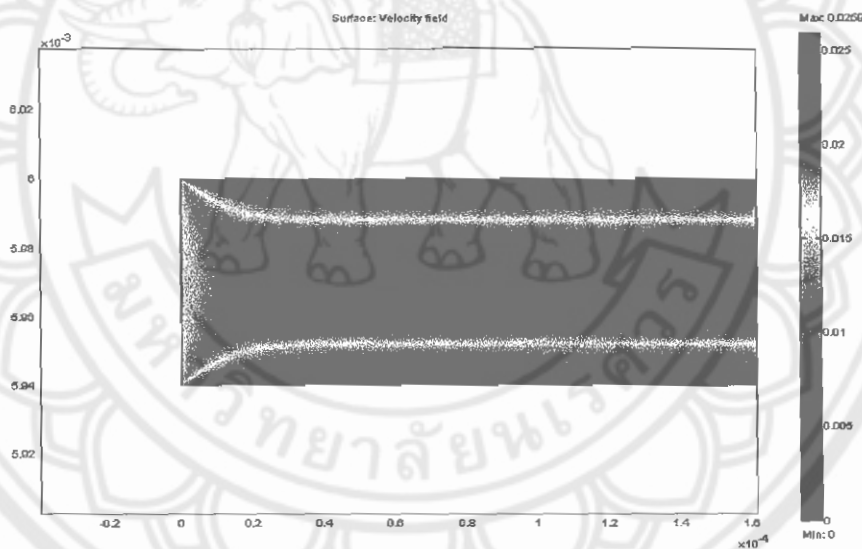


บทที่ 4

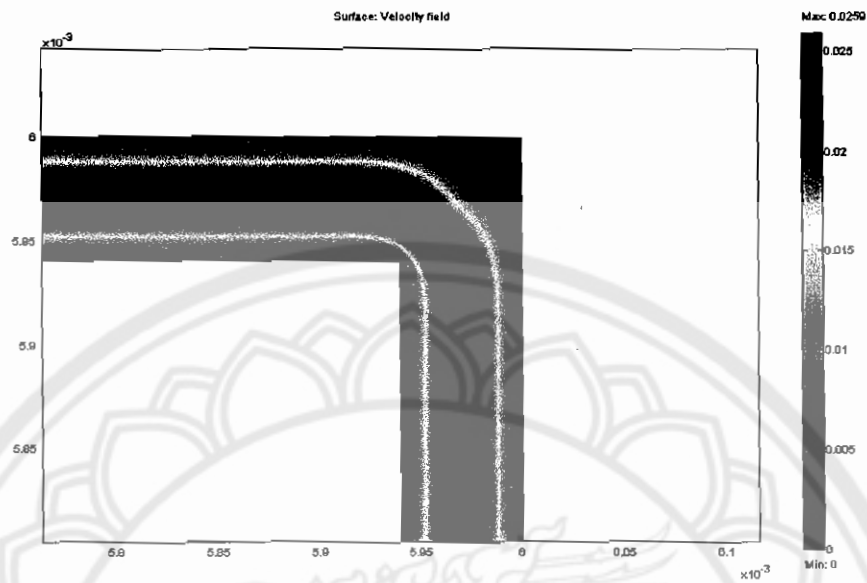
ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะแสดงภาพและกราฟการวิเคราะห์หลังจากที่โปรแกรมได้ทำการประมวลผลแล้ว โดยจะแสดงภาพของความเร็วบริเวณทางเข้า ความเร็วบริเวณข้องอ และความดันที่ผ่านท่อ ในที่นี้จะแสดงที่อัตราการไหล $2.05 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$

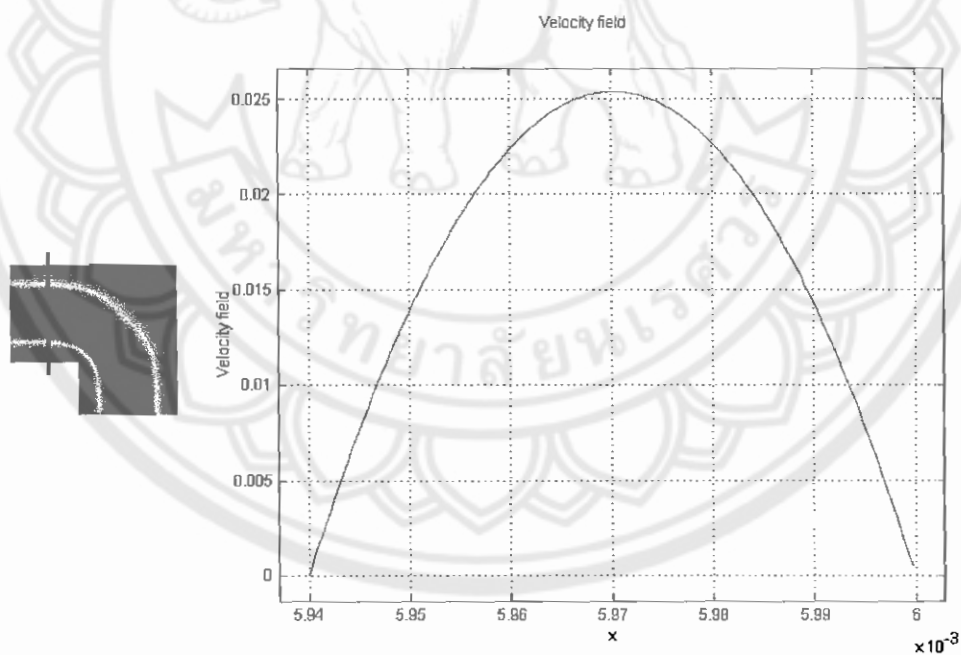
4.1 ความเร็วของเลือดที่ผ่านข้องอ 90 องศา



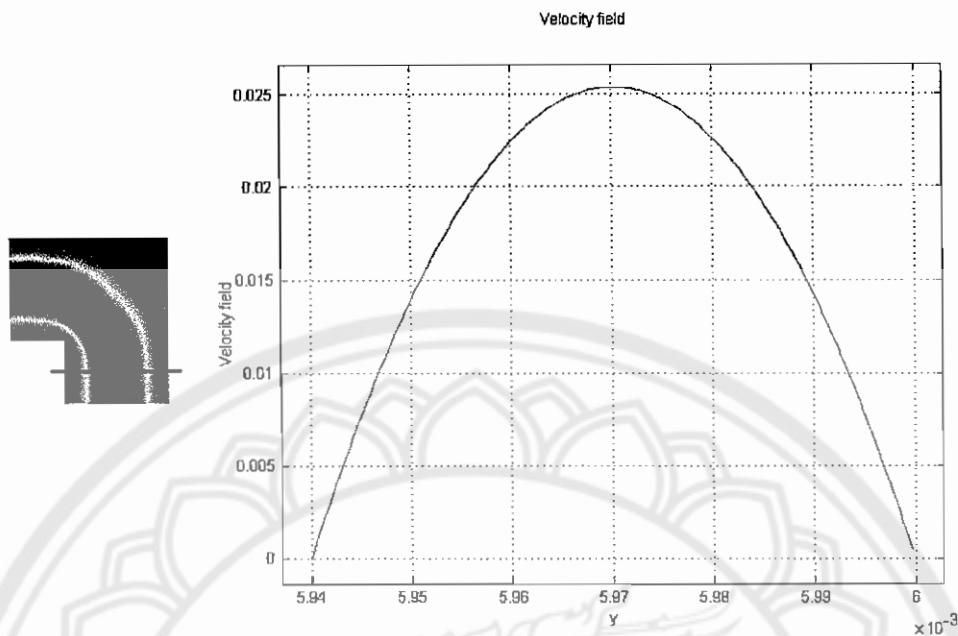
รูปที่ 4.1 แสดงความเร็วของเลือดบริเวณทางเข้าท่อ 2 มิติ



รูปที่ 4.2 แสดงความเร็วของเลือดบริเวณข้องอ 90 องศาแบบจำลอง 2 มิติ



รูปที่ 4.3 แสดงโปรไฟล์ความเร็วของเลือด ก่อนเข้าข้องอ 90 องศา ระยะ 0.83 เท่าของขนาดท่อ ตามแนวแกน X แบบจำลอง 2 มิติ



รูปที่ 4.4 แสดงโปรไฟล์ความเร็วของเลือดหลังออกข้องอ 90 องศา ระยะ 0.83 เท่าของขนาดท่อ ตามแนวแกน Y แบบจำลอง 2 มิติ

4.2 วิเคราะห์การไหลของเลือดผ่านข้องอ 90 องศา

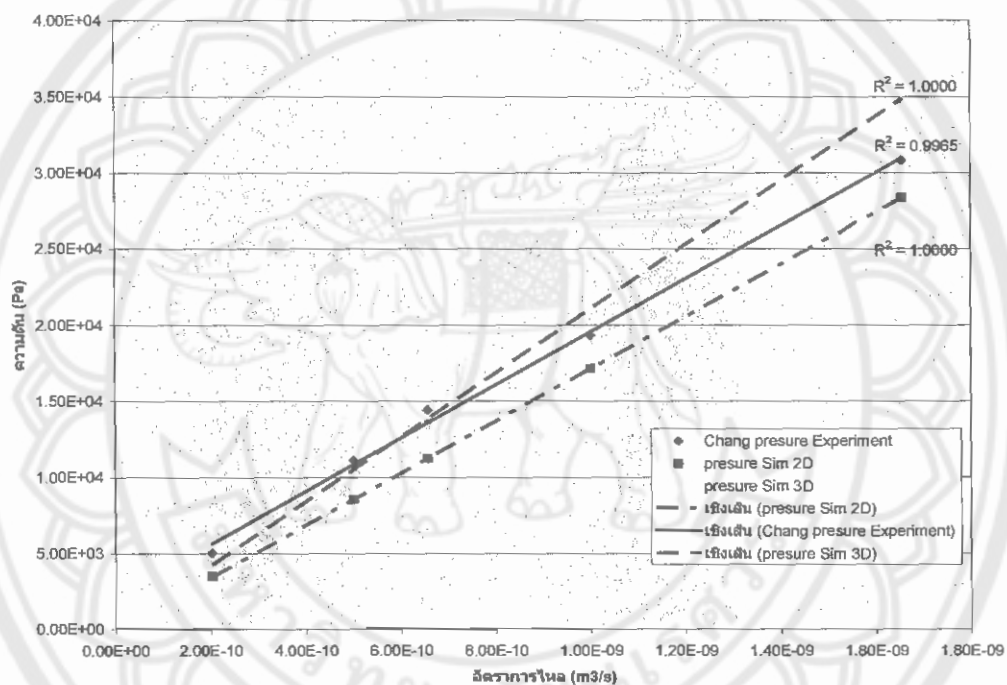
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าความเร็วของเลือดเริ่มต้นจะเป็นความเร็วคงตัวแล้วค่อยๆ พัฒนาขึ้น ชีตผิวจนความหนาชั้นชีตผิวเพิ่มขึ้นจนถึงกึ่งกลางท่อ เป็นการไหลเต็มท่อ (fully developed) ความเร็วตรงกึ่งกลางท่อจะมีความเร็วสูงแล้วความเร็วจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง เป็นผลเนื่องมาจากความหนืดของเลือด ความเร็วก่อนเข้าข้องอ ที่ระยะ 0.83 เท่าของขนาดท่อ โปรไฟล์ความเร็วจะไหลเป็นแบบพาราโบลาที่สมมาตรกันดังรูปที่ 4.3

เมื่อเลือดไหลผ่านข้องอ 90 องศา ระดับโมโมเอนตัม บริเวณออกจากข้องอ ที่ระยะ 0.83 เท่าของขนาดท่อ ลักษณะของโปรไฟล์และค่าของความเร็วแต่ละชั้นชีตผิวความเร็ว จะมีลักษณะโปรไฟล์เหมือนกันและค่าของความเร็วแต่ละชั้นชีตผิวความเร็วเท่ากัน ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

ความดันที่นำไปเปรียบเทียบกับค่าการทดลองของ Chang และคณะ จะเป็นค่าของความดันลดลง (pressure drop) ค่าของ pressure drop คือผลต่างของความดันทางเข้าและความดันทางออกท่อ ความดันทางออกท่อถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ pressure drop จึงได้จากความดันทางเข้าโดยเฉลี่ยตลอดหน้าตัดทางเข้าของท่อ

ลักษณะทางกายภาพของการไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 3 มิติ เมื่อมีการตัดเพื่อแสดงลักษณะของความเร็ว จะมีลักษณะคล้ายกับการไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 2 มิติ แต่ภาพที่ได้จะไม่ละเอียดเท่ากับการไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 2 มิติ เนื่องจากขีดจำกัดของการกำหนดขนาดของกริด และความสามารถของคอมพิวเตอร์

4.3 การเปรียบเทียบการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS 3.2b กับ การทดลองของ Chang และคณะ



ภาพที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหล ของการทดลอง (Chang และคณะ) การไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความดันการทดลอง (Chang และคณะ) การไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการจำลองการไหล ที่อัตราการไหลต่างๆ

อัตราการไหล $\times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$	ความดัน Pa				
	การทดลองของ Chang และคณะ	แบบจำลอง 2 มิติ		แบบจำลอง 3 มิติ	
		ผลการจำลอง	% error	ผลการจำลอง	% error
2.03	5,000	3,478	30	4,270	15
5.00	11,100	8,561	23	10,529	5
6.65	14,400	11,236	24	13,819	4
10.00	19,300	17,121	11	21,055	9
16.56	30,800	28,361	8	34,867	13
ค่าเฉลี่ย			18.9		9.2

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน(% error) แต่ละอัตราการไหลสามารถหาได้จาก

$$(\% \text{ error}) = [(| \text{ผลการทดลองจริง} - \text{ผลการจำลอง} |) / \text{ผลการทดลองจริง}] \times 100$$

$$(\% \text{ error})_{\text{เฉลี่ย}} = [\text{ผลรวม } (\% \text{ error})] / \text{จำนวนอัตราการไหลของ } (\% \text{ error}) \text{ ทั้งหมด}$$

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลมีความสัมพันธ์ของการทดลองของ Chang และคณะ แบบจำลองการไหลของเลือดแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลของการทดลองของ Chang และคณะ มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น จากของไหลนิวทอนเนียน คือของไหลที่มีความข้นเหนียวกับอัตราการไหลมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นต่อกัน ซึ่งความดันและความข้นเหนียวแปรผันตรงกัน ดังนั้นสามารถใช้สมมติฐานให้เลือดเป็นของไหลแบบนิวทอนเนียนได้ และเนื่องจากเลือดเป็นของไหลแบบนิวทอนเนียนจึงสามารถใช้สมการ นาเวียร์-สโตกส์ ในการคำนวณได้

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 2 มิติ เมื่อเทียบกับการทดลองจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยค่าความดันที่ได้แต่ละอัตราการไหลมีค่าน้อยกว่าความดันที่ได้จากการทดลองและมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 18.9 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 3 มิติ เมื่อเทียบกับการทดลองจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดลงที่ช่วงอัตราการ

ไหล $2.03 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ ถึง $6 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่ออัตราการไหลสูงกว่า $6 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 9.2 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 3 มิติในช่วงอัตราการไหลที่กำหนดจากการทดลอง จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 2 มิติ ถึง 2 เท่า เนื่องจากการไหลของเลือดผ่านแบบจำลอง 3 มิติ ในช่วงอัตราการไหลที่กำหนดจากการทดลอง มีรูปร่างที่ใกล้เคียงกับรูปร่างของท่อจริงทำให้ผลของความหนืดของเลือดที่กระทำกับผนังท่อมักมีค่าใกล้เคียงของท่อจริง จึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS 3.2b อาจเนื่องมีสาเหตุดังนี้

1. เนื่องจากความหนืดที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลองนี้เป็นค่าคงที่แต่ในการทดลองของ Chang และคณะมีความหนืดอยู่ในช่วง $4.9 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ถึง $5.4 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ซึ่งความหนืดมีผลต่อการไหลในท่อ

สาเหตุที่ใช้ความหนืดคงที่

- 1.1. เนื่องจากค่าของความหนืดขึ้นกับอุณหภูมิในการจำลองการไหลนี้กำหนดให้อุณหภูมิไม่มีผลต่อการไหล
- 1.2. มีระยะเวลาในการศึกษาโปรแกรม COMSOL MULTIPHYSICS 3.2b น้อย จึงใช้ความหนืดคงที่ เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา
2. การกำหนดค่าของความหนาแน่นของเลือด เนื่องจากบทความของ Chang และคณะ ไม่ได้กล่าวถึงความหนาแน่นของเลือดที่ใช้ในการทดลองการไหลผ่านช่องการไหลระดับไมโคร และเลือดที่ใช้เป็นเลือดแกะ จึงไม่สามารถที่จะทราบความหนาแน่นของเลือดที่ใช้ในการทดลองได้ จึงกำหนดค่าความหนาแน่นของเลือด เป็นความหนาแน่นของเลือดคนซึ่งมีค่าเท่ากับ $1,060 \text{ kg}/\text{m}^3$
3. การแสดงผลของ Chang และคณะ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหลในรูปของกราฟ ซึ่งการจำลองการไหลของเลือดจำเป็นต้องนำค่าจากการทดลองของ Chang และคณะ เพื่อการคำนวณและเปรียบเทียบ ค่าที่ได้จะเป็นค่าที่ได้จากการประมาณจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้
4. การสร้างกริด เมื่อแบ่งขนาดของกริดมีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ผลการวิเคราะห์เข้าใกล้ความถูกต้องยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงความแตกต่างระหว่างการทดลอง (Chang และคณะ) กับการจำลองการไหล

ลำดับ	การทดลอง(Chang และคณะ)	การจำลองการไหล
1.	เลือดเป็นของไหลแบบนอนนิวทอนเนียนเล็กน้อย	เลือดเป็นของไหลแบบนิวทอนเนียน
2.	ไม่ได้กำหนดความหนาแน่นของเลือด	กำหนดความหนาแน่นของเลือดเป็น 1060 kg/m^3
3.	มีความหนืดเป็นช่วงตั้งแต่ 4.9×10^{-3} ถึง $5.4 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	กำหนดความหนืดเป็น $5.15 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

