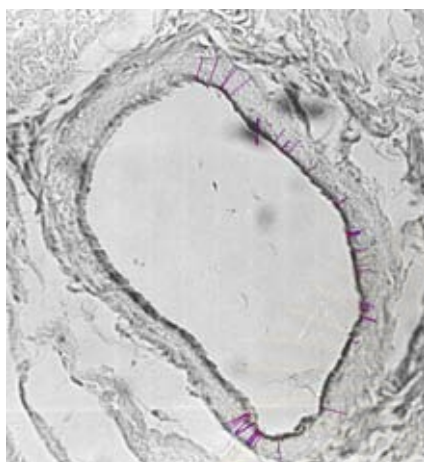
(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $20,491.664 (\mu\text{m})^2$



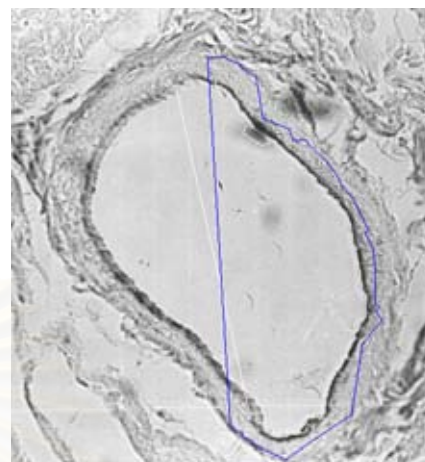
(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $9,232.715 (\mu\text{m})^2$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

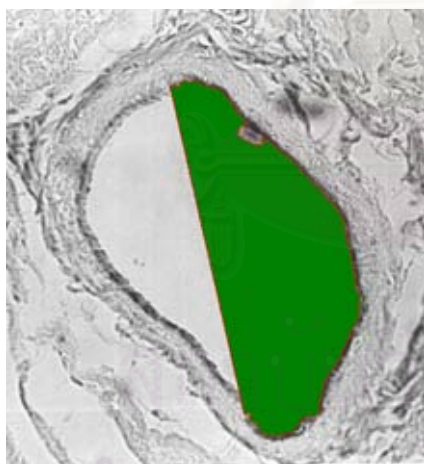
รูปที่ 5.18 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 15



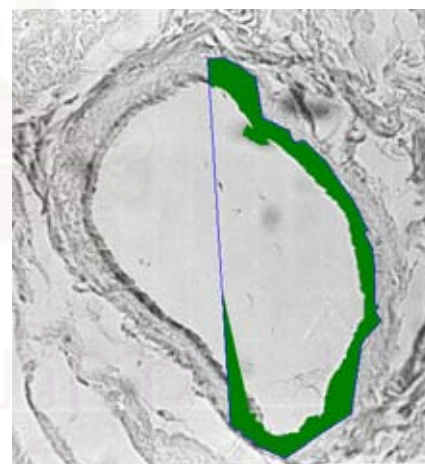
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $10.725 \mu\text{m}$
SD = 3.276 จำนวนจุด = 42



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $555.530 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $574.269 \mu\text{m}$

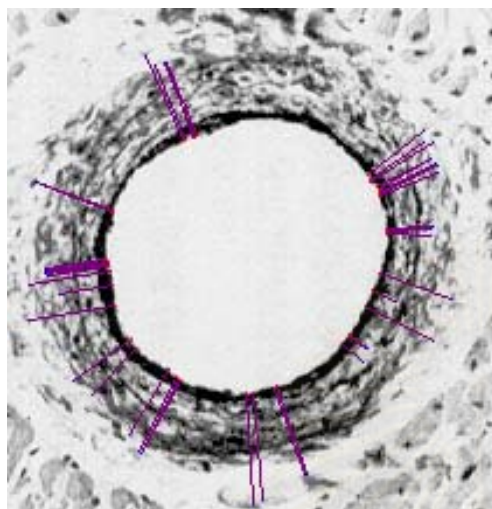


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $11,781.480 (\mu\text{m})^2$

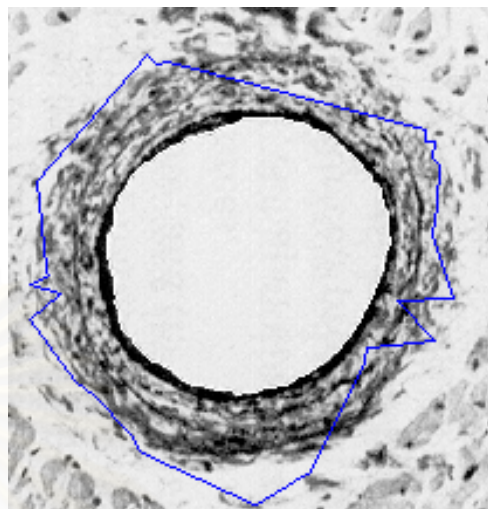


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $2,675.926 (\mu\text{m})^2$

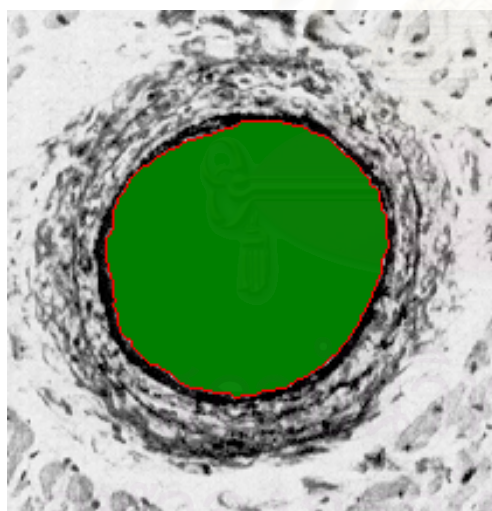
รูปที่ 5.19 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 16



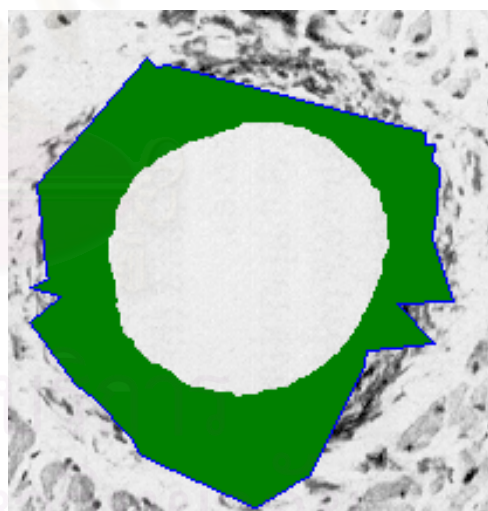
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $16.405 \mu\text{m}$
SD = 4.987 จำนวนจุด = 41



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $220.780 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $377.393 \mu\text{m}$

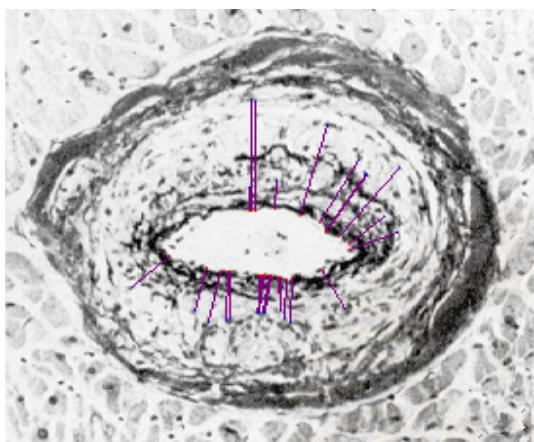


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $3,311.419 (\mu\text{m})^2$

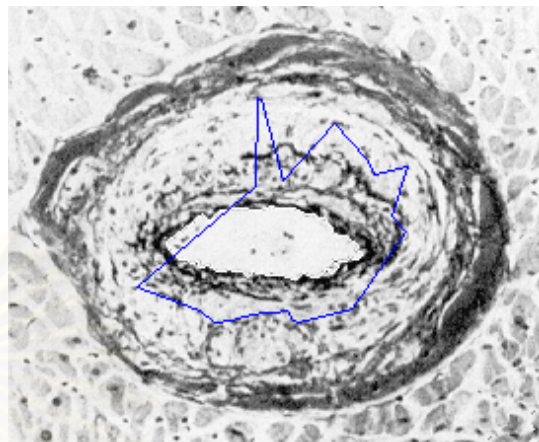


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $3,3982.407 (\mu\text{m})^2$

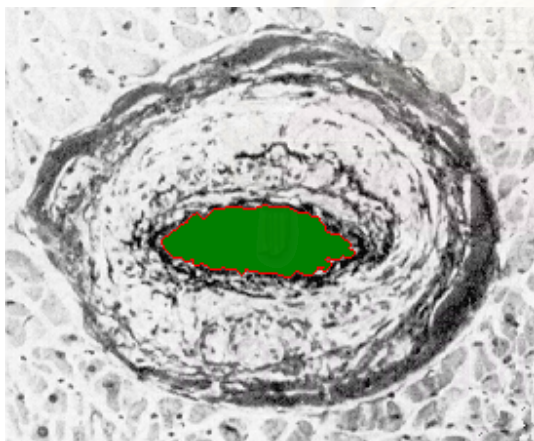
รูปที่ 5.20 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 17



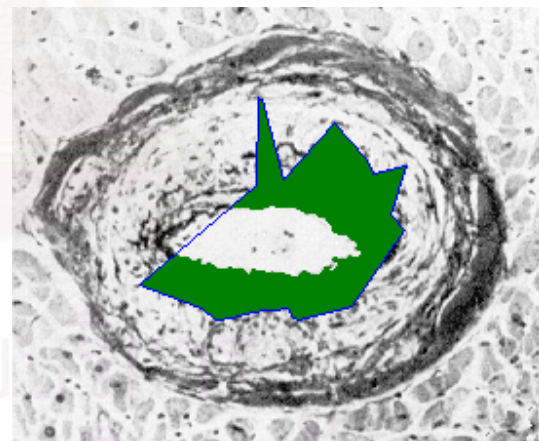
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $15.049 \mu\text{m}$
SD = 6.837 จำนวนจุด = 27



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $144.504 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $267.842 \mu\text{m}$

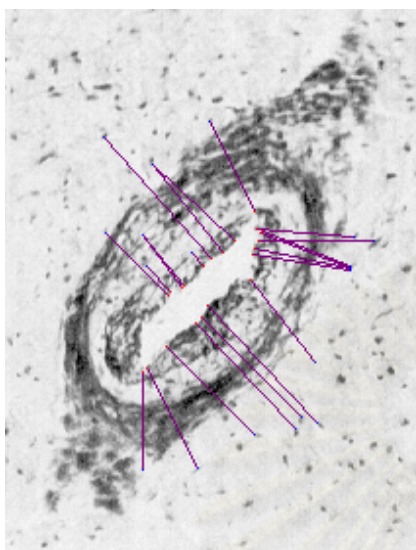


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $739.815 (\mu\text{m})^2$

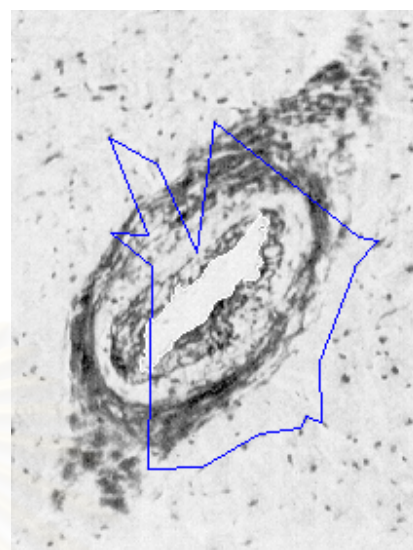


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $1,720.370 (\mu\text{m})^2$

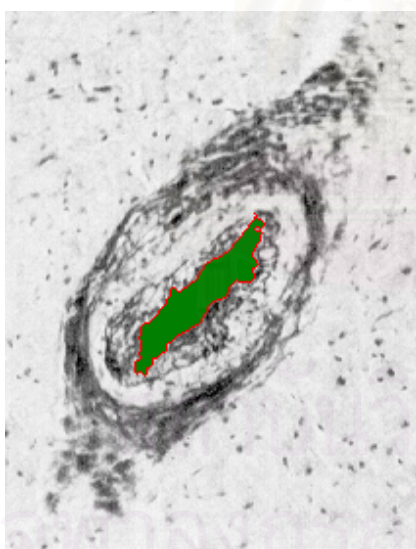
รูปที่ 5.21 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 18



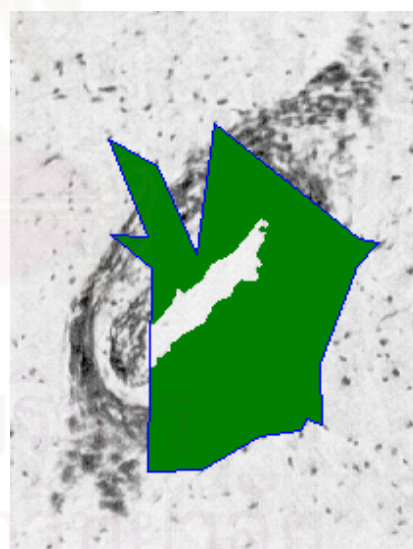
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $29.012 \mu\text{m}$
SD = 9.998 จำนวนจุด = 22



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $145.123 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $379.817 \mu\text{m}$

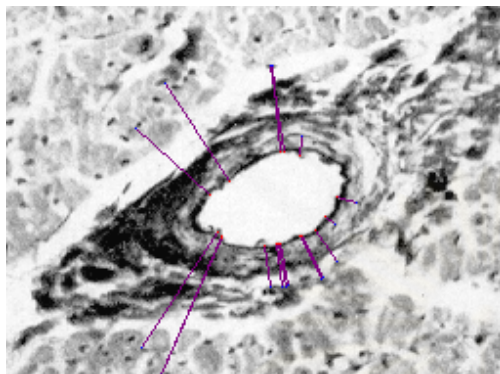


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $407.407 (\mu\text{m})^2$

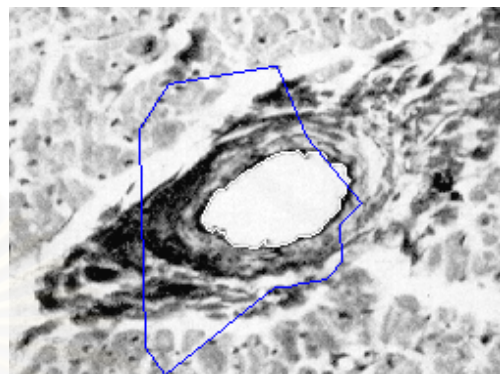


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $3,905.555 (\mu\text{m})^2$

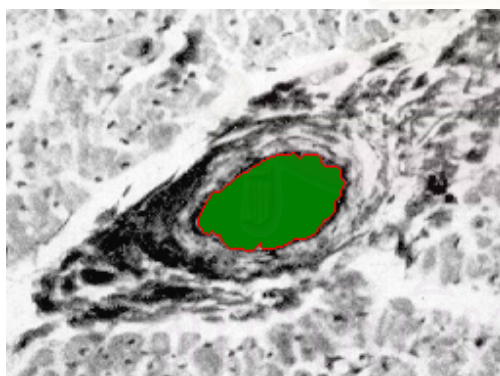
รูปที่ 5.22 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 19



(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $19.809 \mu\text{m}$
SD = 13.229 จำนวนจุด = 17



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $119.981 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $253.733 \mu\text{m}$

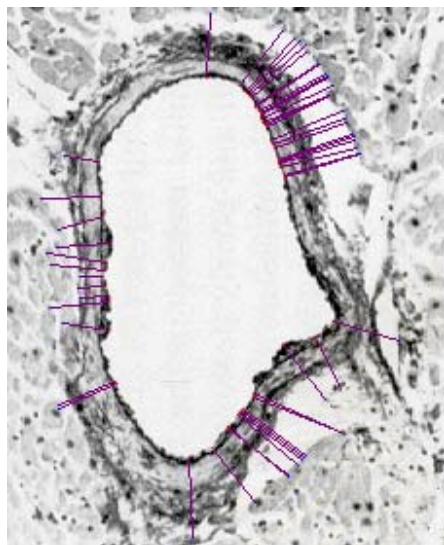


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $756.790 (\mu\text{m})^2$

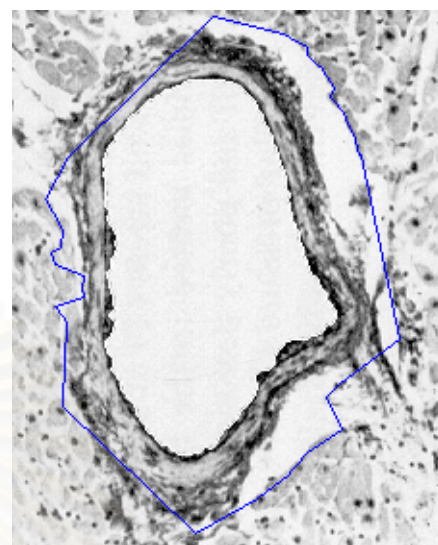


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $2,865.123 (\mu\text{m})^2$

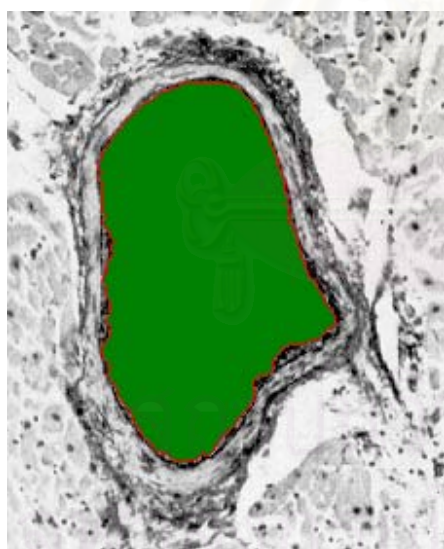
รูปที่ 5.23 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 20



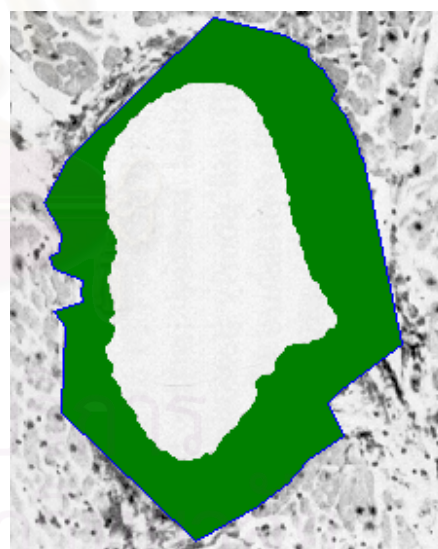
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $19.534 \mu\text{m}$
SD = 4.393 จำนวนจุด = 50



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $306.619 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $429.485 \mu\text{m}$

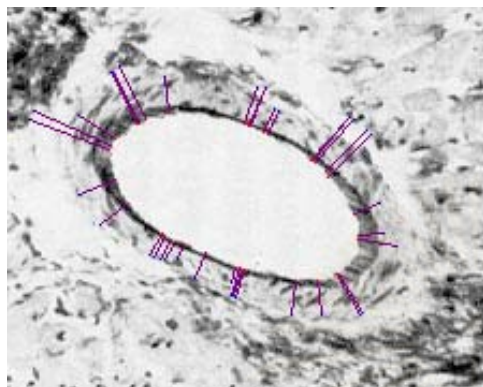


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $4,846.604 (\mu\text{m})^2$

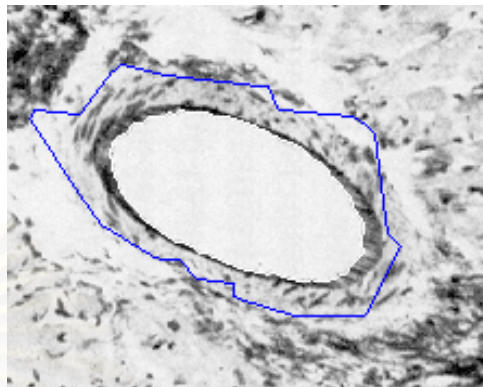


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $5,509.876 (\mu\text{m})^2$

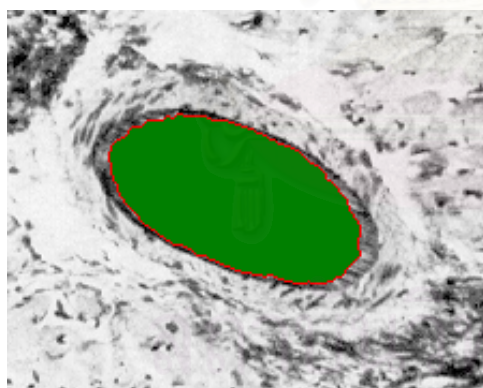
รูปที่ 5.24 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 21



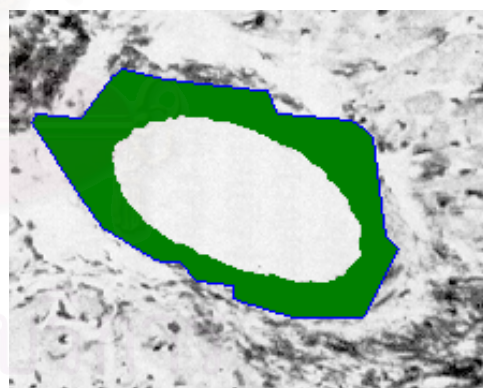
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $10.460 \mu\text{m}$
SD = 4.474 จำนวนจุด = 36



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $182.519 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $273.923 \mu\text{m}$

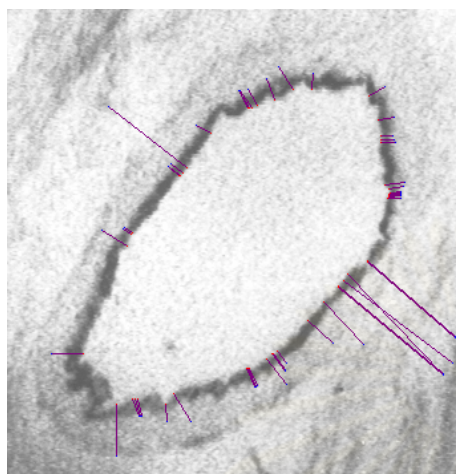


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $1,889.197 (\mu\text{m})^2$

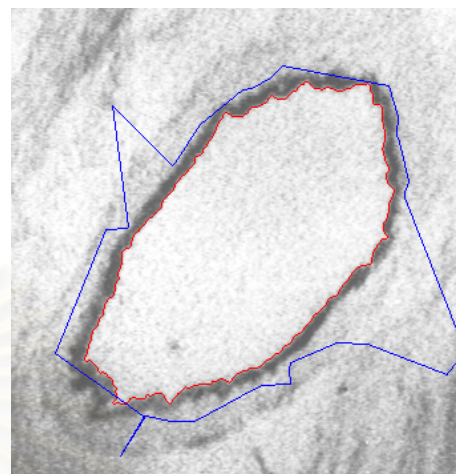


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $2,070.370 (\mu\text{m})^2$

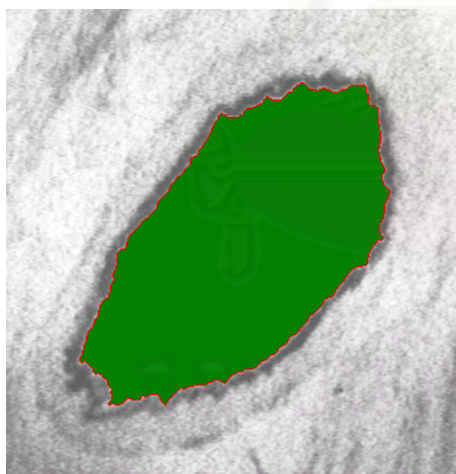
รูปที่ 5.25 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 22



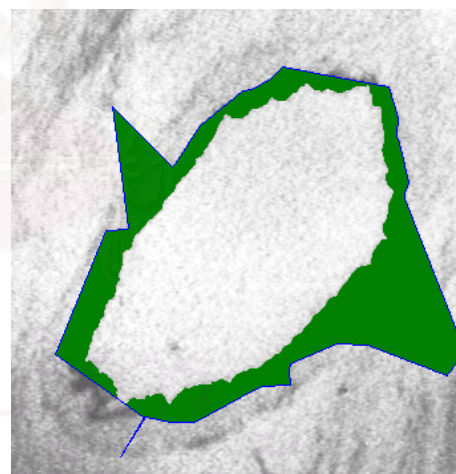
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $14.795 \mu\text{m}$
SD = 16.227 จำนวนจุด = 49



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $467.509 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $651.850 \mu\text{m}$

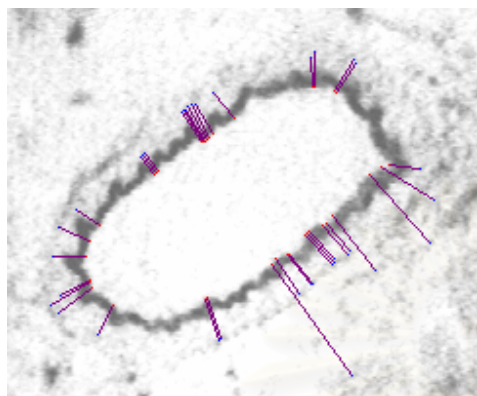


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $10,292.283 (\mu\text{m})^2$

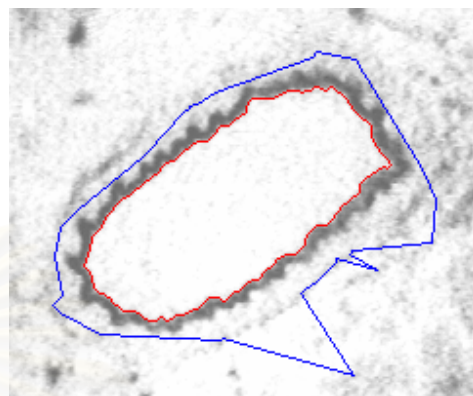


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $5,871.913 (\mu\text{m})^2$

รูปที่ 5.26 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 23



(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $11.796 \mu\text{m}$
SD = 5.906 จำนวนจุด = 36



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $250.278 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $380.267 \mu\text{m}$

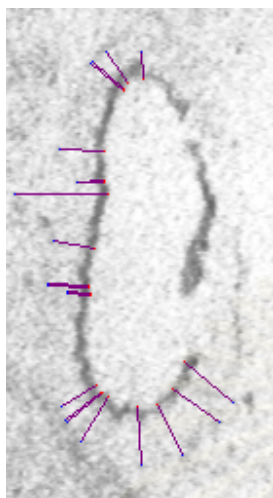


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $3,116.975 (\mu\text{m})^2$

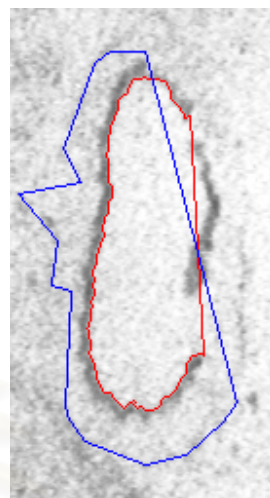


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $2,954.938 (\mu\text{m})^2$

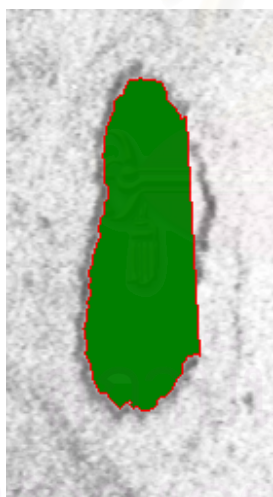
รูปที่ 5.27 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 24



(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $12.665 \mu\text{m}$
SD = 4.604 จำนวนจุด = 21



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $239.949 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $323.294 \mu\text{m}$

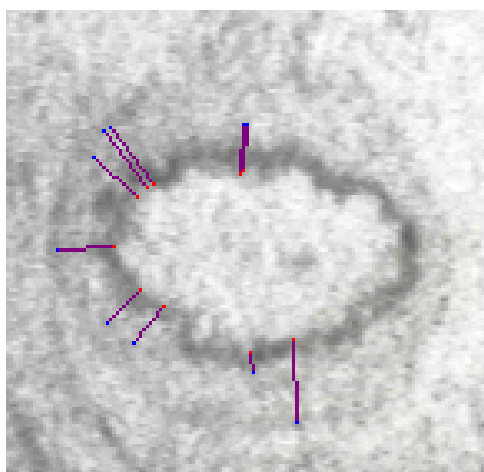


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $2,279.321 (\mu\text{m})^2$

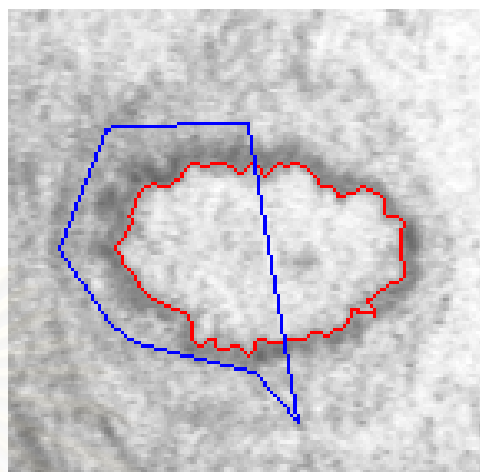


(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $1,965.740 (\mu\text{m})^2$

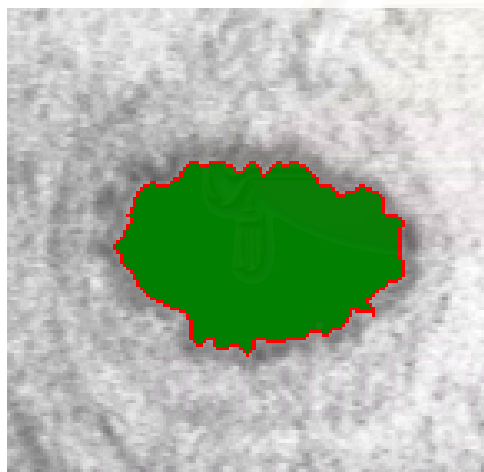
รูปที่ 5.28 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 25



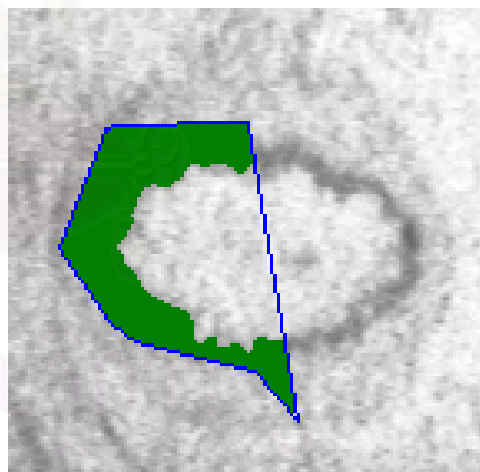
(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $9.225 \mu\text{m}$
SD = 2.927 จำนวนจุด = 10



(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $154.067 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $155.918 \mu\text{m}$

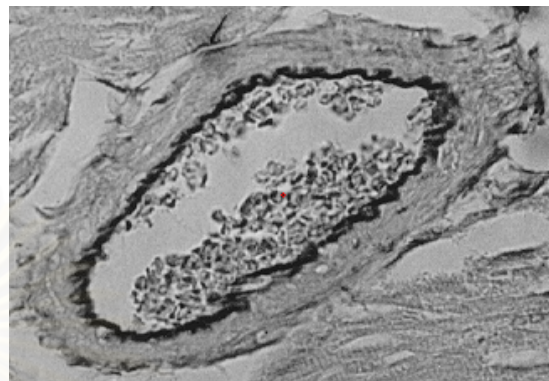
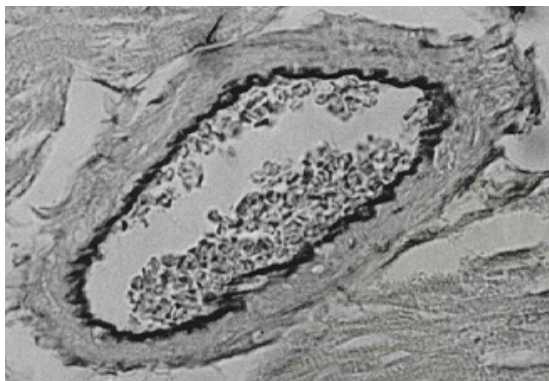


(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $1,061.728 (\mu\text{m})^2$



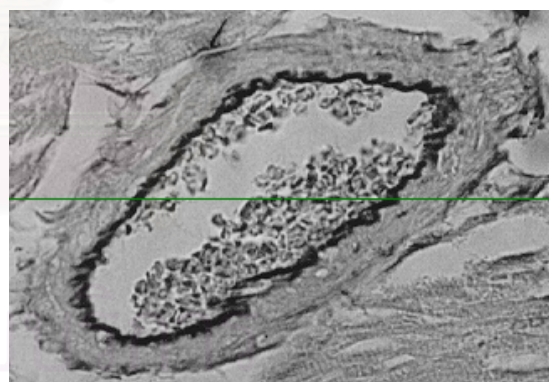
(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $170.370 (\mu\text{m})^2$

รูปที่ 5.29 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือด 26



(ก) จุดที่ใช้ในการวัดความหนา
ความหนาที่วัดได้ = $0.000 \mu\text{m}$
SD = 0.000 จำนวนจุด = 0

(ข) เส้นแสดงรูปร่างของขอบด้านในและ
ขอบด้านนอก
ความยาวขอบด้านใน = $3.143 \mu\text{m}$
ความยาวขอบด้านนอก = $0.000 \mu\text{m}$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ค) พื้นที่ของช่องว่าง = $0.309 (\mu\text{m})^2$

(ง) พื้นที่ของผนังหลอดเลือด = $100.309 (\mu\text{m})^2$

รูปที่ 5.30 ผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดที่ไม่ถูกต้องของภาพหลอดเลือด 27

ตารางที่ 5.2 ผลการวัดความหนาของภาพหลอดเลือดจริงที่วัดโดยแบบใช้คนเป็นผู้วัดและแบบอัตโนมัติ

ภาพหลอดเลือด	แบบใช้คนเป็นผู้วัด			แบบอัตโนมัติ	
	ค่าความหนาที่วัดได้จากผู้วัด A (μm) *	ค่าความหนาที่วัดได้จากผู้วัด B (μm) *	จำนวนคู่จุด (n)	ค่าความหนาที่วัดได้ (μm) *	จำนวนคู่จุด (n)
ภาพหลอดเลือด 1	20.33 \pm 4.63	20.00 \pm 4.73	6	14.421 \pm 2.428	105
ภาพหลอดเลือด 2	14.67 \pm 3.73	15.00 \pm 3.10	6	10.120 \pm 4.143	77
ภาพหลอดเลือด 3	12.33 \pm 2.97	13.67 \pm 3.45	6	10.295 \pm 3.605	82
ภาพหลอดเลือด 4	27.00 \pm 3.84	28.33 \pm 3.97	6	22.740 \pm 4.444	118
ภาพหลอดเลือด 23	24.00 \pm 3.58	22.33 \pm 3.20	6	14.795 \pm 16.227	49
ภาพหลอดเลือด 24	17.33 \pm 1.03	15.00 \pm 1.10	6	11.796 \pm 5.906	36
ภาพหลอดเลือด 25	17.67 \pm 2.10	17.00 \pm 3.20	6	12.665 \pm 4.604	21
ภาพหลอดเลือด 26	16.67 \pm 1.68	14.33 \pm 2.08	6	9.225 \pm 2.927	10

ความหนาของผนังหลอดเลือด สำหรับภาพหลอดเลือดที่มีขอบของผนังหลอดเลือดชัดเจน เช่นในภาพหลอดเลือด 1 (รูปที่ 5.4) การคัดเลือกคู่จุดที่ใช้ในการวัดความหนาจะทำได้ดีและมีจำนวนมาก ทำให้ค่าความหนาที่วัดได้น่าเชื่อถือ ส่วนในภาพหลอดเลือด 2 ถึงภาพหลอดเลือด 6 (รูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.9) ถึงแม้ว่าภาพหลอดเลือดเหล่านี้จะมีขอบนอกที่ไม่ค่อยชัดเจน ก็ยังคงคัดเลือกคู่จุดได้ค่อนข้างดีและมีจำนวนมาก ทำให้ค่าความหนาที่วัดได้ยังคงน่าเชื่อถือ สำหรับภาพหลอดเลือดที่ไม่ชัดเจนและมีปัญหาที่แม้กระทั่งคนวัดก็ไม่สามารถกำหนดบริเวณขอบของผนังหลอดเลือดได้อย่างชัดเจน พบว่าเครื่องมือจะคัดเลือกคู่จุดผิดพลาดไป ทำให้ค่าความหนาที่วัดได้ไม่น่าเชื่อถือ ภาพหลอดเลือดประเภทนี้ได้แก่ ภาพหลอดเลือด 7 ถึงภาพหลอดเลือด 26 (รูปที่ 5.10 ถึงรูปที่ 5.29) แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การวัดความหนา มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น คู่จุดที่เครื่องมือเลือกมาให้อย่างอัตโนมัตินี้ก็ยังสามารถนำมาให้คนวัดพิจารณาเลือกใช้ หรือเปลี่ยนแปลงคู่จุดในการวัดโดยใช้การวัดแบบกึ่งอัตโนมัติได้ หรือเลือกให้การวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัดแทน

ความยาวของขอบด้านในและพื้นที่ของช่องว่าง จากลักษณะของภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ส่วนใหญ่จะมีขอบในของหลอดเลือดที่ค่อนข้างชัดเจนและต่อเนื่องกัน ทำให้เส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดที่หาได้มีความถูกต้องสูง ถึงแม้ว่าจะมีบางภาพที่ขอบในของหลอดเลือดขาดหายไปแต่เส้น

* ค่า Mean \pm SD

ขอบด้านในที่หาได้ยังคงใกล้เคียงขอบด้านในของหลอดเลือดมาก จึงส่งผลให้ความยาวของขอบด้านในของผนังหลอดเลือดและพื้นที่ของช่องว่างที่คำนวณได้อยู่ในเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือ ดังจะเห็นได้จากในภาพหลอดเลือด 1 (รูปที่ 5.4) ที่แม้ว่าขอบในจะมีความชัดเจนแต่มีบางส่วนของขอบขาดหายไป แต่ความยาวขอบด้านในของผนังหลอดเลือดและพื้นที่ของช่องว่างที่คำนวณได้ยังคงมีความน่าเชื่อถือมากกว่าภาพหลอดเลือด 16 (รูปที่ 5.19) และภาพหลอดเลือด 25 (รูปที่ 5.28) ซึ่งภาพหลอดเลือด 16 มีขอบในที่ค่อนข้างชัดเจน แต่สีของขอบในไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำเป็นภาพลักษณะฐานสองก็มิผลให้ขอบในไม่ต่อเนื่องกัน ส่วนภาพหลอดเลือด 25 นั้นเป็นหลอดเลือดที่มีขอบในขาดหายไปมากกว่า 1 บริเวณ ทำให้มีการเชื่อมต่อขอบในที่ขาดหายไปนี้ด้วยเส้นตรง และจุดที่อยู่บนขอบด้านในส่วนหนึ่งก็ถูกละเลยไม่ถูกนำมาพิจารณา

ความยาวของขอบด้านนอกและพื้นที่ของผนังหลอดเลือด เนื่องจากลักษณะของขอบนอกของทุกภาพไม่ชัดเจนและไม่ต่อเนื่องเหมือนขอบใน และในงานวิจัยนี้เส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดได้มาจากการเชื่อมต่อจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกด้วยเส้นตรง ทำให้ได้เส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดที่หยาบและยังไม่ถูกต้องนัก ทำให้ความยาวของขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดและพื้นที่ของผนังหลอดเลือดที่คำนวณได้ยังได้ผลไม่เป็นที่น่าเชื่อนัก

อย่างไรก็ตาม ในการวัดแบบอัตโนมัตินั้นพบว่ายังมีภาพหลอดเลือดบางภาพที่วัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดได้ไม่ถูกต้อง เช่น ภาพหลอดเลือด 27 (รูปที่ 5.30) ซึ่งเป็นภาพหลอดเลือดที่มีปัญหา กล่าวคือ มีกลุ่มไขมันขนาดใหญ่ในบริเวณช่องว่าง ซึ่งตัวกรองมัธยฐานก็ไม่สามารถกำจัดกลุ่มไขมันที่มีขนาดใหญ่นี้ได้ เมื่อทำเป็นภาพลักษณะฐานสองแล้วก็ยังคงมีจุดภาพของกลุ่มไขมันนี้อยู่ ทำให้ผลที่ได้จากการหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดผิดพลาดไปเป็นส่วนขอบของกลุ่มไขมันแทน และมีผลทำให้การวัดโครงสร้างอื่นทุกอย่างผิดพลาดด้วย

2. การเปรียบเทียบผลการวัดความหนาระหว่างการวัดโดยใช้คนวัดกับเครื่องมือ ซึ่งในตารางที่ 5.2 เป็นการแสดงผลการทดลองที่วัดโดยใช้คนวัดเทียบกับเครื่องมือ จะเห็นว่าสำหรับภาพหลอดเลือดที่มีขอบที่ชัดเจนได้แก่ ภาพหลอดเลือด 1 (รูปที่ 5.4) ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องมือนี้มีความน่าเชื่อถือมากกว่าการวัดโดยใช้คนวัด เนื่องจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากเครื่องมือนี้ต่ำกว่าการวัดโดยใช้คนวัด อีกทั้งจำนวนคู่จุดที่เครื่องมือนี้คัดเลือกมามีจำนวนมากกว่ามากด้วย สำหรับภาพหลอดเลือด 2 ถึง ภาพหลอดเลือด 4 (รูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.7) เป็นภาพที่มีขอบนอกของหลอดเลือดไม่ค่อยชัดเจน แต่คนวัดก็สามารถกำหนดบริเวณที่เป็นขอบนอกของหลอดเลือดได้ แม้ว่าผลการวัดด้วยเครื่องมือนี้จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค่อนข้างมาก แต่จำนวนคู่จุดที่เครื่องมือนี้คัดเลือกมาได้ถึง 118 คู่จุดซึ่งมากกว่าการวัดโดยใช้คนวัดที่ได้วัดเพียง 6 คู่จุดเท่านั้น ดังนั้นค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องมือนี้ยังคงน่าเชื่อถือ

ส่วนภาพหลอดเลือดที่ไม่ชัดเจนแม้กระทั่งคนวัดก็ไม่สามารถกำหนดบริเวณขอบของหลอดเลือดได้อย่างชัดเจนได้แก่ ภาพหลอดเลือด 23 ถึง ภาพหลอดเลือด 26 (รูปที่ 5.26 ถึงรูปที่ 5.29) ค่าความหนาที่วัดได้จากเครื่องมือนี้ไม่น่าเชื่อถือ ทั้งนี้เพราะการคัดเลือกคู่จุดยังทำได้ไม่ดี ทำให้ความหนาของคู่จุดแต่ละคู่ที่วัดได้

มีความแปรปรวนมาก ส่งผลให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าสูงด้วย อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเห็นว่าโดยทั่วไปแล้วไม่ควรเปรียบเทียบผลการวัดจากเครื่องมือกับการวัดโดยคน เนื่องจากการวัดที่ทำโดยคนไม่แน่นอนและมีความแปรปรวนสูงมาก ซึ่งอาจได้ค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละครั้งที่ทำการวัด กล่าวคือในการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดของภาพหลอดเลือดภาพเดียวกัน แต่การวัดนั้นกระทำคนละเวลา แม้จะเป็นผู้วัดคนเดียวหรือต่างคนกัน หรือไม่บรรทัดที่ใช้วัดอาจเป็นอันเดียวกันหรือต่างอันกัน ค่าความหนาที่วัดได้ก็อาจได้ค่าที่ไม่เหมือนกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัย รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อจะเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

6.1 สรุปผลการวิจัย

การนำการประมวลผลภาพดิจิทัลรวมทั้งคอมพิวเตอร์กราฟิกมาสร้างเป็นเครื่องมือช่วยในการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดจากภาพหลอดเลือด ช่วยให้ผลการวัดที่ได้มีความแม่นยำหรือแน่นอนกว่าการใช้คนเป็นผู้วัดอย่างเช่นที่ปฏิบัติกันอยู่ในปัจจุบันในห้องปฏิบัติการ Microcirculation ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เครื่องมือที่ได้ออกแบบไว้อย่างช่วยให้ความสะดวกรวดเร็วแก่ผู้วัด โดยผู้วัดสามารถเลือกให้เครื่องมือวัดค่าโครงสร้างของผนังหลอดเลือดแบบอัตโนมัติ หรือเลือกวัดค่าแบบกึ่งอัตโนมัติโดยให้เครื่องมือคัดเลือกจุดมาให้ก่อน แล้วจึงให้ผู้วัดเลือกเปลี่ยนแปลงจุดเอง หรือเลือกวัดโดยที่ผู้วัดต้องการกำหนดจุดเองก็ได้ โดยในแบบกำหนดเองโดยผู้วัดนี้เครื่องมือวัดนี้จะคำนวณค่าความหนาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานให้ แต่ไม่วัดค่าโครงสร้างอื่นของผนังหลอดเลือดให้

เนื่องจากเครื่องมือที่พัฒนาในงานวิจัยนี้เน้นที่การวัดความหนาของผนังหลอดเลือดเป็นสำคัญ ดังนั้นขั้นตอนในการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดแบบอัตโนมัติ เริ่มจากการหาเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือด จากนั้นหาจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกโดยใช้จุดที่อยู่บนเส้นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดทุกจุดที่ตรวจพบได้เป็นหลัก ทำให้ได้เส้นขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดจากการเชื่อมจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกทุกจุดด้วยเส้นตรงด้วย สุดท้ายจึงวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด ซึ่งได้แก่ ความหนาของผนังหลอดเลือด ได้จากการคัดเลือกเอาจุดที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคำนวณค่าเท่านั้น ความยาวเส้นขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด พื้นที่ของช่องว่างและของผนังหลอดเลือด

นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้ประเมินผลเครื่องมือวัดความหนาด้วยการตรวจสอบความถูกต้องในการวัดกับชุดภาพทดสอบที่สร้างขึ้นให้มีลักษณะคล้ายหลอดเลือด ซึ่งประกอบด้วยชุดภาพวงแหวนรูปวงกลมและรูปวงรีที่ทราบความหนา พบว่าชุดภาพทดสอบแต่ละชุดมีค่าความหนาที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าความหนา

จริงมาก และยังมีส่วนเป็ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ ซึ่งแสดงว่าเครื่องมือนี้มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำในการวัดสูง ในงานวิจัยนี้ยังได้ทดลองวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดกับภาพหลอดเลือดจริงอีกด้วย และยังให้ผู้ใช้ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการ Microcirculation นี้ได้ทดลองใช้เครื่องมือนี้ ซึ่งผู้ที่มีความเห็นว่าเครื่องมือวัดนี้มีความน่าเชื่อถือ อีกทั้งยังให้ความสะดวกรวดเร็วในการวัดด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

ลักษณะเครื่องมือน่าจะปรับใช้ได้กับการวัดระยะของภาพชนิดอื่น (ที่ไม่ใช่หลอดเลือด) ได้ แต่ควรมีการปรับปรุงขั้นตอนการคัดเลือกจุดที่จะนำมาใช้ในการวัดเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ แม้ว่าในงานวิจัยนี้จะสามารถวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดได้ แต่เนื่องจากลักษณะของภาพหลอดเลือดมีความหลากหลายแตกต่างกันมาก ทำให้การวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดไม่สามารถให้ผลการวัดที่ดีกับทุกภาพได้ ซึ่งสำหรับภาพหลอดเลือดที่วัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดได้ไม่ถูกต้อง ถ้าผู้ที่มีการปรับปรุงภาพหลอดเลือดก่อนทำการวัดด้วยโปรแกรมที่ใช้ในการปรับปรุงภาพที่มีอยู่โดยทั่วไปเช่น การกำจัดกลุ่มไขมันบริเวณช่องว่างทิ้งไป หรือปรับปรุงขอบของหลอดเลือดให้มีความชัดเจนขึ้น เป็นต้น ก็จะช่วยให้อาจสามารถวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดได้ นอกจากนี้ได้ออกแบบให้เครื่องมือนี้สามารถทำงานได้ 3 ลักษณะดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อให้เครื่องมือวัดนี้มีความยืดหยุ่นในการวัดมากขึ้น แต่ทั้งนี้ยังมีส่วนที่ควรปรับปรุงหรือพัฒนาต่อไป ทำให้การวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนี้

1. ปรับปรุงขั้นตอนวิธีการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดแบบอัตโนมัติให้สามารถวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดได้สำหรับภาพหลอดเลือดที่มีปัญหา
2. พัฒนาเครื่องมือวัดนี้ให้สามารถวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดจากภาพหลอดเลือดที่มีลักษณะของขอบด้านในที่ขาดหายไปมากกว่า 1 บริเวณได้ เพื่อให้เครื่องมือนี้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น
3. พัฒนาเครื่องมือวัดแบบกึ่งอัตโนมัติที่ขณะนี้เครื่องมือได้จัดทำให้ผู้มีส่วนในการเปลี่ยนแปลงจุดเพียงอย่างเดียว ให้สามารถมีการเปลี่ยนแปลงเส้นขอบด้านในและนอกของผนังหลอดเลือดได้ด้วย
4. พัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการหาเส้นขอบด้านนอกให้มีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากภาพหลอดเลือดส่วนใหญ่จะมีขอบนอกของผนังหลอดเลือดที่ไม่ชัดเจน ทำให้การคำนวณหาความยาวขอบด้านนอกและพื้นที่ของผนังหลอดเลือดยังไม่ถูกต้อง
5. ปรับปรุงให้ขั้นตอนวิธีวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดแบบอัตโนมัติมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

1. ศัญญา ร้อยมาลัย. สรีรวิทยาของกรไหลเวียน. ขอนแก่น: หน่วยโรเนียวและออฟเซ็ท คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2528.
2. อัญชดี เจตะภย. ผลของสารสกัดจากกระเทียมต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับของไขมันในซีรัมและการทำงานของหัวใจในหนูที่ถูกทำให้เป็นเบาหวาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การแพทย์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
3. อัมพร จาริยะพงศ์สกุล. ผลของซิลิคาพริลต่อการทำงานของหัวใจและต่อโครงสร้างของผนังหลอดเลือดแดงโคโรนารีในหนูที่ถูกทำให้เป็นเบาหวาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสัตววิทยา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
4. R. J. Boucek, and others. Coronary Artery Disease Pathologic and Clinical Assessment. U.S.A.: Waverly Press, 1990.
5. S. E. Umbaugh. Computer Vision and Image Processing: A Practical Approach Using CVIPtools. U.S.A.: Prentice-Hall International, 1998.
6. R. C. Gonzalez and R. E. Woods. Digital Image Processing. U.S.A.: Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
7. R. Jain, R. Kasturi and B. G. Schunck. Machine Vision. Singapore: McGraw-Hill, 1995.
8. R. Mukundan. Binary Vision Algorithm in Java™. Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand (1999): 145-150.
9. D. Hearn and M. P. Baker. Computer Graphics C Version. U.S.A.: Prentice-Hall International, 1997.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

คู่มือการใช้เครื่องมือวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

ภาคผนวก ก นี้อธิบายการใช้เครื่องมือในการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด เพื่อให้ผู้ใช้เข้าใจและสามารถนำไปใช้ในการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะประกอบด้วย เงื่อนไขของเครื่องมือที่ผู้ใช้ต้องทำความเข้าใจก่อนที่จะทำการวัด ข้อแนะนำในการใช้เครื่องมือ จากนั้นจะอธิบายโครงสร้างของหน้าจอหลัก และสุดท้ายเป็นขั้นตอนในการใช้เครื่องมือนี้

ก.1 เงื่อนไขของเครื่องมือ

เงื่อนไขในการใช้เครื่องมือวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดมีดังนี้

1. ผู้ใช้ต้องตัดภาพหลอดเลือดให้ครอบคลุมส่วนที่เป็นหลอดเลือดที่จะวัด เพื่อหลีกเลี่ยงเนื้อเยื่อที่ไม่ต้องการวัด นอกจากนี้จะต้องตัดภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ให้ครอบคลุมช่องสเกลบนภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ที่ต้องการวัดด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์กราฟิกที่มีอยู่ทั่วไป และหากช่องสเกลบนภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ไม่ได้ตั้งฉากกับขอบของภาพ ผู้ใช้ต้องทำการหมุนภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์เสียก่อน
2. ภาพหลอดเลือดที่นำมาวัดต้องเป็นภาพระดับเทา 256 ระดับ และเป็นภาพ Bitmap เท่านั้น
3. มีเนื้อที่ในฮาร์ดดิสก์เพื่อติดตั้งเครื่องมือวัดนี้ประมาณ 4 MB
4. เครื่องมือวัดนี้ใช้ได้กับระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 95 หรือวินโดวส์ 98 เท่านั้น

ก.2 ข้อแนะนำในการใช้เครื่องมือ

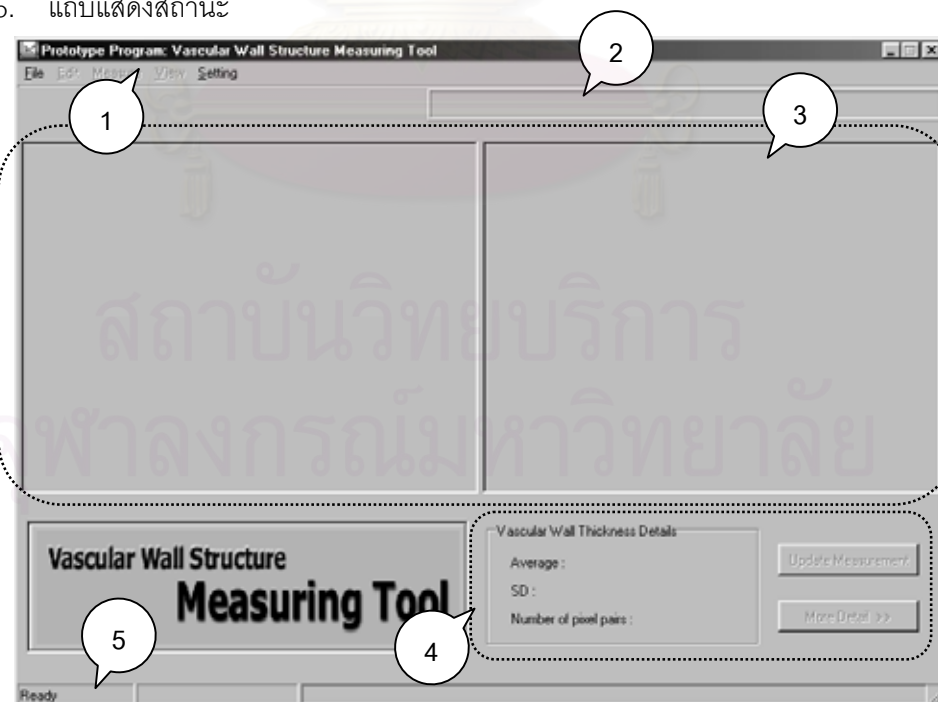
เนื่องจากลักษณะของภาพหลอดเลือดที่นำมาศึกษามีลักษณะที่หลากหลายแตกต่างกันมาก เพื่อให้เครื่องมือวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดนี้มีความยืดหยุ่น งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบให้เครื่องมือนี้มีการทำงานใน 3 ลักษณะ คือ แบบอัตโนมัติ แบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบกำหนดเองโดยผู้วัด ซึ่งรายละเอียดและขั้นตอนการใช้เครื่องมือแต่ละแบบจะได้นำเสนอในส่วนต่อไป ดังนั้นเพื่อให้ผู้ใช้มีความสะดวกในการใช้เครื่องมือนี้ ผู้ใช้ควรเลือกใช้เครื่องมือให้เหมาะสมกับลักษณะของภาพหลอดเลือดที่นำมาวัด โดยที่เครื่องมือ

วัดแบบอัตโนมัติ เหมาะกับภาพหลอดเลือดมีลักษณะของขอบของหลอดเลือดทั้งขอบในและขอบนอกที่ชัดเจน หรือมีลักษณะของขอบนอกที่ไม่ค่อยชัดเจน แต่ผู้ใช้สามารถกำหนดบริเวณที่เป็นขอบนอกของหลอดเลือดได้ นอกจากนี้ภาพหลอดเลือดควรมีผิวของผนังหลอดเลือดที่ค่อนข้างเรียบ ส่วนเครื่องมือวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ นั้นเหมาะกับภาพหลอดเลือดที่มีปัญหา นั่นคือมีลักษณะของขอบนอกที่ไม่ชัดเจน ซึ่งผู้ใช้ไม่สามารถกำหนดบริเวณที่เป็นขอบนอกได้อย่างชัดเจน หรือมีลักษณะผิวของผนังหลอดเลือดที่ไม่เรียบทำให้ดูเหมือนมีขอบผนังหลอดเลือดหลายวงซ้อนกันอยู่ สุดท้ายเครื่องมือวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัด ซึ่งเหมาะสมกับภาพหลอดเลือดที่มีปัญหาและไม่มีปัญหา เนื่องจากผู้ใช้เป็นผู้กำหนดจุดที่จะใช้ในการวัดเองทั้งหมด

ก.3 การใช้งานหน้าจอหลัก

หน้าจอหลักของเครื่องมือวัดนี้มีลักษณะในรูปแบบที่ ก.1 ซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างการทำงานได้เป็น 5 ส่วน ดังนี้

1. แถบเมนู
2. แถบแสดงสถานะการทำงาน
3. ส่วนในการแสดงภาพ
4. ส่วนในการแสดงผลการวัด
5. แถบแสดงสถานะ



รูปที่ ก.1 หน้าจอหลักของเครื่องมือวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

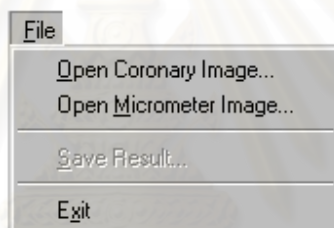
แถบเมนู

แถบเมนูนี้จะแสดงเมนูเพื่อเลือกการทำงาน ซึ่งจะประกอบด้วย 5 เมนูหลักคือ

1. เมนู File
2. เมนู Edit
3. เมนู Measure
4. เมนู View
5. เมนู Setting

เมนู File

เป็นเมนูเกี่ยวกับการเปิดภาพ การบันทึกผลการวัด และการออกจากโปรแกรมเครื่องมือวัด ซึ่งจะประกอบด้วยเมนูย่อยดังรูปที่ ก.2

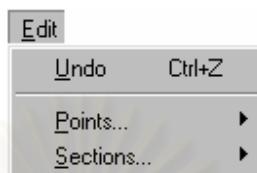


รูปที่ ก.2 เมนูย่อยของเมนู File

- เมนูย่อย Open Coronary Image ใช้ในการเปิดภาพหลอดเลือดที่จะนำมาวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด
- เมนูย่อย Open Micrometer Image ใช้ในการเปิดภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณค่าในการเทียบหน่วยที่จะนำไปใช้ในการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด
- เมนูย่อย Save Result เพื่อใช้ในการบันทึกผลการวัด โดยสามารถบันทึกผลการวัดลงในแฟ้มข้อมูล (file) ที่เป็นแฟ้มข้อความ (text file) และสามารถบันทึกผลการวัดเป็นชุดภาพหลอดเลือดที่ประกอบด้วยภาพหลอดเลือดที่แสดงจุดที่ใช้ในการวัดความหนา ภาพหลอดเลือดที่แสดงเส้นขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดที่ใช้ในการหาความยาวเส้นขอบด้านในและด้านนอกของผนังหลอดเลือด ภาพหลอดเลือดที่แสดงบริเวณของช่องว่างและบริเวณของผนังหลอดเลือดที่ใช้ในการหาพื้นที่ของช่องว่างและของผนังหลอดเลือดตามลำดับ
- เมนูย่อย Exit ใช้เมนูนี้เมื่อต้องการออกจากโปรแกรมเครื่องมือวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

เมนู Edit

เป็นเมนูที่ใช้ในการแก้ไขจุดที่ใช้การวัดเพื่อให้ผลการวัดมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งประกอบด้วยเมนูย่อยดังในรูปที่ ก.3 แต่ละเมนูย่อยมีหน้าที่การทำงานดังนี้



รูปที่ ก.3 เมนูย่อยของเมนู Edit

- เมนูย่อย Undo ใช้ในการยกเลิกการแก้ไขจุดที่ผู้ใช้มีการแก้ไขในครั้งล่าสุด
- เมนูย่อย Points เพื่อใช้ในการแก้ไขจุดที่เครื่องมือนี้คัดเลือกมาจากการทำงานแบบ

อัตโนมัติ โดยตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกที่สามารถแก้ไขได้จะมีเมาส์รูปมือปรากฏ ซึ่งภายใต้เมนูย่อยนี้สามารถเลือกการแก้ไขได้ 3 ลักษณะคือ

Delete ใช้ในการตัดจุดที่ไม่เหมาะสมทิ้ง ซึ่งผู้ใช้ต้องเลือกจุดที่ต้องการตัดทิ้งเสียก่อน โดยใช้เมาส์คลิกจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของจุดที่ต้องการตัดทิ้งซึ่งจะแสดงเป็นเส้นสีเขียว เมื่อได้จุดที่ต้องการตัดทิ้งแล้วให้เลือกเมนูนี้คือ Edit -> Points -> Delete หรือกดปุ่ม Ctrl+Del หากไม่ใช่จุดที่ต้องการตัดทิ้ง ผู้ใช้สามารถเลือกจุดใหม่ได้ แต่ถ้าผู้ใช้ไม่ได้เลือกจุดก่อนที่จะทำการตัดทิ้งก่อน เครื่องมือนี้จะขึ้นข้อความเตือน “Must select point to delete” เพื่อบอกให้ผู้ใช้ต้องทำการเลือกจุดเสียก่อน

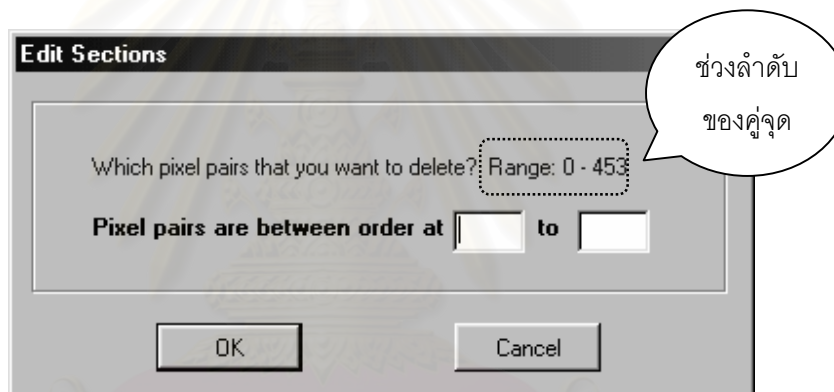
Move ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือที่จุดอยู่บนขอบด้านนอก ให้ผู้ใช้เลือกเมนู Edit -> Points -> Move หรือกดปุ่ม Ctrl+M แล้วเครื่องมือนี้จะเข้าสู่สถานะที่จะเปลี่ยนตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือที่จุดอยู่บนขอบด้านนอกได้ ในการเปลี่ยนตำแหน่งนี้ทำโดยใช้เมาส์คลิกค้างไว้ที่จุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของจุดที่ต้องการเปลี่ยนตำแหน่ง แล้วลากเมาส์ไปยังตำแหน่งใหม่ที่ต้องการวางจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก ในขณะที่ผู้ใช้ลากเมาส์นั้นจะแสดงเส้นตั้งฉากระหว่างจุดที่อยู่บนขอบด้านในและจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก เพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกตำแหน่งใหม่ เมื่อได้ตำแหน่งใหม่ที่เหมาะสมแล้วให้ปล่อยคลิก

Insert ใช้ในการเพิ่มจุดการวัด ให้ผู้ใช้เลือกเมนู Edit -> Points -> Insert หรือกดปุ่ม Ctrl+Ins ในการเพิ่มจุดนี้ผู้ใช้ต้องกำหนดจุดที่อยู่บนขอบด้านในก่อนโดยใช้เมาส์คลิกเลือกตำแหน่งของจุดภาพที่อยู่บนขอบด้านในที่สามารถเพิ่มได้ เมื่อผู้ใช้กำหนดจุดที่อยู่บนขอบด้านในแล้วเครื่องมือนี้จะสร้างเส้นตั้งฉากให้เพื่อใช้ในการกำหนดจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกที่เป็นคู่จุดของจุดที่อยู่บนขอบด้านใน จากนั้นผู้ใช้เมาส์คลิกเลือกตำแหน่งบนเส้นตั้งฉากเพื่อเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก แต่ถ้าผู้ใช้เห็นว่าเส้นตั้งฉากที่

เครื่องมือนี้สร้างให้ไม่ถูกต้อง ผู้ใช้ก็สามารถเลือกตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่ตำแหน่งบนเส้นตั้งฉากเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกแทนได้

- เมนูย่อย **Sections** เป็นเมนูที่ใช้ในการแก้ไขจุดที่เครื่องมือนี้คัดเลือกมาจากการทำงานแบบอัตโนมัติเช่นเดียวกัน และสามารถทำการแก้ไขได้หลายจุด ซึ่งภายใต้เมนูย่อยนี้สามารถเลือกการแก้ไขได้ลักษณะเดียวคือ

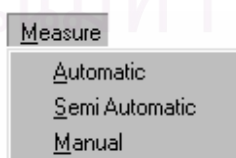
Delete ใช้ในการตัดทิ้งจุดได้หลาย ๆ จุดพร้อมกัน เมื่อผู้ใช้เลือกการทำงานนี้แล้วจะปรากฏหน้าจอตั้งรูปที่ ก.4 โดยให้ผู้ใช้กำหนดลำดับของจุดเริ่มต้นและลำดับจุดสุดท้ายเพื่อกำหนดช่วงของจุดที่ต้องการตัดทิ้ง ซึ่งเครื่องมือจะแสดงจุดที่จะถูกตัดทิ้งในช่วงที่ผู้ใช้กำหนดให้เห็นในบริเวณพื้นที่ด้านขวามือของส่วนในการแสดงภาพ โดยในการเลือกลำดับของจุดที่ต้องการตัดทิ้งนั้นไม่ควรเกินช่วงลำดับของจุดที่เครื่องมือกำหนดให้มาซึ่งแสดงไว้บนหน้าจอในรูปที่ ก.4 และลำดับของจุดเริ่มต้นต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับจุดสุดท้าย



รูปที่ ก.4 หน้าจอที่ใช้ในการเลือกช่วงจุดที่ต้องการตัดทิ้ง

เมนู Measure

เป็นเมนูที่ใช้ในการเลือกลักษณะของเครื่องมือที่จะวัด ซึ่งได้ออกแบบไว้ด้วยกัน 3 ลักษณะคือ แบบอัตโนมัติ แบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบกำหนดเองโดยผู้วัด ดังนั้นภายใต้เมนูนี้มีเมนูย่อย 3 เมนูที่สอดคล้องกับลักษณะของเครื่องมือดังรูปที่ ก.5 แต่ละเมนูมีการทำงานดังนี้



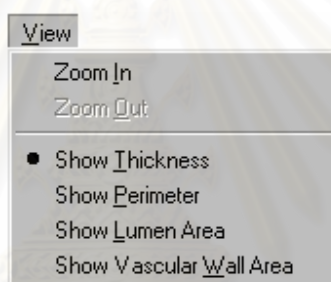
รูปที่ ก.5 เมนูย่อยของเมนู Measure

- เมนูย่อย **Automatic** เป็นการเลือกให้เครื่องมือนี้ทำการวัดแบบอัตโนมัติ

- เมนูย่อย **Semi-automatic** เป็นการเลือกให้เครื่องมือนี้ทำการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ เพื่อสามารถแก้ไขจุดการวัดที่เครื่องมือนี้คัดเลือกมาให้จากการทำงานแบบอัตโนมัติ โดยเมนูนี้จะต้องมีการตรวจสอบก่อนว่า เครื่องมือนี้มีการทำการวัดแบบอัตโนมัติมาแล้วหรือไม่ ถ้าการตรวจสอบพบว่าไม่มีการวัดแบบอัตโนมัติมาก่อน เครื่องมือนี้ก็จะทำการวัดแบบอัตโนมัติแล้วจึงเข้าสู่สถานะที่สามารถแก้ไขจุดได้ แต่ถ้าการตรวจสอบพบว่า เครื่องมือนี้มีการวัดแบบอัตโนมัติแล้วก็จะเข้าสู่สถานะที่สามารถแก้ไขจุดได้ทันที
- เมนูย่อย **Manual** เป็นการเลือกให้เครื่องมือนี้ทำการวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัด ที่ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดจุดเองทั้งหมด

เมนู View

สำหรับเมนูนี้เป็นส่วนในการจัดการเลือกการแสดงผลโดยจะมีเมนูย่อยดังรูปที่ ก.6 แต่ละเมนูย่อยมีรายละเอียดดังนี้

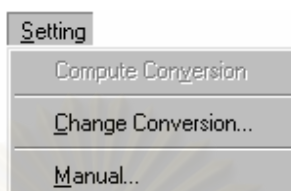


รูปที่ ก.6 เมนูย่อยของเมนู View

- เมนูย่อย **Zoom In** เป็นเมนูที่ใช้ในการขยายภาพหลอดเลือด
- เมนูย่อย **Zoom Out** เป็นเมนูที่ใช้ทำให้ภาพหลอดเลือดที่ขยายให้กลับมาอยู่ในสเกลเดิม
- เมนูย่อย **Show Thickness** เป็นเมนูที่เลือกให้แสดงจุดที่ใช้ในการวัดความหนา
- เมนูย่อย **Show Perimeter** เป็นเมนูที่เลือกให้แสดงเส้นขอบด้านในและด้านนอกที่ใช้ในการหาความยาวขอบด้านในและด้านนอก
- เมนูย่อย **Show Lumen Area** เป็นเมนูที่เลือกให้แสดงบริเวณของช่องว่างที่ใช้ในการหาพื้นที่ของช่องว่าง
- เมนูย่อย **Show Vascular Wall Area** เป็นเมนูที่เลือกให้แสดงบริเวณของผนังหลอดเลือดที่ใช้ในการหาพื้นที่ของผนังหลอดเลือด

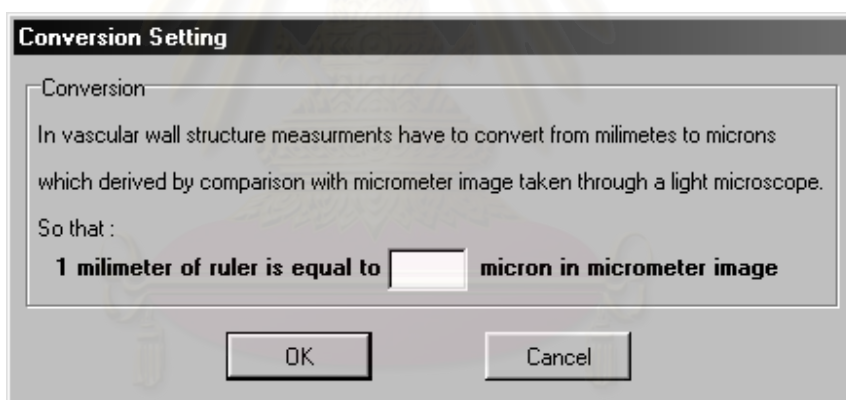
เมนู Setting

เป็นเมนูเกี่ยวกับการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเทียบกลับเป็นหน่วยไมโครเมตร และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัดซึ่งมีเมนูย่อยดังรูปที่ ก.7 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ ก.7 เมนูย่อยของเมนู Setting

- เมนูย่อย Compute Conversion เป็นเมนูที่ใช้ในการคำนวณค่าในการเทียบกลับเป็นหน่วยไมโครเมตร
- เมนูย่อย Change Conversion เป็นเมนูที่ใช้ในการเปลี่ยนค่าในการเทียบกลับโดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าในการเทียบกลับได้เอง ซึ่งจะมีลักษณะหน้าจอการทำงานดังในรูปที่ ก.8



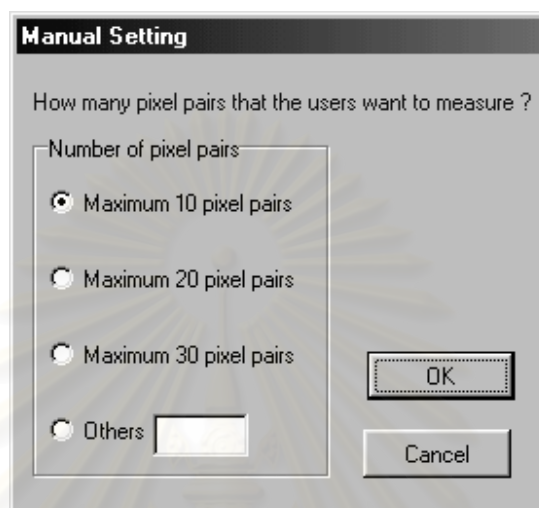
รูปที่ ก.8 หน้าจอที่ใช้ในการรับค่าในการเทียบกลับจากผู้ใช้ซึ่งเป็นผู้กำหนดเอง

- เมนูย่อย Manual เป็นเมนูที่ใช้ในการกำหนดจำนวนคู่จุดที่จะทำการวัดในการวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัด ซึ่งจะมีลักษณะหน้าจอการทำงานดังรูปที่ ก.9 โดยมีค่าโดยปริยาย (default) ของจำนวนคู่จุดที่ทำการวัดเท่ากับ 10 คู่จุด

แถบแสดงสถานะการทำงาน

เป็นแถบที่ใช้แสดงสถานะการทำงานของเครื่องมือ เพื่อให้ผู้ใช้ทราบได้ว่าขณะนี้เครื่องมือวัดนี้อยู่ในสถานะการทำงานใด มีการเลือกให้เครื่องมือมีลักษณะการวัดเป็นอย่างไรเช่น ถ้าผู้ใช้เลือกให้เครื่องมือนี้ทำ

การวัดแบบอัตโนมัติ บริเวณแถบแสดงสถานะการทำงานนี้จะมีข้อความว่า “Mode : Automatic” ถ้าผู้ใช้เลือกให้เครื่องมือนี้ทำการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ จะมีข้อความว่า “Mode : Semi-Automatic” หรือถ้าผู้ใช้เลือกให้เครื่องมือนี้ทำการวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัด จะมีข้อความว่า “Mode : Manual” เป็นต้น



รูปที่ ก.9 หน้าจอที่ใช้ในการเลือกจำนวนคู่จุดในการวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัด

ส่วนในการแสดงภาพ

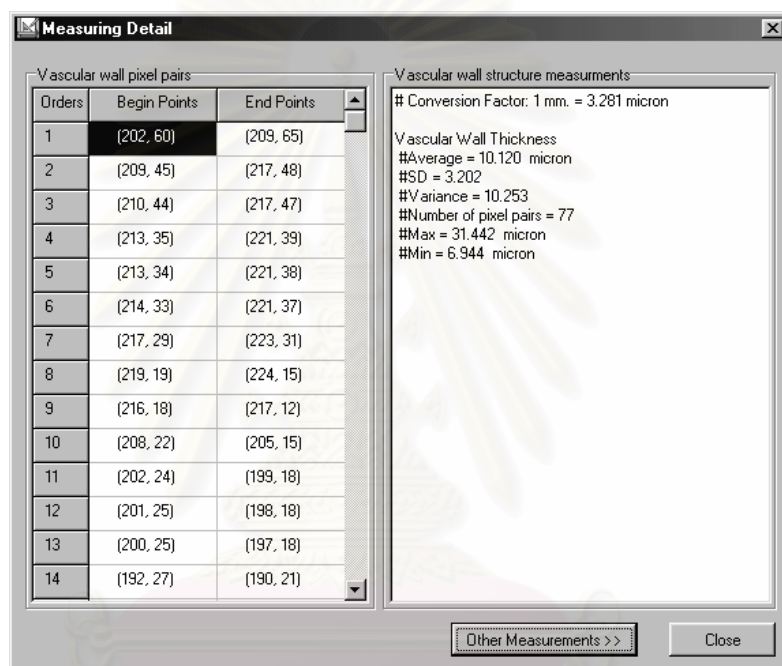
ส่วนในการแสดงภาพจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นพื้นที่ด้านซ้ายมือใช้ในการแสดงภาพหลอดเลือดหรือภาพถ่ายสไลด์ไมโครมิเตอร์ที่เป็นภาพต้นฉบับ และส่วนที่สองเป็นพื้นที่ด้านขวามือใช้ในการแสดงภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด ซึ่งผู้ใช้จะใช้พื้นที่ด้านขวามือเป็นส่วนใหญ่เพื่อใช้ในการแก้ไขคู่จุดการวัดจากการเลือกการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ และใช้ในการกำหนดคู่จุดจากการเลือกการทำงานแบบกำหนดเองโดยผู้วัด นอกจากนี้ยังเป็นพื้นที่ที่ใช้แสดงผลการวัดอีกด้วย

ส่วนในการแสดงผลการวัด

ส่วนในการแสดงผลการวัดจะประกอบด้วย

1. ส่วนที่เป็นพื้นที่ในการแสดงผลการวัดความหนาของผนังหลอดเลือด โดยจะแสดงรายละเอียดของความหนาเฉลี่ยที่วัดได้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และจำนวนคู่จุดที่ใช้ในการวัด
2. ส่วนที่เป็นพื้นที่ของปุ่ม ประกอบด้วยปุ่มการทำงานดังนี้
 - ปุ่ม Update Measurement เป็นปุ่มที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโครงสร้างของผนังหลอดเลือดใหม่เมื่อผู้ใช้มีการเปลี่ยนแปลงแก้ไขคู่จุดการวัด

• ปุ่ม More Detail >> เป็นปุ่มที่ใช้แสดงรายละเอียดการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด ซึ่งเมื่อผู้ใช้เลือกกดปุ่มนี้จะแสดงหน้าจอ ดังรูปที่ ก.10 โดยในหน้าจอนี้จะแบ่งพื้นที่ออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งคือพื้นที่ด้านซ้ายมือใช้แสดงตำแหน่งจุดภาพของคูจุดที่ใช้ในการวัดความหนา ส่วนที่สองคือพื้นที่ด้านขวามือใช้แสดงรายละเอียดการวัด โดยจะแสดงรายละเอียดของการวัดความหนาเป็นหลัก หากผู้ใช้ต้องการดูรายละเอียดการวัดโครงสร้างอื่น ๆ ของผนังหลอดเลือดเช่น ความยาวขอบด้านในและด้านนอกของผนังหลอดเลือด พื้นที่ช่องช่องว่างและของผนังหลอดเลือด เป็นต้น ก็สามารถเลือกกดปุ่ม Other Measurements >> แล้วเครื่องมือนี้จะแสดงผลการวัดโครงสร้างอื่นให้ในส่วนที่สองนี้เช่นเดียวกัน



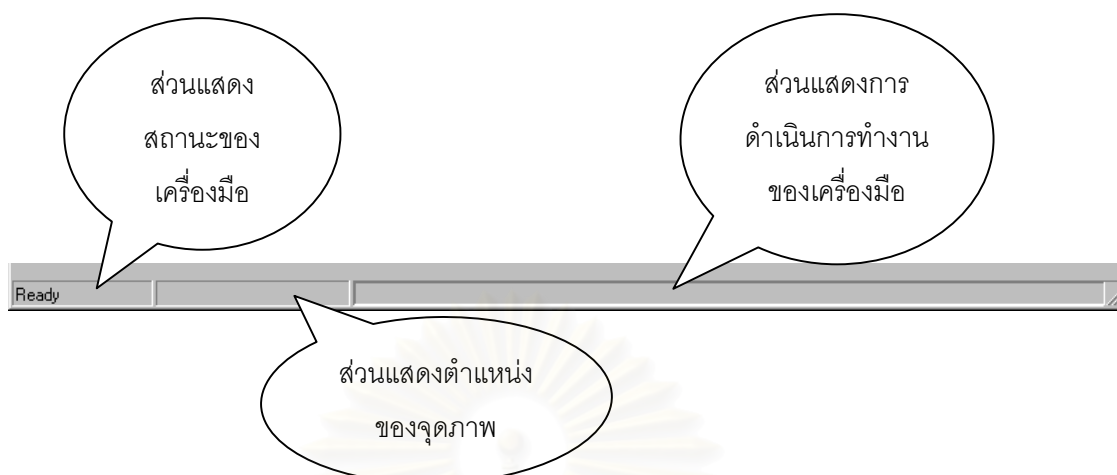
รูปที่ ก.10 หน้าจอที่ใช้แสดงผลการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

แถบแสดงสถานะ

แถบแสดงสถานะจะประกอบด้วยส่วนแสดงสถานะของเครื่องมือ ส่วนแสดงตำแหน่งของจุดภาพ และส่วนแสดงการดำเนินการทำงานของเครื่องมือ รายละเอียดดังรูปที่ ก.11

ก.4 ขั้นตอนการใช้เครื่องมือเพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือด

ในหัวข้อนี้เป็นการอธิบายขั้นตอนการใช้เครื่องมือนี้เพื่อวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดใน 1 ภาพ โดยที่ผู้ใช้ต้องทำความเข้าใจกับเงื่อนไขของเครื่องมือก่อนที่จะทำการวัดซึ่งได้กล่าวไว้ในตอนต้น นอกจากนี้ผู้

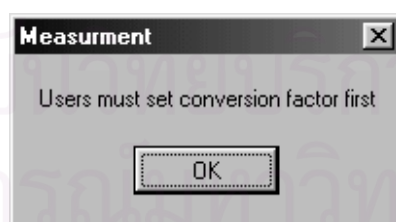


รูปที่ ก.11 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแถบแสดงสถานะ

ใช้ต้องคำนวณค่าในการเทียบกลับเสียก่อน เพื่อนำไปใช้ในการเปลี่ยนหน่วยเป็นหน่วยไมโครเมตร ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์โดยใช้เมนู File -> Open Micrometer Image
2. คำนวณค่าในการเทียบกลับโดยเลือกเมนู Setting -> Computer Conversion หรือผู้ต้องการกำหนดค่าในการเทียบกลับเองสามารถทำได้โดยเลือกเมนู Setting -> Change Conversion

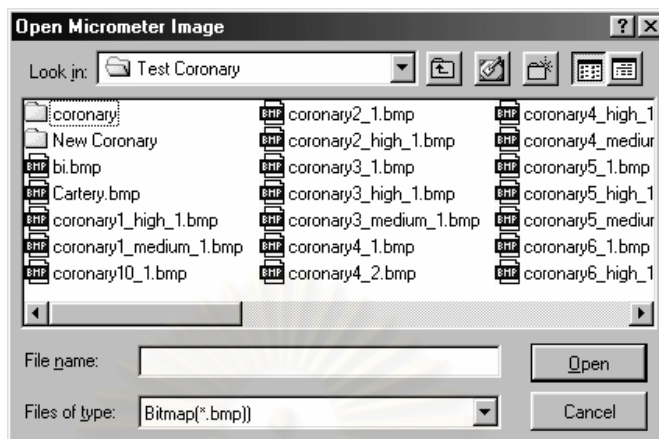
ถ้าผู้ใช้ไม่ได้คำนวณค่าในการเทียบกลับก่อนที่จะทำการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดนี้ เครื่องมือนี้จะแสดงข้อความดังรูปที่ ก.12 เมื่อผู้ใช้กดปุ่ม OK จะแสดงหน้าจอดังในรูปที่ ก.13 เพื่อให้ผู้ใช้เปิดภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ที่ใช้ในคำนวณค่าในการเทียบกลับ ซึ่งขั้นตอนการหาค่าในการเทียบกลับมีขั้นตอนเดียวกันกับข้างต้น



รูปที่ ก.12 ข้อความเตือนให้ผู้ใช้คำนวณค่าในการเทียบกลับก่อนที่จะทำการวัด

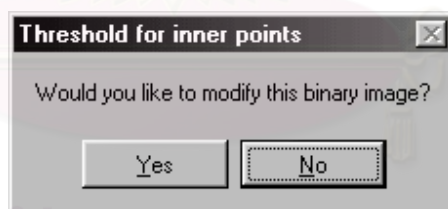
ในขณะนี้ผู้ใช้สามารถใช้เครื่องมือนี้ในการวัดโครงสร้างของผนังหลอดเลือดได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิดภาพหลอดเลือดโดยใช้เมนู File -> Open Coronary Image
2. เลือกลักษณะของเครื่องมือที่จะใช้ในการวัดจากเมนู Measure



รูปที่ ก.13 หน้าจอที่ให้ผู้ใช้งานเปิดภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์

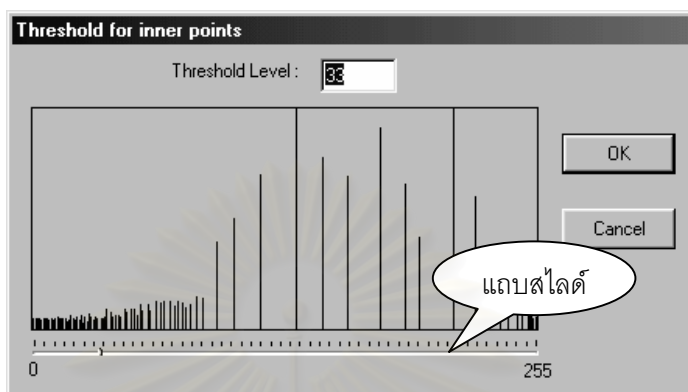
3. ถ้าผู้ใช้เลือกให้เครื่องมือนี้ทำงานแบบ Automatic เครื่องมือนี้จะทำการประมวลผลและให้ผู้ใช้งานสามารถแก้ไขภาพลักษณะฐานสองที่ใช้ในการหาเส้นขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด โดยในครั้งแรกจะปรากฏหน้าจอในรูปแบบที่ ก.14 เพื่อถามผู้ใช้งานต้องการแก้ไขภาพลักษณะฐานสองที่ใช้ในการหาเส้นขอบด้านในหรือไม่ ถ้าผู้ใช้ต้องการแก้ไขให้กดปุ่ม OK จะทำให้เข้าสู่หน้าจอในรูปแบบที่ ก.15 ที่แสดงลักษณะของฮิสโทแกรม ผู้ใช้สามารถเลื่อนแถบสไลด์เพื่อหาค่าขีดแบ่งใหม่ ซึ่งจะแสดงผลการแปลงเป็นภาพลักษณะฐานสองที่สอดคล้องกับค่าขีดแบ่งใหม่ให้ทันทีในพื้นที่ด้านขวามือของส่วนในการแสดงผลภาพ ถ้าผู้ใช้ต้องการแก้ไขภาพลักษณะฐานสองดังกล่าวให้กดปุ่ม OK ถ้าไม่ต้องการแก้ไขให้กดปุ่ม Cancel



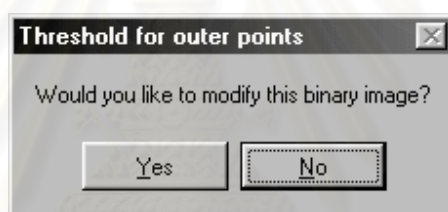
รูปที่ ก.14 หน้าจอแสดงคำถามเพื่อนำเข้าสู่หน้าจอแสดงฮิสโทแกรม

จากนั้นเครื่องมือนี้จะทำการประมวลผลต่อไปและจะแสดงหน้าจอในรูปแบบที่ ก.16 เพื่อถามผู้ใช้งานต้องการแก้ไขภาพลักษณะฐานสองที่ใช้ในการหาเส้นขอบด้านนอกหรือไม่ ซึ่งถ้ากดปุ่ม OK ก็จะปรากฏหน้าจอในรูปแบบที่ ก.17 ที่แสดงลักษณะของฮิสโทแกรม ซึ่งผู้ใช้สามารถเลื่อนแถบสไลด์เพื่อหาค่าขีดแบ่งใหม่เช่นเดียวกัน ซึ่งจะแสดงผลการแปลงเป็นภาพลักษณะฐานสองที่สอดคล้องกับค่าขีดแบ่งใหม่ให้ทันทีในพื้นที่ด้านขวามือของส่วนในการแสดงผลภาพ ถ้าผู้ใช้ต้องการแก้ไขภาพลักษณะฐานสองดังกล่าวให้กดปุ่ม OK ถ้าไม่ต้องการให้กดปุ่ม Cancel หลังจากนั้นเครื่องมือนี้จะทำการประมวลผลต่อไป ซึ่งเมื่อประมวลผลเสร็จ

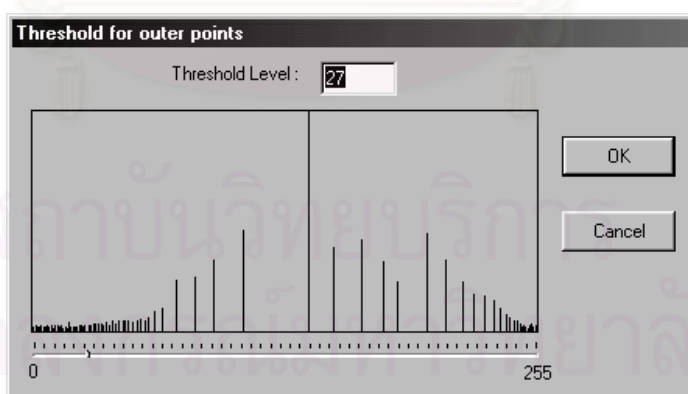
เรียบร้อยจะแสดงผลการวัดความหนาในพื้นที่ด้านขวามือของส่วนในการแสดงภาพ ถ้าต้องการดูรายละเอียดการวัดโครงสร้างอื่นของผนังหลอดเลือดให้กดปุ่ม More Detail>>



รูปที่ ก.15 หน้าจอแสดงฮิสโทแกรมของภาพหลอดเลือดที่ใช้ในการหาเส้นขอบด้านใน



รูปที่ ก.16 หน้าจอแสดงคำถามเพื่อนำเข้าสู่หน้าจอแสดงฮิสโทแกรม



รูปที่ ก.17 หน้าจอแสดงฮิสโทแกรมของภาพหลอดเลือดที่ใช้ในการหาเส้นขอบด้านนอก

4. ถ้าผู้ใช้เลือกให้เครื่องมือนี้ทำงานแบบ Semi-automatic เครื่องมือนี้จะทำการตรวจสอบก่อนว่ามีการทำงานแบบอัตโนมัติมาแล้วหรือไม่ ถ้ายังไม่มีการทำงานแบบอัตโนมัติมาก่อน ก็จะทำให้เครื่องมือมีการทำงานแบบอัตโนมัติก่อน ซึ่งจะทำงานตามขั้นตอนในข้อที่ 3 แล้วจึงเข้าสู่สถานะที่ให้ผู้ใช้งานแก้ไขจุดที่

ใช้ในการวัดที่เครื่องมือนี้คัดเลือกมาได้ และเมื่อผู้ใช้แก้ไขจุดแล้วให้กดปุ่ม Update Measurement เพื่อวัดค่าโครงสร้างของผนังหลอดเลือดใหม่

5. ถ้าเครื่องมือนี้อยู่ในสถานะการทำงานแบบอัตโนมัติ แต่ผู้ใช้ต้องการแก้ไขจุดที่ใช้ในการวัด ซึ่งจะต้องเข้าสู่สถานะที่สามารถแก้ไขได้เสียก่อนโดยการเลือกเมนู Measure -> Semi-automatic จากนั้นผู้ใช้ก็สามารถแก้ไขจุดการวัดได้

6. ถ้าผู้ใช้เลือกให้เครื่องมือนี้ทำงานแบบ Manual ซึ่งก่อนที่จะทำการวัดโดยใช้เครื่องมือนี้ ผู้วัดควรกำหนดจำนวนจุดที่จะทำการวัดเสียก่อน โดยเลือกจากเมนู Setting -> Manual จากนั้นผู้วัดสามารถกำหนดจุดที่จะวัดลงบนภาพหลอดเลือดบริเวณพื้นที่ด้านขวามือของส่วนในการแสดงภาพ โดยกำหนดจุดที่อยู่บนขอบด้านในก่อน แล้วจึงกำหนดจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกที่เป็นจุดของจุดที่อยู่บนขอบด้านใน จากนั้นเครื่องมือนี้จะแสดงเส้นเชื่อมจุดให้ ถ้าผู้ใช้เห็นว่าจุดที่กำหนดไว้แล้วไม่ถูกต้อง ผู้ใช้สามารถที่จะตัดจุดนั้นทิ้ง หรือทำการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกโดยที่ไม่ต้องเข้าสู่สถานะที่สามารถแก้ไข เมื่อทำการกำหนดจุดที่จะวัดเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้กดปุ่ม Update Measurement เพื่อทำการวัดค่าความหนาของผนังหลอดเลือดเช่นเดียวกัน

7. เมื่อต้องการบันทึกผลการวัดให้เลือกเมนู File -> Save Result โดยที่เครื่องมือนี้จะให้ผู้ใช้บันทึกผลการวัดที่เป็นแฟ้มข้อความก่อนแล้วจึงบันทึกผลการวัดที่เป็นชุดภาพหลอดเลือดที่แสดงบริเวณที่ใช้ในการวัด

ภาคผนวก ข

บทความที่นำเสนอในงานการประชุมวิชาการ

บทความเรื่อง “เครื่องมือวัดความหนาของผนังหลอดเลือดโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ” นำเสนอในงานประชุมวิชาการ The 4th National Computer Science and Engineering จัดที่ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 16-17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543 บทความนี้ตีพิมพ์ไว้ใน Proceeding of the 4th National Computer Science and Engineering Conference หน้า 33 - 42



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องมือวัดความหนาของผนังหลอดเลือดโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ

A Measuring Tool for Vascular Wall Thickness: An Image Analysis Approach

อุรีรัฐ วัฒนชนม์¹ นงลักษณ์ โควาวิสารัช² และ สุธิลักษณ์ ปทุมราช³

Ureerat Wattanachon¹ Nongluk Covavisaruch² and Suthiluk Patumraj³

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering^{1,2} Department of Physiology, Faculty of Medicine³

Chulalongkorn University, Bangkok 10330

E-Mail: a0518421@student.chula.ac.th¹ nongluk.c@chula.ac.th² medspr@hotmail.com³

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอเครื่องมือที่ใช้การวิเคราะห์ภาพมาช่วยในการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดที่มองผ่านเครื่อง light microscope เนื่องจากลักษณะของภาพหลอดเลือดมีความแตกต่างหลากหลายมาก ทั้งจากลักษณะของหลอดเลือดเอง จากการเตรียมสไลด์ในห้องปฏิบัติการ และจากการที่ข้อมูลภาพที่นำมาใช้ต้องผ่านหลายสื่อ จึงทำให้เครื่องมือนี้ไม่สามารถให้ผลการวัดที่ดีกับทุกภาพได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเครื่องมือเป็น 3 แบบคือ *แบบอัตโนมัติ* *แบบกึ่งอัตโนมัติ* และ *แบบกำหนดเองโดยผู้วัด* ซึ่งการวัดแบบอัตโนมัติ เครื่องมือจะคัดเลือกคู่จุดที่เหมาะสมทั้งหมดที่จะเป็นตัวแทนในการวัดโดยอัตโนมัติ แล้วคำนวณค่าความหนาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานให้ สำหรับการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ ผู้ใช้สามารถตัดเพิ่ม หรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคู่จุดที่การวัดแบบอัตโนมัติได้คัดเลือกมาได้ แล้วจึงคำนวณผลการวัดให้ ส่วนการวัดแบบกำหนดเองโดยผู้วัดนี้ ผู้ใช้สามารถกำหนดคู่จุดการวัดได้เองแล้วจึงคำนวณผลการวัดให้ ผู้วิจัยได้ประเมินผลเครื่องมือนี้กับภาพที่สร้างขึ้นซึ่งประกอบด้วยภาพวงกลมและวงรีที่มีความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการวัดความหนาเป็น 0.81% สำหรับภาพทดสอบที่มีความหนา 1 ซม. และ 1.27% สำหรับภาพทดสอบที่มีความหนา 2 ซม. ซึ่งเป็นค่านี้น้อยมาก นอกจากนี้ยังได้ทดลองวัดความหนากับภาพหลอดเลือดจำนวนหนึ่ง จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลพบว่า สำหรับภาพหลอดเลือดที่มีความหนาค่อนข้างสม่ำเสมอ ค่าความหนาที่วัดได้น่าจะมีความใกล้เคียงกับค่าความหนาจริงมากกว่าค่าที่วัดโดยคน แต่อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเห็นว่าไม่ควรเปรียบเทียบผลการวัดจากเครื่องมือกับการวัดที่ทำโดยคนสำหรับหลอดเลือดโดยทั่วไป เนื่องจากการวัดที่ทำโดยคนมีความไม่แน่นอนทำให้มีความแปรปรวนสูงมาก

คำสำคัญ: เครื่องมือวัด ความหนาของผนังหลอดเลือด การวิเคราะห์ภาพ

Abstract: This paper presents an image analysis tool for measuring vascular wall thickness from an image taken through a light microscope. Since wide image variations are encountered, which are caused from the shape of blood vessel itself, from slide preparation, and from image acquisition process in that data must pass through several media, hence, this tool cannot give good result to every image. We, therefore, design our tool to work in three modes; *automatic*, *semi-automatic* and *manual*. With *automatic* mode, this tool automatically selects all vascular wall pixel pairs which are likely to be good representatives in the measuring process. Average thickness and standard deviation are automatically calculated. In *semi-automatic* mode, pixel pairs from automatic mode can be selectively discarded, added, or repositioned by users, and calculations are done afterwards. With *manual* mode, users can manually select their own pixel pairs and calculations are then processed. We have evaluated our tool with synthetic images, two circle rings and two oval rings with one and two centimeters thick. The average thickness errors are minute, 0.81% for the one-centimeter rings and 1.27% for the two-centimeter rings. In this research, tests on images of various slides of arteries have also been done. From the experimental results and the analysis of the results, it is concluded that, for blood vessels whose thickness does not vary too much, those measured by this tool should be closer to the real vascular wall thickness than those measured by human. However, it should be pointed out that we should not compare the results from this tool with those measured by human because the results from human can widely vary.

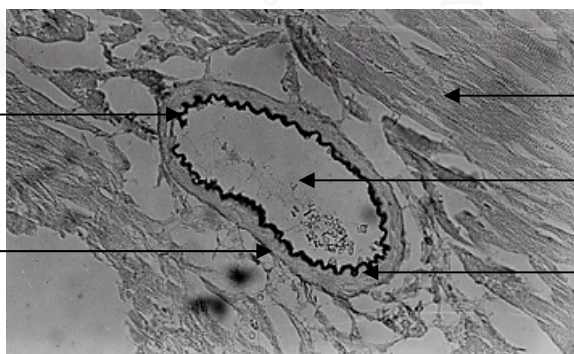
Key word: measuring tool, vascular wall thickness, image analysis

1. บทนำ

ระบบไหลเวียนโลหิตเป็นระบบที่สำคัญยิ่งต่อร่างกาย ในปัจจุบันพบว่าเมื่อใดก็ตามที่มีความผิดปกติเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของเซลล์ที่บุผนังหลอดเลือดแดง จะมีผลทำให้เกิดการเกาะตัวของไขมันที่ผนังหลอดเลือด แผ่นไขมันนี้เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ขนาดของช่องว่าง ที่ให้เลือดไหลผ่าน (Lumen) แคบลง ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการไหลของเลือดที่จะไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายลดลง และเกิดภาวะขาดเลือดไปเลี้ยงหัวใจได้ [1] ดังนั้นทางการแพทย์จึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของผนังหลอดเลือดที่หนาขึ้น เพราะเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิต เช่น โรคหัวใจขาดเลือด โรคหลอดเลือดตีตัน เป็นต้น ฉะนั้นในงานวิจัยหลาย ๆ งานจึงได้ศึกษาค้นคว้าและทดลองเพื่อหาตัวยาหรือสมุนไพรที่มีผลต่อการลดความผิดปกติของเซลล์ที่บุผนังหลอดเลือด ซึ่งการทดลองดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบความหนาของผนังหลอดเลือดเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงความหนาของผนังหลอดเลือด ทำให้ทราบได้ว่าตัวยาหรือสมุนไพรชนิดใดที่มีผลต่อการลดความหนาของผนังหลอดเลือด ในปัจจุบันการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดทำโดยใช้คนเป็นผู้วัดจากภาพถ่ายหลอดเลือดหรือจากภาพหลอดเลือดที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ การวัดความหนาต้องใช้ความถูกต้องและความแม่นยำสูง แต่การใช้คนเป็นผู้วัดจะมีโอกาสทำหาค่าที่วัดได้ไม่แน่นอนและคลาดเคลื่อนสูง เพราะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เครื่องมือที่ใช้ในการวัด และการคาดคะเนและการตัดสินใจเลือกตำแหน่งการวัดของผู้ที่ทำการวัด เป็นต้น

ขอบด้านในของผนังหลอดเลือด

ขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด



เนื้อเยื่อรอบหลอดเลือด

ช่อง Lumen

ผนังหลอดเลือด

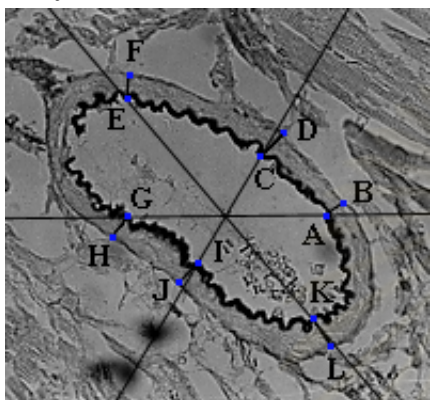
รูปที่ 1: ลักษณะของภาพหลอดเลือดที่นำมาใช้ในการศึกษา (ขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย)

เนื่องจากในปัจจุบัน การประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลได้เข้ามามีบทบาทต่องานต่าง ๆ เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงการแพทย์และการสาธารณสุข โดยใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการตรวจและวินิจฉัยโรค ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวคิดที่จะใช้เทคนิควิธีการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลมาช่วยในการวัดความหนาของผนังหลอดเลือด เพื่อให้เกิดความสะดวกในการวัดและทำหาค่าที่วัดได้แน่นอนและการวัดถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2. การวัดความหนาของผนังหลอดเลือดที่ใช้ในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาขั้นตอนการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ Microcirculation ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งการวัดความหนาของผนังหลอดเลือดทำโดยใช้คนเป็นผู้วัดจากภาพถ่ายของหลอดเลือดหรือจากภาพหลอดเลือดที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ภาพหลอดเลือดที่ใช้ในการศึกษาเป็นภาพหลอดเลือดแดงโคโรนารีในลักษณะภาคตัดขวาง (cross-section) ที่มองผ่านเครื่อง light microscope ซึ่งในภาพจะมีส่วนที่เป็นเนื้อเยื่ออยู่บริเวณรอบนอกของหลอดเลือด และส่วนที่เป็นหลอดเลือดซึ่งประกอบด้วยขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด เนื้อเยื่อที่อยู่ระหว่างขอบด้านในและขอบด้านนอกของหลอดเลือดคือ “ผนังหลอดเลือด” และช่องว่างที่ให้เลือดไหลผ่านซึ่งเรียกว่า Lumen ดังแสดงในรูปที่ 1

การวัดความหนาที่ทำกันในห้องปฏิบัติการแห่งนี้
ทำโดยผู้วัดกำหนดคู่จุดที่จะใช้วัดความหนาจำนวน 6 คู่-
จุด โดยใช้ **แบบการวัด** ซึ่งมีเครื่องหมายแบ่งหลอด
เลือดออกเป็น 6 ส่วนเป็นตัวช่วยในการกำหนดคู่จุด และ
การใช้แบบการวัดก็เพื่อให้การเลือกคู่จุดกระจายทั่ว
หลอดเลือดอีกด้วย รูปที่ 2 แสดงภาพหลอดเลือดที่มีแบบ
การวัดและคู่จุดที่เลือกมาวัดค่า



รูปที่ 2: ตัวอย่างภาพหลอดเลือดที่แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่
ใช้วัดความหนาของผนังหลอดเลือดโดยใช้แบบการวัดเป็น
ตัวช่วยกำหนดบริเวณ (ขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย)

สำหรับขั้นตอนการวัดความหนาของผนังหลอด
เลือดแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดคู่จุดบนผนังหลอดเลือด

- การกำหนดตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านในของ
ผนังหลอดเลือด วางแบบการวัดลงบนภาพเพื่อกำหนด
ตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือดเป็น
ตำแหน่งอ้างอิงในการวัด ผู้วัดอาจใช้ตำแหน่งอ้างอิงการ
วัดดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2 นั่นคือ ตำแหน่ง A, C, E,
G, I และ K ที่ขอบด้านในของผนังหลอดเลือดเป็น
ตำแหน่งอ้างอิงการวัด

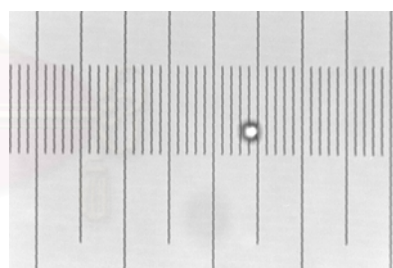
- การกำหนดตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก
ของผนังหลอดเลือด หาตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบด้าน
นอกของผนังหลอดเลือดที่เหมาะสมกับจุดที่อยู่บนขอบ
ด้านในของผนังหลอดเลือด นั่นคือควรมีเส้นตั้งฉากกับ
จุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือดและจุดที่อยู่
บนขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดร่วมกัน ฉะนั้น
ตำแหน่ง A ซึ่งเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอด

เลือด จะมีตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของผนัง
หลอดเลือดที่เหมาะสมคือ ตำแหน่ง B เป็นต้น

- ในกรณีที่มีตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือ
จุดที่อยู่บนขอบด้านนอกตรงกับตำแหน่งที่ไม่สามารถทำ
การวัดได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากขอบของผนังหลอดเลือดไม่
ชัดเจนหรือขาดหายไป ผู้วัดก็จำเป็นต้องหลีกเลี่ยง
บริเวณดังกล่าว โดยการหาตำแหน่งจุดที่อยู่บนขอบด้าน
ในของผนังหลอดเลือดและจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของ
ผนังหลอดเลือดใหม่ ซึ่งจะมีผลทำให้ตำแหน่งอ้างอิงเดิม
ทุกตำแหน่งถูกเคลื่อนย้ายไป

ขั้นตอนที่ 2 การวัดค่า

การวัดความหนาของผนังหลอดเลือดในขั้นตอนนี้
ทำโดยใช้ไม้บรรทัดวัดระยะห่างระหว่างคู่จุดที่ได้
กำหนดไว้แล้ว โดยค่าที่วัดได้จะต้องทำการเทียบกลับ
เป็นหน่วยไมโครเมตร ซึ่งในการเทียบกลับนี้จะใช้ภาพ
ไมโครมิเตอร์ซึ่งเป็นภาพถ่ายของสไลด์ไมโครมิเตอร์ที่มี
ความละเอียดของหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm) ที่
มองผ่านเครื่อง light microscope ที่มีกำลังขยายเท่ากับ
กำลังขยายของภาพถ่ายหลอดเลือด ดังรูปที่ 3 จากนั้น
คำนวณความหนาเฉลี่ยจากค่าที่วัดได้ทั้งหมด



รูปที่ 3: ภาพถ่ายสไลด์ไมโครมิเตอร์
(ขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย)

3. ปัญหา อุปสรรค และ แนวทางแก้ปัญหา

3.1 ปัญหาและอุปสรรค

จากการศึกษาและสำรวจขั้นตอนการวัดความหนาที่
ใช้ในปัจจุบัน พบว่าวิธีที่ใช้ในปัจจุบันมีโอกาสทำให้ผล
การวัดความหนามีความแปรปรวนและคลาดเคลื่อนสูง
ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุหลายประการ ดังนี้

1. **ลักษณะของหลอดเลือดที่แปรปรวนหลากหลาย**
มาก อาทิเช่น มีขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดที่ชัดเจน ผิวผนังหลอดเลือดค่อนข้างเรียบ ขอบด้านในของผนังหลอดเลือดหยาบมากและมีส่วนที่ขาดหายไป มีไขมันภายในช่องว่าง ตัวอย่างของหลอดเลือดประเภทนี้แสดงดังรูป 4 (ก) บางหลอดเลือดจะมีขอบด้านในที่ชัดเจนกว่าขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือด และขอบด้านในของผนังหลอดเลือดไม่หยาบมาก ดังรูปที่ 4 (ข) สำหรับรูปที่ 4 (ค) มีขอบด้านในที่ชัดเจนกว่าขอบด้านนอก ขอบด้านในไม่หยาบและมีลักษณะของขอบที่สมบูรณ์ และรูปที่ 4 (ง) จะมีลักษณะของขอบด้านนอกที่ไม่ชัดเจน เป็นต้น

2. **ลักษณะของภาพหลอดเลือดไม่ชัดเจน** เนื่องจากการย้อมสีที่ไม่สม่ำเสมอ สัญญาณรบกวนจากการพิมพ์ออกทางเครื่องพิมพ์ การล้างอัดขยายรูป และความแตกต่างของสี ซึ่งบางภาพมีความแตกต่างของสีมาก บางภาพก็มีความแตกต่างของสีน้อย ลักษณะของภาพหลอดเลือดประเภทนี้แสดงดังรูปที่ 4 (ค) และ 4 (ง)

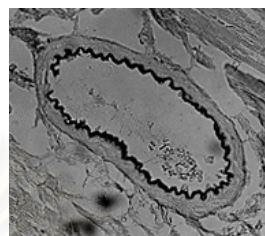
3. **ปัญหาและความยุ่งยากของคนที่วัดด้วยมือ**
สืบเนื่องจากลักษณะของหลอดเลือดและภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความแตกต่างและแปรปรวนสูงดังกล่าวข้างต้น ทำให้การกำหนดตำแหน่งจุดที่วัดทำได้ยากและต้องใช้เวลา ความยุ่งยากอีกประการหนึ่ง คือ การวัดค่าความหนาด้วยมือจากรูปภาพต้องมีการนำค่าที่ได้ไปคำนวณต่อ ซึ่งการทำงานหลายขั้นตอนหลาย ๆ ครั้ง ทำให้เกิดความเหนื่อยล้าและเกิดความสะเพร่าได้ ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการวัดได้ง่าย

4. **เครื่องมือที่ใช้วัดยังไม่มีความมาตรฐาน** เพราะใช้ไม้บรรทัดธรรมดาความละเอียดของสเกลไม่เพียงพอ และไม่บรรทัดที่ใช้ในแต่ละครั้งก็อาจเป็นคนละอัน ทำให้การวัดคลาดเคลื่อนได้ง่าย

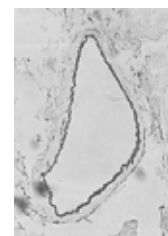
3.2 แนวทางแก้ปัญหา

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลมาช่วยลดความแปรปรวนจากการปฏิบัติงานที่ซ้ำๆ ที่ใช้คนทำมาเป็นการใช้คอมพิวเตอร์ โดยจะใช้การ

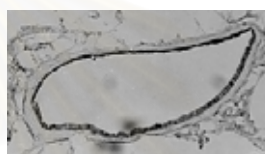
ประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลมาช่วยในการกำหนดจุดในการวัด แต่เพื่อให้เครื่องมือวัดด้วยวิธีการวิเคราะห์ภาพนี้มีความคล่องตัว จึงมีแนวคิดให้มีลักษณะที่ผู้วัดมีส่วนในการคัดเลือกจุดที่จะใช้งานได้อีกขั้นหนึ่งด้วย



(ก) ขอบด้านในและขอบด้านนอกชัดเจน



(ข) ขอบด้านในชัดเจนกว่าขอบด้านนอก



(ค) มีการย้อมสีที่ไม่สม่ำเสมอ



(ง) สัญญาณรบกวนจากการพิมพ์ออกเครื่องพิมพ์

รูปที่ 4: ตัวอย่างภาพหลอดเลือดที่เป็นปัญหาและอุปสรรคต่อการวัด (ขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย)

4. ลักษณะของเครื่องมือวัดความหนาของผนังหลอดเลือด

จากปัญหาและอุปสรรคที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบเครื่องมือวัดความหนาของผนังหลอดเลือดนี้ด้วยกัน 3 ลักษณะ คือ การวัดแบบอัตโนมัติแบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบกำหนดเองโดยผู้วัด (manual) การวัด แบบอัตโนมัติ จะ “ค้นหา” บริเวณที่ควรถูกเลือกแล้ว “คัดเลือก” จุดจุดการวัดที่เหมาะสมทั้งหมด โดยจะแสดงตำแหน่งจุดจุดที่เลือก รวมทั้งคำนวณค่าความหนาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานให้ด้วย ส่วนการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ นั้น มีลักษณะคล้ายกับการวัดแบบอัตโนมัติ แต่จะมีคำสั่งให้ผู้ใช้เครื่องมือเป็นผู้มีส่วนในการตัดสินใจเลือกจุดจุดการวัดที่เครื่องมือเลือกมาจากการทำงานแบบอัตโนมัติว่ามีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวแทนในการวัดหรือไม่ โดยสามารถเลือกที่จะตัดทิ้งจุดจุดการวัดที่ไม่เหมาะสม หรือเพิ่มจุดจุดการวัดเพื่อให้ผลการวัดมี

ความถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนตำแหน่งของจุดที่อยู่บนขอบด้านในหรือที่ขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดให้ถูกต้องได้ ทั้งนี้เนื่องจากภาพที่ใช้ทำการวัดมีความหลากหลายและแปรปรวนมาก ทำให้การใช้การทำงานแบบอัตโนมัติไม่อาจให้ผลดีได้กับทุกภาพ สำหรับการวัดแบบสุดท้ายเป็นการเปิดทางให้ผู้วัดสามารถ กำหนดจุดที่จะวัดเองทั้งหมด เพียงแต่เครื่องมือนี้จะช่วยในเรื่องของการแสดงผลและการคำนวณเท่านั้น

5. การกำหนดจุดที่เหมาะสมแบบอัตโนมัติ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ

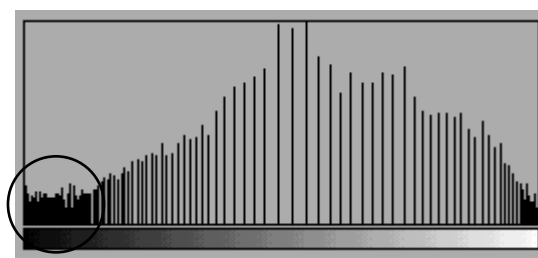
ในส่วนนี้เครื่องมือจะทำการ ค้นหา จุดจุดที่ “น่าจะใช้” วัดความหนา จากนั้นจะ คัดเลือก เอาเฉพาะจุดจุดที่ควรใช้ในการวัดโดยเลือกจุดจุดที่ไม่เบี่ยงเบนจากกลุ่มจุดจุดที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงมากเกินไป สำหรับขั้นตอนในหัวข้อนี้ประกอบด้วย 5.1 ขั้นตอนการค้นหาจุดจุดที่น่าจะใช้วัดความหนา ซึ่งประกอบด้วย การหาจุดจุดที่อยู่บนขอบด้านใน และการหาจุดจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก และ 5.2 เป็นขั้นตอนการคัดเลือกจุดจุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 ขั้นตอนการค้นหาจุดจุดที่น่าจะใช้วัดความหนา

5.1.1 การหาจุดจุดที่อยู่บนขอบด้านใน เป็นการค้นหาตัวแทนของจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือดซึ่งมีวิธีการค้นหาดังนี้

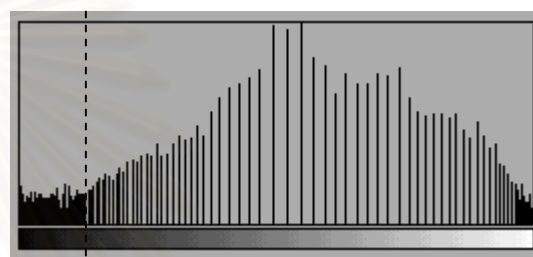
ขั้นตอนที่ 1 ทำเป็นภาพลักษณะฐานสอง (Binary image) ซึ่งการหาค่าขีดแบ่งจะพิจารณาจากลักษณะของ histogram ของภาพที่ผ่านการทำ histogram equalization [2] จากการศึกษาลักษณะของภาพหลอดเลือดพบว่า บริเวณที่เป็นขอบด้านในของผนังหลอดเลือดจะมีค่าระดับเทาที่ค่อนข้างต่ำและมีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่เป็นกลุ่มหนาแน่น เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของ histogram พบว่าช่วงกราฟจะมีลักษณะหนาแน่นอยู่ช่วงหนึ่งดังรูปที่ 5 (ก) และจากการทดลองพบว่าบริเวณช่วงกราฟดังกล่าวจะมีค่าระดับเทาของขอบที่เป็นผนังด้านในของหลอดเลือดอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของภาพหลอดเลือด จึง

เลือกค่าขีดแบ่งที่บริเวณกลุ่มหนาแน่นดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 5 (ข)



↑ บริเวณที่หนาแน่นของกราฟ

(ก) บริเวณที่หนาแน่นของกราฟ



ค่าขีดแบ่ง

(ข) ตำแหน่งของกราฟที่ใช้เลือกค่าขีดแบ่ง

รูปที่ 5: ลักษณะของ histogram ที่ใช้ในการพิจารณาหาค่าขีดแบ่ง

ขั้นตอนที่ 2 การค้นหาจุดที่อยู่บนขอบด้านในของหลอดเลือด มีขั้นตอนดังนี้

- จากจุดศูนย์กลางภาพลากเส้นตรง 360 เส้น ซึ่งแต่ละเส้นห่างกัน 1 องศา
- เดินไปตามเส้นตรงจากจุดศูนย์กลางจนถึงจุดที่คาดว่าเป็นผนังด้านในของหลอดเลือด แล้วให้ถือว่าจุดนั้นเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านในของผนังหลอดเลือด ซึ่งจะได้ผลมา 360 จุดหรือน้อยกว่าในกรณีที่ผนังด้านในของหลอดเลือดขาด เพราะไม่สามารถที่หาจุดที่อยู่บนขอบด้านในได้
- จากแต่ละจุดที่อยู่บนขอบด้านในที่หาได้ ให้เดินไปตามขอบ (edge tracing) [3] ซึ่งจะได้เป็น contour 360 เส้นหรือน้อยกว่า จากนั้นเลือก contour ที่มีความยาวสั้นมากที่สุดเป็น contour ของขอบด้านในของผนังหลอดเลือด

- คัดเลือกจุดที่อยู่บนขอบด้านใน โดยเลือกจุดที่เส้นตรงแต่ละเส้นตัดกับ contour ของขอบด้านในของผนังหลอดเลือด

5.1.2 การหาจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำเป็นภาพลักษณะฐานสอง การหาค่าขีดแบ่งโดยใช้วิธีเดียวกันกับข้างต้น แต่จะต้องเปลี่ยนสีของ contour ของผนังด้านในของหลอดเลือดที่หาไว้ก่อนนี้ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับเทาของ Lumen ก่อน

ขั้นตอนที่ 2 การค้นหาจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของหลอดเลือด มีขั้นตอนดังนี้

- สร้างเส้นตั้งฉากกับจุดที่อยู่บนขอบด้านในที่ได้คัดเลือกไว้แล้ว
- เดินไปตามเส้นตั้งฉากจนถึงจุดที่คาดว่าจะ เป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของหลอดเลือด ถ้าไม่พบจุดที่น่าจะเป็นจุดที่อยู่บนขอบด้านนอก ก็จะทิ้งจุดที่อยู่บนขอบในนั้น ๆ ไป

ขั้นตอนที่ 3 คัดเลือกเฉพาะจุดจุดที่มีมุมระหว่างเส้นตั้งฉากกับเส้นสัมผัสของจุดที่อยู่บนขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดอยู่ในช่วงเบี่ยงเบนได้บวกลบ 10 องศา

5.2 การคัดเลือกเฉพาะจุดจุดที่ “ควร” ใช้ในการวัด

จากขั้นตอนที่ผ่านมาจะได้จุดจุดที่ “น่าจะใช่” วัดความหนาของผนังหลอดเลือด แต่ยังมีบางจุดจุดที่ไม่เหมาะสมที่จะใช้วัดความหนาของผนังหลอดเลือดซึ่งจะทำให้การวัดความหนาที่มีความผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงควรกำจัดจุดจุดเหล่านี้ออกไป โดยใช้สมมติฐานที่ว่า ภายในส่วนของหลอดเลือดที่ครอบคลุมพื้นที่แต่ละส่วนย่อย (ในงานวิจัยนี้ใช้การแบ่งเป็น 6 ส่วนย่อย ตามตำแหน่งขององศา) ไม่น่าจะมีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงคัดเลือกเฉพาะจุดจุดที่มีความยาวของเส้นอยู่ในระยะเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม

6. การทดสอบเครื่องมือวัดความหนาแบบอัตโนมัติ

จากลักษณะของเครื่องมือที่ได้ออกแบบซึ่งมีด้วยกัน 3 ลักษณะ คือ แบบอัตโนมัติ แบบกึ่งอัตโนมัติ และแบบ

กำหนดเองโดยผู้วัด ซึ่งการคัดเลือกจุดจุดที่จะใช้เป็นตัวแทนในการวัดความหนาจะมีผลต่อเครื่องมือแบบอัตโนมัติและแบบกึ่งอัตโนมัติมากที่สุด แต่ไม่มีผลต่อเครื่องมือแบบกำหนดเองโดยผู้วัด เนื่องจากผู้วัดเป็นผู้กำหนดจุดจุดที่จะวัดเองทั้งหมด ฉะนั้นการทดสอบเครื่องมือวัดความหนาจะทดสอบการคัดเลือกจุดจุดที่ใช้วัดโดยอัตโนมัติเท่านั้น

6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือและการทดลอง

เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือนี้ ผู้วิจัยได้ทดสอบเครื่องมือด้วยภาพของวงกลมและวงรีที่สร้างขึ้นเพื่อให้ทราบความหนาที่แท้จริง เหตุผลที่ใช้ภาพลักษณะนี้เป็นภาพในการทดสอบ เพราะเป็นภาพลักษณะใกล้เคียงกับหลอดเลือด จากนั้นจึงทดลองวัดกับภาพหลอดเลือด สาเหตุที่ไม่ตรวจสอบเครื่องมือนี้กับภาพหลอดเลือดทุกแบบโดยตรงโดยเทียบกับการวัดโดยคน เนื่องจากความไม่แน่นอนและความแปรปรวนในการวัดที่ทำโดยคนสูงมาก และความหลากหลายของลักษณะหลอดเลือดดังได้กล่าวมาแล้ว

รายละเอียดของภาพที่ใช้ในการตรวจสอบและการทดลองมีดังนี้

1. ภาพที่สร้างขึ้น แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ขอบของผนังสมบูรณ์ ซึ่งเป็นภาพวงกลมและวงรีอย่างละ 2 ภาพ แต่ละภาพมีขอบหนา 1 ซม. และ 2 ซม. และแบบที่ขอบของผนังขาด เพื่อให้คล้ายกับลักษณะของหลอดเลือดอีกประเภทหนึ่งที่พบได้ในการปฏิบัติงานจริง ซึ่งเป็นภาพวงกลมและวงรีหนา 1 ซม. จำนวน 2 ภาพ ทุกภาพสแกนด้วยความละเอียด 150 dpi

2. ภาพหลอดเลือดจริง ในการทดลองได้เลือกใช้ภาพหลอดเลือดที่คนวัดสามารถกำหนดบริเวณที่เป็นขอบด้านในและขอบด้านนอกของผนังหลอดเลือดได้ และมีผนังหลอดเลือดที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถทำการเปรียบเทียบกับการวัดจากเครื่องมือนี้ได้ระดับหนึ่งโดยภาพมีกำลังขยาย 40 เท่า สแกนด้วยความละเอียด 150 dpi จำนวน 8 ภาพ

6.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ผลการทดสอบกับภาพที่สร้างขึ้นและผลการทดลองวัดความหนากับภาพหลอดเลือดจริง ซึ่งผลเป็นดังนี้

1. *ภาพที่สร้างขึ้น* จากการทดสอบกับภาพที่สร้างขึ้นได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 และแสดงค่าความหนาของภาพที่สร้างขึ้น ดังตารางที่ 1

2. *ภาพหลอดเลือดจริง* จากการทดลองกับภาพหลอดเลือดจริงได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 8 ส่วนค่าความหนาที่วัดได้โดยเครื่องมือนี้และค่าความหนาที่วัดได้โดยใช้คนเป็นผู้วัดแสดงในตารางที่ 2

6.3 วิเคราะห์ผล

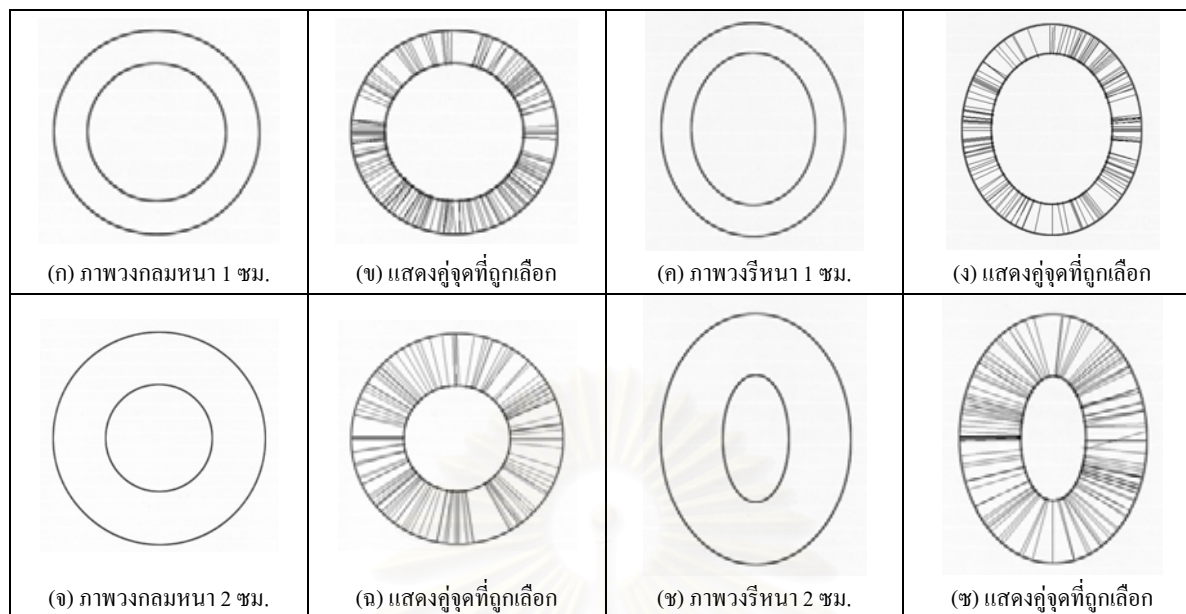
จากผลการทดสอบกับภาพที่สร้างขึ้นพบว่า เครื่องมือนี้มีความน่าเชื่อถือในการวัดค่อนข้างมาก เนื่องจากค่าที่วัดได้จากตารางที่ 1 ซึ่งทำกับภาพที่สร้างขึ้นโดยทราบความหนา มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมาก มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของภาพทดสอบมีค่าที่ต่ำด้วย แสดงว่าค่าความหนาที่วัดได้ของภาพทดสอบไม่แปรปรวนไปจากค่าจริงมาก การทดสอบกับภาพที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังขาดก็มีผลสอดคล้องกัน จึงเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของเครื่องมืออีกด้วย นอกจากนี้จากการที่ได้ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของเครื่องมือ ซึ่งให้ผลการวัดที่เหมือนกันทุกครั้ง ทำให้มีแนวโน้มว่าเครื่องมือนี้มีความแม่นยำในการวัดสูง

ในการทดลองวัดความหนากับภาพหลอดเลือดจริงจากรูปที่ 8 จะเห็นว่าภาพที่ขอบของผนังหลอดเลือดที่ค่อนข้างชัดเจน เช่น ในตัวอย่าง 1 และตัวอย่าง 2 จะคัดเลือกจุดจุดได้ดี และมีจำนวนมาก ส่วนภาพในตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง 3 และตัวอย่าง 4 ที่แม้ว่าขอบนอกจะไม่ชัดเจนมาก ก็คัดเลือกจุดจุดให้มากและเป็นจุดจุดที่ดีเป็นส่วนมาก ทำให้ค่าที่วัดได้น่าจะมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริง และน่าเชื่อถือมากกว่าการวัดเพียง 6 จุดจุดและทำโดยคน

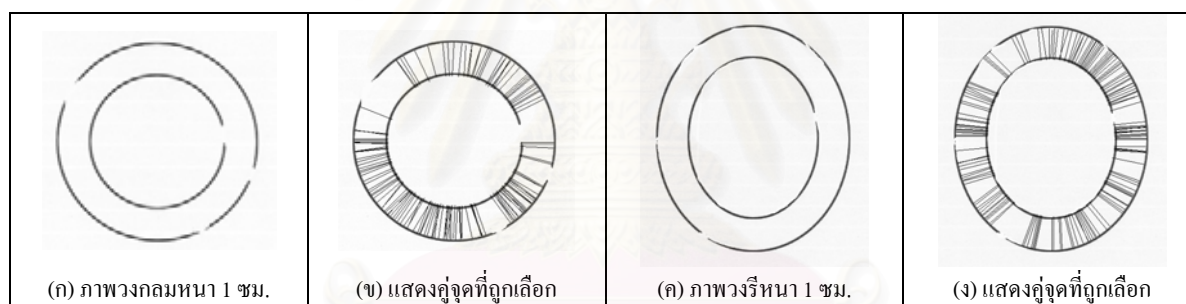
สำหรับตัวอย่าง 5 ถึงตัวอย่าง 8 เป็นภาพที่ไม่ชัดเจนและมีปัญหา ซึ่งเครื่องมือคัดเลือกจุดจุดได้ไม่ค่อยดี ค่าที่วัดได้จึงยังไม่น่าเชื่อถือ แต่อย่างไรก็ตาม จุดจุดที่เครื่องมือเลือกมาให้ ก็ยังสามารถนำมาให้คนพิจารณาใช้ในกรณีวัดแบบกึ่งอัตโนมัติได้ต่อไป สำหรับตารางที่ 2 แสดงให้เห็นผลการทดลองที่วัดโดยใช้คนเทียบกับเครื่องมือ จะเห็นว่าสำหรับหลอดเลือดที่มีผนังหนาค่อนข้างสม่ำเสมอ เช่น ตัวอย่าง 2 ถึงตัวอย่าง 4 ค่าที่วัดได้โดยเครื่องมือมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้โดยคน แต่จำนวนจุดจุดที่เครื่องมือนี้คัดเลือกมาได้มีมากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่วัดได้โดยใช้เครื่องมือนี้น่าเชื่อถือมากกว่าการใช้คนเป็นผู้วัด แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเห็นว่าไม่น่าจะเปรียบเทียบผลการวัดจากเครื่องมือกับการวัดโดยคน เนื่องจากการวัดที่ทำโดยคนไม่แน่นอนและมีความแปรปรวนสูงมาก

7. สรุปผล

การใช้การประมวลผลและการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลมาช่วยในการวัดความหนาของผนังหลอดเลือด ช่วยทำให้ผลการวัดที่ได้มีความแม่นยำกว่าการใช้คนเป็นผู้วัด อย่างเช่นปัจจุบัน เครื่องมือที่ได้ออกแบบไว้ ช่วยให้ความสะดวกรวดเร็วแก่ผู้วัด โดยผู้วัดสามารถเลือกให้เครื่องมือวัดค่าแบบอัตโนมัติ หรือเลือกวัดค่าแบบกึ่งอัตโนมัติโดยให้เครื่องมือคัดเลือกจุดจุดมาให้ก่อน แล้วจึงเลือกเปลี่ยนแปลงจุดจุดเอง หรือในกรณีที่ผู้วัดต้องการเลือกกำหนดจุดจุดเองก็สามารถทำได้ ซึ่งเครื่องมือวัดความหนานี้จะคำนวณค่าความหนาและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือที่ทำกับชุดภาพวงกลมและวงรีที่ทราบความหนาที่สร้างขึ้น พบว่าแต่ละชุดภาพมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ต่ำมาก โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของภาพทดสอบที่มีความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. เป็น 0.81 % และ 1.27 % ตามลำดับ แสดงว่าเครื่องมือนี้มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำสูง



รูปที่ 6: ตัวอย่างผลการทดสอบกับภาพที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังสมบูรณ์
ซึ่งเป็นภาพวงกลมและวงรีที่มีความหนา 1 ซม. และ 2 ซม. (ขนาดย่อส่วนลงจากภาพจริง)

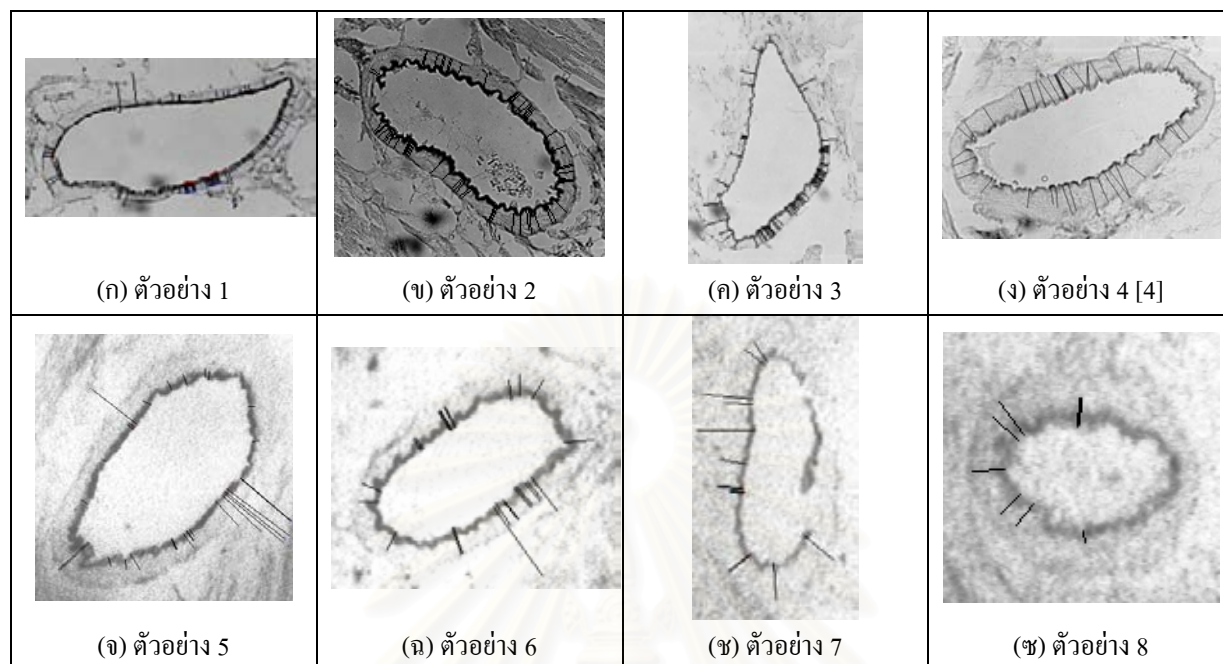


รูปที่ 7: ตัวอย่างผลการทดสอบกับภาพที่สร้างขึ้นแบบที่ขอบของผนังขาดหายไป
ซึ่งเป็นภาพวงกลมและวงรีที่มีความหนา 1 ซม. (ขนาดย่อส่วนลงจากภาพจริง)

ตารางที่ 1: ผลการวัดความหนาของภาพที่สร้างขึ้น

ลักษณะของภาพที่สร้าง	ภาพทดสอบ	ค่าความหนาที่วัดได้ (ซม.)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน (%) *
ขอบผนังสมบูรณ์	ภาพวงกลมหนา 1 ซม.	0.987	0.012	1.262
	ภาพวงรีหนา 1 ซม.	0.993	0.022	0.744
	ภาพวงกลมหนา 2 ซม.	2.006	0.014	0.275
	ภาพวงรีหนา 2 ซม.	1.955	0.025	2.253
ขอบผนังขาด	ภาพวงกลมหนา 1 ซม.	0.994	0.016	0.577
	ภาพวงรีหนา 1 ซม.	0.993	0.024	0.669

* ความคลาดเคลื่อน = $\frac{|\text{ค่าความหนาจริง} - \text{ค่าความหนาที่วัดได้}|}{\text{ค่าความหนาจริง}} \times 100\%$



รูปที่ 8: ตัวอย่างภาพที่แสดงคู่จุดที่ถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการวัดความหนาอย่างอัตโนมัติ (ขนาดย่อส่วนลงจากภาพถ่าย)

ตารางที่ 2: ผลการวัดความหนาของภาพหลอดเลือดจริงที่วัดโดยแบบใช้คนเป็นผู้วัดและแบบอัตโนมัติ

หลอดเลือด	แบบใช้คนเป็นผู้วัด			แบบอัตโนมัติ	
	ค่าความหนาที่วัดได้จากผู้วัด A (μm)	ค่าความหนาที่วัดได้จากผู้วัด B (μm)	จำนวนคู่จุด	ค่าความหนาที่วัดได้ (μm)	จำนวนคู่จุด
ตัวอย่าง 1	14.67	15.00	6	13.084	54
ตัวอย่าง 2	20.33	20.00	6	18.059	64
ตัวอย่าง 3	12.33	13.67	6	12.731	65
ตัวอย่าง 4	27.00	28.33	6	29.023	41
ตัวอย่าง 5	24.00	22.33	6	23.288	28
ตัวอย่าง 6	17.33	15.00	6	14.216	26
ตัวอย่าง 7	17.67	17.00	6	16.775	14
ตัวอย่าง 8	16.67	14.33	6	10.129	10

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคุณอัมพร จาริยะพงศ์สกุล ที่ได้เอื้อเฟื้อภาพตลอดเล่มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคุณสุภาพร บุญฤทธิ์ ที่ช่วยเหลือในงานวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สัญญา ร้อยมาลัย, “สรีรวิทยาของการไหลเวียน”, ขอนแก่น: หน่วยโรเนียวและออฟเซ็ท, คณะแพทยศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [2] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, “Digital Image Processing”, U.S.A.: Addison-Wesley, 1993.
- [3] R. Mukundan, “Binary Vision Algorithms in Java™”, Proceedings of Image and Vision Computing New Zealand, pp. 145-150, August 1999.
- [4] อัญชลี เจตะภัย, “ผลของสารสกัดจากกระเทียมต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับของไขมันในซีรัมและการทำงานของหัวใจในหนูที่ถูกทำให้เป็นเบาหวาน”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

ประวัติผู้วิจัย

นางสาวอุรวิรัฐ วัฒนชนม์ เกิดวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และยังสามารถนำเสนอผลงานวิจัยด้านการประมวลผลภาพในระดับชาติ ในปี พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย