



แบบจำลองการไหลของของไหลผ่านวัตถุจม

FLOWING OVER IMMERSED BODY CHARACTERISTICS



นาย	ศรวุฒิ	ชนะถาวรรัตน์	85104418
นาย	สมเกียรติ	ศิริไพบุลย์ทรัพย์	85104434
นางสาว	สวรรยา	พินันโสตติกุล	85104457

วัน เดือน ปี..... ๑1 ก.ค. ๒5๕๐
 เลขทะเบียน..... 037๐๐3
 เลขเรียกหนังสือ..... T ๑8๐๙6.๓1๖8 น

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2538

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองการไหลของของไหลผ่านวัตถุจม


FLOWING OVER IMMERSED BODY CHARACTERISTICS

ผู้จัดทำ	นาย	ศราวุฒิ	ชนะถาวรลักษณ์	35104413
	นาย	สมเกียรติ	ศิริไพฑูย์ทรัพย์	35104434
	นางสาว	สวรรยา	พินันโสตติกุล	35104457




..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.สุทธิพงษ์ ศรีกรรรมณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. สยาม สงวนรัมย์)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	1
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	2
บทนำ	3
บทที่ 1 แบบจำลองการไหล	4
1.1 ทฤษฎีแบบจำลองการไหล	4
1.2 แบบจำลองการไหลและวิธีทดสอบทางออปติก	6
1.3 กระบวนการประมวลผลภาพ	13
บทที่ 2 การสังเกตทิศทางการไหลและเส้นทางเดินของการไหล	15
2.1 เส้นสายธารการไหล, เส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล และเส้นแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาค	15
2.2 ทางเดินของคายในของไหล	18
2.3 การวัดความเร็วโดยใช้วิธีสเปกเคิลโฟโตกราฟี	24
บทที่ 3 ทฤษฎีบท	35
3.1 เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์	35
3.2 ฟรูดนัมเบอร์	35
3.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์	36
3.4 ความหนาของชั้นของไหล	37
3.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อระยะทางเปลี่ยนไป	38
3.6 แรงจุดและค่าสัมประสิทธิ์ของแรงจุด	38
บทที่ 4 การคำนวณ	39
4.1 การคำนวณสำหรับแผ่นราบ	39
4.2 การคำนวณสำหรับวัตถุทรงกระบอก	42
บทที่ 5 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	48
5.1 อุปกรณ์การทดลอง	48
5.2 วิธีการทดลอง	55

บทที่ 6	โปรแกรมและการใช้งาน	57
6.1	โปรแกรมและใช้งานสำหรับการไหลผ่านแผ่นราบ	58
6.2	โปรแกรมและใช้งานสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอก	64
บทที่ 7	ผลการทดลอง	72
7.1	ผลการทดลองของการไหลผ่านแผ่นราบ	72
7.2	ผลการทดลองของการไหลผ่านทรงกระบอก	85
7.3	ภาพที่ได้จากการทดลองของการไหลผ่านแผ่นราบ	94
7.4	ภาพที่ได้จากการทดลองของการไหลผ่านทรงกระบอก	97
บทที่ 8	สรุปผลการทดลอง	100
8.1	สรุปผลที่ได้จากการคำนวณสำหรับการไหลผ่านแผ่นราบ	100
8.2	สรุปผลการทดลองที่ได้จากการสังเกตด้วยวิธีการนิตสี	102
8.3	สรุปผลที่ได้จากการคำนวณสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอก	105
8.4	สรุปผลปรากฏการณ์ต่างๆที่พบจากการบันทึกภาพ	107
บรรณานุกรม		
กิตติกรรมประกาศ		
ภาคผนวก		

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ผลของคลื่นแสงกับการไหลของของไหล	7
รูปที่ 1.2	แผนภาพแสดงกระบวนการทดลอง	13
รูปที่ 2.1	ภาพแสดงชั้นการไหลเทียบกับผู้สังเกต	18
รูปที่ 2.2	กราฟแสดงค่าดัชนีหักเหกับค่าความหนืดในสารละลายของซิงค์ไอโอไดด์	24
รูปที่ 2.3	ภาพที่ได้จากการเอ็กซ์เรย์	25
รูปที่ 2.4	ภาพที่ได้จากวิธีสเปกเคิลโฟโตกราฟี	26
รูปที่ 2.5	ภาพแสดงกลุ่มของสเปกเคิลซึ่งมีขนาดความเร็วแตกต่างกัน 3 กลุ่ม	28
รูปที่ 2.6	ภาพที่ได้จากระบบของยังก์สเฟริงก์	30
รูปที่ 2.7	ภาพแสดงแผนภูมิระบบตรวจจับและคำนวณหาค่าอัตราโมเมนต์ของสเปกเคิลแกรม	31
รูปที่ 2.8	รูปแบบการติดตั้งสำหรับวิธีการสร้างใหม่	33
รูปที่ 2.9	ภาพแสดงระบบของความเร็วของขอบที่เท่ากัน	33
รูปที่ 3.1	ปริมาตรควบคุมและพิกัดต่าง ๆ ในช่องทางเปิด	35
รูปที่ 3.2	ความหนาของชั้นของไหล	37
รูปที่ 4.1	แสดงภาพแผ่นราบ	39
รูปที่ 4.2	แสดงภาพทรงกระบอกกลม	42
รูปที่ 4.3	การสร้างไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับแผ่นราบ	47
รูปที่ 4.4	การสร้างไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์สำหรับทรงกระบอก	47
รูปที่ 5.1.1 a	รูปคู่ทดลอง	48
รูปที่ 5.1.1 b	รายน่าส่วนบน	48
รูปที่ 5.1.2 a	แบบคู่ทดลองด้านข้าง	49
รูปที่ 5.1.2 b	แบบคู่ทดลองด้านบน	49
รูปที่ 5.1.3	ชุดตะแกรง	50
รูปที่ 5.1.4	ชุดฉีดคาย	50
รูปที่ 5.1.5	ชุดปั๊มและวาล์ว	52
รูปที่ 5.1.6 a	หม้อแปลงไฟฟ้า	53
รูปที่ 5.1.6 b	ชุดสายไฟ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.1.7 a	รูปแบบจำลองแผ่นราบและชุดแขน	54
รูปที่ 5.1.7 b	รูปแบบจำลองของทรงกระบอก	54
รูปที่ 5.2.1	การต่อชุดสายไฟของบีมกับหม้อแปลงไฟฟ้า	55
รูปที่ 7.1	ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 1	94
รูปที่ 7.2	ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 2	94
รูปที่ 7.3	ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 3	95
รูปที่ 7.4	ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 4	95
รูปที่ 7.5	ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 5	96
รูปที่ 7.6	ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 6	96
รูปที่ 7.7	ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกในการทดลองครั้งที่ 1	97
รูปที่ 7.8	ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกในการทดลองครั้งที่ 2	97
รูปที่ 7.9	ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกในการทดลองครั้งที่ 3	98
รูปที่ 7.10	ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกในการทดลองครั้งที่ 4	98
รูปที่ 7.11	ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกในการทดลองครั้งที่ 5	99
รูปที่ 7.12	ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกในการทดลองครั้งที่ 6	99
รูปที่ 8.1	แสดงกราฟระหว่างค่า C_D กับค่า Re_L ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์	101
รูปที่ 8.2	แสดงกราฟระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงดุดกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้จาก ทฤษฎี	101
รูปที่ 8.3	แสดงภาพชั้นขีดผิวของของไหลเมื่อมีการไหลแบบปั่นป่วนผ่านแผ่นราบ	102
รูปที่ 8.4	ภาพการไหลของอากาศเมื่อมีค่าความเร็วของการไหลอิสระเท่ากับ 3.3 เมตรต่อวินาที	103
รูปที่ 8.5	แสดงภาพที่ได้จากการไหลของน้ำที่ขึ้นความเร็วค่าต่าง ๆ กันโดยวิธีการ ฉีดคาย	104
รูปที่ 8.6	แสดงกราฟระหว่างค่า C_D กับค่า Re_D ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ 1	106
รูปที่ 8.7	แสดงกราฟระหว่างค่า C_D กับค่า Re_D ตามทฤษฎี	106
รูปที่ 8.8 a	ภาพแสดงปรากฏการณ์คาร์มานวอยเท็กซ์สตรีทที่เกิดขึ้นหลังทรงกระบอกกลม ซึ่งมีค่า $Re = 140$	107
รูปที่ 8.8 b	ภาพแสดงปรากฏการณ์คาร์มานวอยเท็กซ์สตรีทที่เกิดขึ้นหลังทรงกระบอกกลม ซึ่งมีค่า $Re = 170$	108
รูปที่ 8.9 a	ภาพการไหลผ่านทรงกระบอกกลมที่ค่า $Re = 19$	109

รูปที่ 8.9 b	ภาพการไหลผ่านทรงกระบอกกลมที่ค่า $Re = 26$	109
รูปที่ 8.9 c	ภาพการไหลผ่านทรงกระบอกกลมที่ค่า $Re \approx 55$	109
รูปที่ 8.9 d	ภาพการเกิดคอเลตารวอร์เท็กซ์ที่ค่า $Re = 2.9 \times 10^3$	109



บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้จัดทำขึ้น เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆของการไหลของของไหล โดยใช้แบบจำลองการไหล (Flow visualization) การทดลองนี้ใช้น้ำเป็นของเหลวในการทดสอบ และใช้สารผสมของนมและสีผสมอาหารเป็นคาย (Dye)

ในการทดลองจะทดลองในช่วงการไหลที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ทำการทดลองโดยให้น้ำไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่างๆ แล้วทำการบันทึกภาพถ่ายและบันทึกวีดิโอเทปของการไหล จากนั้นจึงวัดค่าต่างๆ ได้แก่ ความเร็วของการไหลและความดัน เมื่อได้ข้อมูลทั้งหมดจึงนำมาทำการสร้างสมการของการไหล (Streamline equation) เพื่อที่จะนำไปหาค่าต่าง ๆ ของการไหล ได้แก่ค่า สัมประสิทธิ์แรงกด , แรงกด , และความหนาของชั้นของไหล



ABSTRACT

This project is performed to examine the flow property of various types of fluid by employing the flow visualization method. This experiment used water as working fluid, milk and food coloring as dye.

This experiment tested the working fluid in laminar flow. In the experiment, working fluid would be flow across some objects. Then streamlines were recorded the result by video recorder and camera. We also inspect pressure velocity of fluid and pressure. When we got all necessary data, we used them to create streamline equations. Then we had used them to find the following; drag coefficient, drag force, boundary layer and streamlines.

บทนำ

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการบรรยายของโครงการนุศแบบจำลองการไหลของ

ของไหลผ่านวัตถุจม ซึ่งมีทฤษฎีเกี่ยวกับการหาค่าต่าง ๆ ของของไหล เช่น ค่าความหนาของชั้น

ของไหล, แรงฉุด ฯลฯ รายละเอียดของชุดทดลองของแบบจำลองการไหล และขั้นตอนการทดลอง

ของชุดทดลองในรายงานนี้ยังไม่ละเอียด ยังอยู่ในระหว่างการค้นคว้าหาเทคนิคการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

แบบจำลองการไหล

(FLOW VISUALIZATION)

1.1 ทฤษฎีของแบบจำลองการไหล

การเรียนรู้การปฏิบัติทางกายภาพจะมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น หากวิธีที่ใช้หรือเกี่ยวกับการปฏิบัติ สามารถสังเกตได้จริง คำกล่าวนี้จะเห็นได้ชัดเจนขึ้น ในกรณีของระบบการไหลซึ่งของไหล จะไหลไปในอุโมงค์หรือโดยรอบวัตถุแข็งอื่น ๆ จากการสังเกตการไหลดังกล่าวซึ่งอาจจะคงที่หรือ เปลี่ยนไปตามเวลา เราจะได้ความคิดในการพัฒนาระบบการไหลทั้งระบบอย่างไรก็ตามของไหลไม่ว่า อยู่ในสถานะก๊าซหรือของเหลวเป็นสิ่งที่มองไม่เห็น และการเคลื่อนไหวของมันยังมองไม่เห็น ด้วยตาเปล่าคือใช้การสังเกตโดยตรง เพื่อเราจะได้ทราบถึงการเคลื่อนไหวของของไหล เราจะต้อง มีวิธีเฉพาะที่จะทำให้การไหลนั้นมองเห็นได้ วิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีแบบจำลองการไหล วิธีนี้มี บทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการช่วยให้เข้าใจปัญหาของระบบการไหลได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามนอกจาก ประโยชน์ในด้านการศึกษแล้วประโยชน์ที่สำคัญของวิธีการดังกล่าว คือ ช่วยให้เราได้ข้อมูลทาง จำนวนจากภาพของการไหลได้ วิธีดังกล่าวให้ ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative data) ที่ครบถ้วน โดยไม่มีสิ่งใดรบกวนระบบการไหล ในทางกลับกันอุปกรณ์การวัดการไหลทางเดียว (Single flow - measuring instrument) เช่น ความดันหรืออุณหภูมิที่ใช้ทดลอง ที่ให้ข้อมูลได้เพียง จุดเดียวในสนามการไหล (Flowfield) นอกจากนั้นการไหลยังถูกรบกวนในอัตราหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของเครื่องวัด ตัวอย่างเช่น การวัดผลการทดลองของทฤษฎีระบบการ ไหลยังคงประสบปัญหากับการไหล ในการศึกษาเครื่องมือในการวัดผลซึ่งมีผลกระทบต่อผลการ ทดลองอย่างยิ่ง เพื่อที่จะแก้ปัญหาพื้นฐานจึงมีการพัฒนาที่ต่อเนื่องเพื่อที่จะลดขนาดของเครื่องวัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือในอีกทางหนึ่ง เพื่อปรับปรุงความสามารถในการวัดผลทางจำนวนของแบบจำลองการไหล หรือวิธีการสังเกตวิธีแบบจำลองการไหล สามารถแบ่งได้คร่าว ๆ ออกเป็น 3 ประเภท ประเภทแรกประกอบด้วยวิธีที่วัตถุอื่นถูกเพิ่มเข้าไปในของไหลซึ่งอาจจะเป็นแก๊ส หรือของเหลวก็ได้ วัตถุนั้นต้องมองเห็นได้และถ้าอนุซึ่งประกอบกันขึ้นเป็นวัตถุนั้นเล็กเพียงพอ เราอาจจะสรุปได้ว่าการเคลื่อนไหวของอนุเหล่านั้นเป็นแบบเดียวกับของไหลทั้งทิศทางและความเร็ว ดังนั้นวิธีแบบจำลองการไหลนี้จึงเป็นวิธีทางอ้อม เพราะเราจะสังเกตเห็นการเคลื่อนไหวของวัตถุอื่นแทนที่จะสังเกตจากของไหลโดยตรง ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนไหวของของไหลกับวัตถุอื่นนั้นจึงน้อยที่สุด แต่ก็หลีกเลี่ยงไม่ได้ทั้งหมดโดยให้ความหนาแน่นของอนุนั้นใกล้เคียงกับของของไหลมากที่สุด วิธีดังกล่าวนี้ให้ผลการทดลองที่ดีมาก แต่ความผิดพลาดก็อาจเกิดขึ้นได้จากการไหลที่ไม่คงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอนุนั้น ๆ แต่วิธีดังกล่าวก็ล้มเหลวในการที่จะให้ผลที่แน่นอน ถ้าหากสภาวะอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) ของของไหลในสนามการไหลต่างกัน หรือมีความหนาแน่นที่ต่างกัน (การไหลภายใต้ความดัน) คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของวัตถุอื่นมักจะแตกต่างกับของของไหล ถึงแม้ความหนาแน่นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และความเปลี่ยนแปลงของสถานะทางอุณหพลศาสตร์ก่อให้เกิดปรากฏการณ์รีแลกเซชัน (Relaxation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนไหวทางกลของของเหลวและวัตถุอื่น ความหลากหลายของความหนาแน่นของของไหลเป็นกุญแจที่นำไปสู่วิธีแบบจำลองการไหลประเภทที่ 2 เนื่องจากความหนาแน่นของของไหลเป็นตัวกำหนดเลขดัชนีหักเหของตัวกลางที่ไหลอยู่ การไหลภายใต้ความกดดันสามารถทำให้เห็นได้ โดยอาศัยวิธีการทางออปติก (Optic) ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของเลขดัชนีหักเหในสนามการไหล ระหว่างการทดสอบสนามการไหลที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันเป็นเฟสของวัตถุในแง่ของออปติก ซึ่งก็คือลำแสงที่ผ่านออปติกไปและมีผลกระทบกับเฟสของออปติก แต่ความเข้มของแสงหรือความกว้างคลื่นยังไม่เปลี่ยนไปหลังจากผ่านวัตถุนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนด้านหลังวัตถุจะให้แสงที่ไม่เป็นรูปร่างซึ่งจากแบบในแผ่นบันทึก เราจะสามารถหาข้อสรุปเกี่ยวกับความหนาแน่นที่แตกต่างกันในสนามการไหล

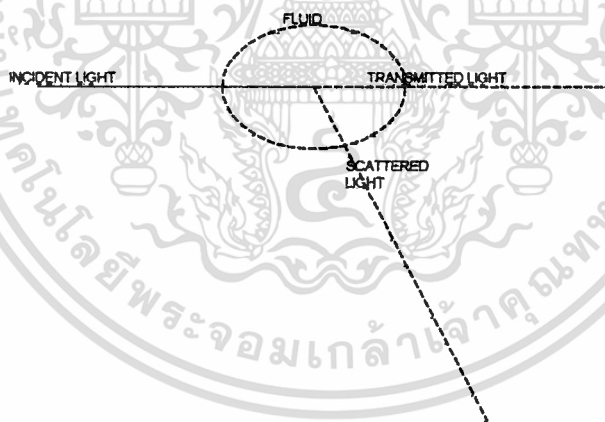
ส่วนการนำวิธีแบบจำลองการไหลทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมานี้ รวมถึงเรื่องของวัตถุอื่น และวิธีทางออปติก ซึ่งรวมถึงเรื่องของการไหลภายใต้ความกดดัน และไม่มีความกดดันตามลำดับ เราสามารถแยกวิธีแบบจำลองการไหลประเภทที่ 3 ได้ซึ่งก็คือการรวมกันของวิธี 2 วิธีก่อน ในกรณีนี้ วัตถุอื่นที่นำเข้ามาในการไหลก็คือพลังงาน (ในรูปของความร้อนหรือพลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้า) ดังนั้นองค์ประกอบของของไหลซึ่งมีระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบางกรณีต้องอาศัยแบบจำลองช่วยเพื่อพวกมันจะได้ถูกแยกออกจากของไหลที่เหลือ ในกรณีอื่นพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาสูงมาก จนกระทั่งองค์ประกอบของของไหลของตัวเองสังเกตเห็นได้ง่าย วิธีนี้มักจะใช้กับการไหลที่มีระดับความหนาแน่นต่ำ การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นในการไหลแบบนี้ มีน้อยเกินไปกว่าที่จะสังเกตได้ เพราะฉะนั้นวิธีที่ 3 นี้จึงใช้กับกรณีการไหลแบบที่ 3 ซึ่งแตกต่างจากการไหลแบบธรรมดาที่อยู่ภายใต้ความกดดันเรียกว่า การไหลของแก๊สความหนาแน่นต่ำ เราจึงต้องรู้ว่า แบบจำลองแบบที่ 3 เหมาะสมหรือไม่ เนื่องจากความแตกต่างจากการไหลแบบธรรมดาในแง่พลังงานที่ปล่อยออกมา

1.2 แบบจำลองการไหลและวิธีการทดสอบทางออปติก (Flow Visualization and Optical Testing Method)

จากหลายวิธีของการทดลองการไหลของของไหลก็มักจะมีข้อแตกต่างระหว่างสิ่งที่สังเกตได้และสิ่งที่สังเกตไม่ได้ (หรือมองเห็นกับมองไม่เห็น) การมองด้วยสายตาก็ไม่ใช่วิธีที่ดีมากแต่ที่ได้พูดถึงด้วยก็เพราะว่าส่วนใหญ่จะถูกอ้างอิงถึง ในการที่จะเทียบกับเกณฑ์อ้างอิงที่อาจเกิดความผิดพลาดได้ ในการประยุกต์วิธีการมองเห็นด้วยตาควรหลีกเลี่ยงวิธีการใส่เครื่องมือลงไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในของไหล เพราะจะก่อให้เกิดการรบกวนการไหล ถึงแม้ว่าจะทำให้ขนาดเล็กมาก ๆ ก็ตาม พื้นฐานของการมองใด ๆ ก็ตาม ต้องขึ้นกับแสงที่ผ่านของไหล แสงได้ถูกปรับปรุงให้สัมพันธ์กับการนำเสนอข้อมูลออกมา ส่วนในกรณีการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ของของไหลก็ทำได้ยุ่งยาก และนี่คือเหตุผลที่พยายามไม่ทำให้เกิดการรบกวนการไหล ซึ่งมีข้อแนะนำ 2 อย่างคือ

- 1) ประการแรกแสงซึ่งถูกแปลงผ่านของไหลและเปรียบเทียบกับสถานะเก่าของมัน โดยข้อมูลจะรับมาเมื่อแสงเดินทางตัดลำการไหลของของไหล
- 2) ประการที่ 2 แสงจะถูกเบนทิศจากบางจุดในของไหลไปยังตำแหน่งเจาะจงอื่น ๆ สมมติฐานทั่ว ๆ ไปก็คือ แสงจะรับเอาข้อมูลไว้ในตำแหน่งที่แสงเกิดการเบี่ยงเบน และแสงที่เบี่ยงเบนไปนี้จะไม่ถูกเปลี่ยนแปลง ขณะที่มันเดินทางผ่านของไหล ความเข้มของแสงที่ถูกเบี่ยงเบนมักจะมีค่าน้อยกว่าแสงที่ผ่านออกมามาก



รูปที่ 1.1 ผลของคลื่นแสงกับการไหลของของไหล

แสงที่ผ่านออกมาจากย่านของไหลก็จะถูกบันทึก และทำการวิเคราะห์และคุณสมบัติของรังสีนี้ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของแสงเดิม สำหรับคุณสมบัติของแสงก็สามารถแสดงค่าปริมาณด้วยตัวเลข โดยตัวเลขเหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามวิธีที่ใช้หาค่า และอาจแบ่งวิธีการวัดค่าปริมาณต่าง ๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงวิธีการวัดค่าปริมาณต่าง ๆ

Quantity changed and measured	Measuring method
Amplitude	Extinction measurement
Direction	Shadowgraph , Schlieren
Frequency	Doppler , Schlieren
Phase	Interferometry
Polarization	

การวัดในช่วงหยาบ ๆ ถูกประยุกต์มาใช้ในการไหล 2 เฟส โดยที่จะมีบางส่วนของลำแสงยังคงผ่านออกมาได้ องศาของการสูญเสียสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของแบร์ (Bear 'Law) โดยยอมให้สำหรับบางส่วนของลำแสงที่ถูกดูดซับไปในเฟสที่เปลี่ยนแปลงจากแสงซึ่งถูกสะท้อนจากแหล่งกำเนิด โดยขึ้นกับการหักเหของการไหล (เช่นการเปลี่ยนชั้นกับดัชนี) มุมหักเหซึ่งจะเห็นจากค่าเฉลี่ยของกราฟเงา (Shadowgraph) หรือวิธีชไลเรน (Schlieren) ซึ่งจะเล็กมากในแก๊ส โดยเฉพาะการแยกขององศา แต่ก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นในของไหล

เป็นที่รู้กันว่าความถี่ของคลื่นแสงจะถูกเลื่อน (Shift) เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler) โดยแสงจะสะท้อนจากเฟสที่วัตถุเคลื่อนที่ และจากการสังเกตในระบบชไลเรน โดยระบบนี้จะเชื่อมอยู่กับเครื่องเลเซอร์ดอปเปลอร์อานีโอมิเตอร์ (Laser doppler anemometer) และส่วนอื่นๆ ของระบบชไลเรนจะถูกนำมาใช้วัดความเร็วของส่วนกรอบหน้า และคลื่นที่แทรกสอดกัน ในแสงที่ผ่านความหลากหลายของดัชนีการหักเหของของไหล ก็จะเปลี่ยนเฟสของคลื่นแสงผ่านกับคลื่นอื่น ซึ่งจะแสดงอยู่ในช่วงที่หายไปของของไหล เฟสที่เปลี่ยนไปนี้จะมองเห็นและ

ถูกวัดปริมาณได้โดยค่าเฉลี่ยของออปติคัลอินเทอร์มิเตอร์ (Optical interometers) ทิศทางของการโพลาไรเซชัน (Polarization) ของคลื่นแสงที่ถูกโพลาไรซ์เชิงเส้นจะถูกเปลี่ยน ถ้าคลื่นแสงแพร่ผ่านสารละลายน้ำตาล ผลกระทบนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดความเข้มข้นของน้ำตาลในน้ำ เพื่อใช้ในการศึกษาการไหลในวิธีต่าง ๆ และการประยุกต์ใช้กับการไหลนี้ จะรวมเส้นทางของแสงที่ผ่าน เพื่อคำนวณค่าต่าง ๆ และจัดบันทึกไว้ โดยจะทราบปัญหาจากการทดลอง (เช่นการตรวจสอบรังสีเอ็กซ์) ถ้าจะแก้ปัญหาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกับของไหลในลักษณะสุ่ม ๆ ในการไหล 3 มิติอย่างแรกก็ต้องกำหนดแสงไว้เพื่อบอกถึงค่าความแตกต่างเมื่อผ่านย่านนี้ ชุดของข้อมูลที่บันทึกไว้จะถูกนำไปคำนวณโดยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยรับค่าทั้งสามแกน และวิธีคำนวณนี้เรียกว่าโทโมกราฟี (Tomography) โดยตำแหน่ง และจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าถ้าย่านการไหลสมมาตรแกน แม้ว่าเพียงทิศทางเดียวก็จะทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์

ในส่วนของแสงที่ผ่านการไหลไปไม่ได้จะถูกหักเหหรือกระจายออกไปแม้ว่าโมเลกุลของของเหลวซึ่งถูกฉีด (Seed) ก็ยังมีลักษณะกระจาย รังสีที่ถูกกระจายนี้ก็จะมีความเข้มมากกว่าที่มาจากโมเลกุลทั่ว ๆ ไป เพราะความเข้มนี้ขึ้นกับขนาดของการกระจายตัว การกระจายตัวแต่ละครั้งก็มีลักษณะเฉพาะทั้งความเข้ม และการโพลาไรซ์ของแสงที่ถูกกระเจิงนี้ก็ขึ้นอยู่กับทิศทางที่แสงถูกเปล่งออกมา ความถี่ของรังสีนี้ก็เปลี่ยนไปตามฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ (Doppler effect) หรืออุณหพลศาสตร์ของตัวกระเจิง ในที่สุดเราก็สามารถแยกออกกระหว่างการกระจายแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างรังสีที่ตกกระทบและกระเจิงออกไป และการกระจายแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ที่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเกิดขึ้น

ในกรณีหลังความถี่ของการเปล่งรังสีตามปกติก็ต่างจากรังสีจากแหล่งกำเนิดที่ได้จากการสังเกต ความแตกต่างของการกระจายก็มีอยู่ตามตารางหน้าถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แสดงความแตกต่างของการกระจาย

Scattering	Elastic	Inelastic
From molecules	Rayleigh scattering	Raman - scattering
From tracer particle	Doppler velocity ; Laser - dual -focus ; Speckle photography ; Particular tracing ; Flow visualization	Fluorescent tracers

ความเข้มของการยืดหยุ่นการกระเจิงของการกระจายแบบยืดหยุ่นของเรย์ไลทซ์ (Elastic Rayleigh scattering) จะเป็นสัดส่วน กับค่าความหนาแน่นของตัวกระเจิง ในการวัดปริมาตร เครื่องมือวัดความหนาแน่นของของไหลอาจทำขึ้นให้ยาวมาก ๆ ตามความเหมาะสมได้ เครื่องมือวัดอุณหภูมิก็มีความจำเป็น ถ้าเราสามารถสังเกตเห็นการกระจายในลักษณะรูปแบบของเกาส์ (Gaussian) การกระจายของเรย์ไลทซ์ (Rayleigh) ไม่สามารถนำมาใช้ในการสรุปส่วนผสมอื่นๆในของไหลได้ แต่มันเป็นวิธีที่ได้ความเข้มมากที่สุดของเทคนิคการกระเจิงแสงระดับ โมเลกุล วิธีการกระจายแบบไม่ยืดหยุ่นจะมีประโยชน์มากในการศึกษาเปลวไฟและการเผาไหม้

แบบจำลองการไหลโดยการสังเกตแสงที่กระจายจากควัน หรือสีข้อมที่ใช้ทดลองคือหลักใหญ่ ๆ ของการวิเคราะห์คุณลักษณะ จากการวิเคราะห์การกระเจิงของแสงจากอนุภาคเดี่ยวจะสามารถวัดค่าความเร็วของการกระเจิงได้ และสามารถเลือกใช้วิธีวัดความเร็วของตัวกระเจิงซึ่งก็มี

หลายวิธี บ้างก็ได้จากความเร็วของไหล วิธีทำให้เป็นไปก็ต่างจากเทคนิคการบันทึกรังสีที่กระเจิง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นตัววัดความเร็ว (Laser doppler velocimeter) วิธีวัดความเร็ว (Laser-dual-focus method)
 วัดความเร็วของจุดหนึ่ง ๆ ของการไหลและเครื่องมือวัดค่าที่ได้จากการสังเกต (Optical probe)
 ขณะที่การถ่ายภาพทางเดินของอนุภาคและการถ่ายภาพสเปกเคิล (Speckle) ก็จะให้ข้อมูลตลอด
 ข่ายการทดลอง

อัตราส่วนของสัญญาณกับเสียงก็เป็นวิธีทางปริมาณอีกแบบหนึ่ง ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยถึงแม้
 ทางเดินอนุภาคจะไม่เป็นการกระเจิง แต่มันก็สามารถแปลงจากตัวมันเองได้ หลักการนี้ก็คล้ายกับ
 ฟลูออเรสเซนต์แทรเซอร์ (Fluorescent tracer) ซึ่งมักจะใช้ไอโอดีน ซึ่งการไหลของแก๊สถูกชี้ค
 ไว้ด้วยแสงของฟลูออเรสเซนต์ของตัวกระจายซึ่งเกิดจากการถูกเหนี่ยวนำ เช่นเดียวกับการให้รังสี
 เฉพาะกับของไหล

เราจะแยกชนิดของระบบการบันทึกซึ่งจะแยกถึงความต่างของข้อมูลการไหลของของไหล
 ตลอดที่อยู่ในที่ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตา, รูปถ่าย, ภาพยนตร์หรือกล้องวิดีโอ ข้อมูลมีความ
 ต่อเนื่องในช่องว่าง แต่ไม่ต่อเนื่องกับเวลาเพราะบันทึกตลอดด้าน จะได้ว่าที่เวลาครั้งที่ t_i ข้อมูลก็
 จะได้จากกระนาบที่ทำการสังเกตหรือเรียกกระนาบ X-Y โดยแกน Z ก็เป็นแกนเดียวกับที่ ๆ สังเกต
 ตรงไปยังกระนาบ ในระบบการส่งผ่านแสงจะบันทึกข้อมูลในรูปของ J ตามแนวแกน Z

$$J = J [x(z) , y(z) , t] dz$$

และในขณะที่เริ่มข้อมูลที่ต้องการสำหรับ $J(x,y,z,t)$ ในการคำนวณ ถ้าให้ข้อมูลหนึ่งที่ถูก
 บันทึกจากแกน Z เป็นค่าคงที่ของการไหล เราแทนข้อมูลที่บันทึกด้วย

$$J = J (x,y,z,t)$$

ตัวแปรตาม z สามารถหาได้โดยเปลี่ยนค่าของ t หลายๆค่า

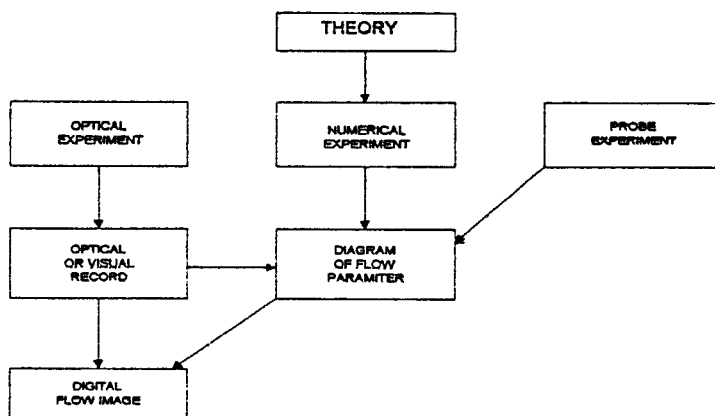
สำหรับสัญญาณการสังเกตก็จะได้รับโดยอิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์ (Electro-optical-sensor) เช่นโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier) ซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมกับสมการที่มีฟังก์ชันต่อเนื่องกับเวลาแต่ตำแหน่งเดิม (x_i, y_i, z_i)

$$J = J (x_i, y_i, z_i, t)$$

โดยวิธีที่ได้จากการบันทึกข้อมูลของการสังเกต ณ ตำแหน่งหนึ่งๆ ได้จากออปติคัลโพรบ (Optical probe) สนามการไหลทั้งหมดจะถูกสำรวจโดยการสแกน หรือใช้ชุดอิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์ (Electro-optical sensor) ณ จุดที่มีตำแหน่งของจุดมาก ๆ

สำหรับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลจากการบันทึกกับค่าจากการทดลองอื่นๆ หรือค่าที่ทำนายจากทฤษฎีในแต่ละกรณี จะใช้ผลการทดลองจากวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) รูปแบบทั่ว ๆ ไปของการเปรียบเทียบจะใช้รูปแบบของตัวแปรของการไหล ยกตัวอย่างเช่น ความดันที่ตำแหน่งเฉพาะหนึ่ง ๆ จะเป็นฟังก์ชันกับเวลา(ตามรูปที่ 1.2) เมื่อไม่นานมานี้การพัฒนาเทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพ(Image processing) จะถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลของระดับที่แตกต่างกันกับ ภาพการไหลชนิดดิจิทัล (Digital flow image) สามารถคำนวณได้จากข้อมูลจากการสังเกตทางตัวเลข หรือจากการตรวจสอบข้อมูล ซึ่งคล้ายกับในการคำนวณรูปแบบของการไหล (Flow pattern) ซึ่งอาศัยข้อมูลจากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน ผลที่ได้จากการกระบวนการสร้างภาพจำลอง อาจผิดพลาดเนื่องจากเหตุผลสองประการคือ

1. ภาพที่ได้จากการคำนวณการไหลเป็นผลคูณของการรวมของกระบวนการต่าง ๆ และผลที่ได้ไม่เป็นไปตามผลลัพธ์เฉพาะ เนื่องจากสภาวะการไหลที่แตกต่างกันเกิดจากรูปแบบการไหลเดียวกัน



รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงกระบวนการทดลอง

1.3 กระบวนการประมวลผลภาพ(Image processing)

กระบวนการประมวลผลภาพคือการกลั่นกรองและหาค่าข้อมูลจากรูปที่เห็นได้ โดยการ
ใช้คอมพิวเตอร์ทำให้เป็นรูปแบบตัวเลข แม้ว่าจะไม่ใช้รูปแบบใหม่ของการมองเห็น แต่อินพุตกับ
เอาต์พุตได้ทำให้เกิดมิติใหม่ของการมองเห็น ทั้งคุณลักษณะและปริมาณของรูปภาพในรูปแบบของ
ตัวเลข สามารถทำให้เกิดขึ้นได้หลายวิธี และสามารถเกิดในรูปของคอมพิวเตอร์กราฟิก การทำ
เป็นภาพสีทำให้ภาพที่มองเห็นคมชัดขึ้น อาจจะแสดงออกมาในรูปของสัญญาณ ไฟฟ้าซึ่งสามารถ
ทำให้อยู่ในรูปแบบตัวเลขและแสดงออกมาบนจอภาพในระดับของสีต่างๆ

ภาพที่แสดงการไหลในรูปตัวเลขสามารถที่จะนำมาคำนวณหาค่าจำเพาะของการไหลและ
สามารถแสดงโครงสร้างของการไหลได้ โครงสร้างที่ได้มานำมาเป็นพื้นฐานในการสร้างรูปจาก
ดิจิตอลแพตเทิร์น พิกัดของโครงสร้างและขอบเขตจะสามารถหาได้ จากการประมาณโดยเส้นโค้ง
จีโอมิเตอร์ (Geometer curve) รูปแบบที่มองเห็นจะแสดงการกระจายคุณสมบัติของการไหล

ดิฟเฟอเรนเชียลเฟรืนท์ พิกัดของโครงสร้างและขอบเขตจะสามารถหาได้ จากการประมาณโดยเส้นโค้ง
จีโอมิเตอร์ (Geometer curve) รูปแบบที่มองเห็นจะแสดงการกระจายคุณสมบัติของการไหล
 ในระนาบที่มองเห็น โดยการกระจายนี้สามารถหาได้โดยความหนาแน่นของของไหลที่เป็นสาเหตุ
 ให้เกิดการรบกวนของขอบ

การรวมตัวของขอบ (Interference fringes) และเส้นเวลา (Time line) จะแตกต่างจาก
 โครงสร้างโดยจะถูกสร้างมาจากวิธเฉพาะของแบบจำลองการไหลของของไหล โดยจะถูกนำไป
 พัฒนาเพื่อการสังเกต และจะเป็นการง่ายถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบ สำหรับการไหลแบบ
 ปั่นป่วนจะเกิดการหมุนวนขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้โครงสร้างปั่นป่วนซึ่งจะทำให้ไม่สามารถเห็นการ
 ไหลแบบปั่นป่วนขนาดเล็กได้ วิธีที่จะค้นหาโครงสร้างที่ปั่นป่วนในรูปของตัวเลขคือการ
 ประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า แมตซ์ฟิลเตอร์ริง (Match filtering)

บทที่ 2

การสังเกตทิศทางการไหลและเส้นทางเดินของการไหล

(VISUALIZE OF FLOW DIRECTION AND FLOW CONTOURS)

2.1 เส้นสายธารการไหล (Streamlines) , เส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล (Streak lines) และเส้นแสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Path lines)

เพื่อที่จะดูการไหลของของไหลอาจทำได้โดยใช้พวกควัน สีย้อม หรืออนุภาคปล่อยลงไป ในของไหลโดยอนุภาคที่ใส่ลงไปนี้ จะไหลรวมไปกับการไหลของของไหล เราสามารถจะดูการเคลื่อนที่ของมันได้โดยใช้แสงส่องไปเพื่อถ่ายภาพออกมา การที่เราจะแปลการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ไหลรวมไปกับของไหลว่าเป็นอย่างไร เราต้องนิยามคำจำกัดความเหล่านี้ให้ได้ก่อน

เส้นสายธารการไหล(Streamlines) เป็นเส้นสัมผัสของเส้นโค้งที่แสดงทิศของความเร็วในการไหลขณะใดขณะหนึ่งทุกจุดของสนามการไหล ถ้าเราใช้ 2 มิติจะแทนเวกเตอร์ของความเร็วชั่วขณะหนึ่งด้วยลูกศรเล็กๆ ซึ่งเป็นเส้นสัมผัสของเส้นสายธารการไหล ถ้าใช้การไหลเป็น 3 มิติ เส้นสายธารการไหลจะเป็นความสัมพันธ์ของ

$$u : v : w = dx : dy : dz$$

โดยที่ u , v , w เป็นส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเร็วในพิกัด x , y , z เมื่อถ่ายภาพเส้นสายธารการไหล จะได้ภาพของอนุภาคเป็นทางเดินทำให้เราทราบขนาดและทิศทางของความเร็ว จากจุดที่เราเลือกของสนามการไหล เส้นสายธารการไหลได้จากการวาดเส้นสัมผัสของทางเดินของอนุภาค

เส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล(Streaklines) เป็นวิธีการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งหมดของของไหลขณะใดขณะหนึ่ง เมื่อผ่านจุดที่กำหนดไว้ของสนามการไหล จะเห็นได้จากการติดตามอย่างต่อเนื่องของสีข้อมหรือควัน

เส้นทางเดินอนุภาค (Particle path) เป็นเส้นโค้งของอนุภาคของของไหลในสนามการไหลซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา เส้นทางเดินอนุภาคจะรวมเวลาของการเคลื่อนที่ของอนุภาคหนึ่งไว้

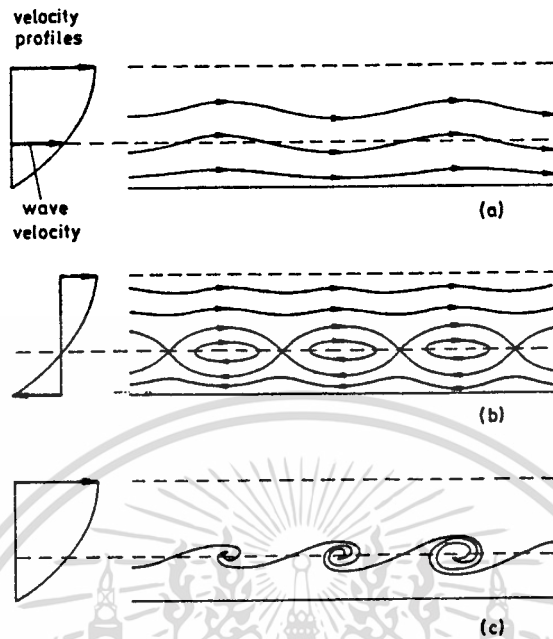
เส้นโค้งทั้งสามจะทับกันสนิทถ้าเป็นการไหลแบบคงตัว แต่ในการไหลโดยทั่วไปจะขึ้นกับเวลา ทำให้เส้นโค้งทั้งสามแบบแตกต่างกัน จากการสังเกตทั้งเส้นสายธารการไหล, เส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล และเส้นทางเดินอนุภาค ถ้าเป็นการไหลแบบไม่คงตัวขึ้นกับว่าจะเลือกตำแหน่งใดของอนุภาคเป็นตัวเริ่มต้น อัตราที่เราปล่อยอนุภาคลงไปในการไหล ช่วงเวลาในการบันทึกสภาวะการไหล

ความแตกต่างของทั้งสามอย่างนี้ โดยการเปรียบเทียบง่าย ๆ คือการพิจารณารถยนต์บนถนนสมมติสองไฟในเวลาากกลางคืน ถ้ามีรถเพียงคันเดียวสองไฟบนถนนนั้นเมื่อเราถ่ายภาพออกมาจะได้ภาพนั้นเป็นเส้นทางเดินอนุภาคของรถคันนั้น ถ้ารถทั้งหมดสองไฟเมื่อเราถ่ายภาพใช้เวลาชัตเตอร์นานหน่อย จะได้ภาพที่แทนความเร็วของรถทั้งหมดในขณะนั้น ซึ่งเป็นเส้นสายธารการไหล ถ้าบนถนนนั้นหนาแน่นและเราถ่ายภาพจากบนเครื่องบินที่ความสูงระดับหนึ่ง จะไม่เห็นความแตกต่างของรถแต่ละคัน และจะได้ภาพเป็นเส้นโค้งของแสงซึ่งประมาณว่าเป็นเส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล เส้นโค้งแต่ละชนิดที่ได้จากภาพนี้ขึ้นกับเวลาที่กดชัตเตอร์, จำนวนแสงที่ส่อง, หรือรถยนต์ที่เคลื่อนที่อยู่ในระบบ

นอกจากนี้สิ่งที่เราต้องพิจารณาในการแปลความหมายของเส้นที่ถูกบันทึกมา คือระบบที่อ้างอิงซึ่งเราจะให้การไหลหรือผู้ถูกสังเกตเป็นภาพ ซึ่งคำจำกัดความที่อ้างอิงก่อนหน้านี้นี้เป็นกรณีที่ผู้สังเกตซึ่งอยู่นิ่งและระบบเป็นห้องทดลอง ผู้สังเกตเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง โดยวัสดุจะถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่อยลงไปในกรไหล และเป็นไปได้ที่ผู้สังเกตหรือกล้องจะอยู่ในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของระบบ
 เส้นสายธารการไหลและเส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล ที่บันทึกไว้นั้นเป็นส่วนที่อ้างถึง
 การเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับระบบ และจึงวัดความเร็วได้ ถ้ารถยนต์ดังที่กล่าวถึงในตัวอย่างข้างต้นนั้น
 ถูกถ่ายภาพจากเครื่องบินซึ่งบินด้วยความเร็วคงที่ในทิศเดียวกับการไหล จะทำให้สามารถแยกได้
 ว่ารถคันไหนวิ่งเร็วหรือช้ากว่าความเร็วอ้างอิง และอาจเกิดการไหลย้อนกลับขึ้นในระบบ และจะ
 สังเกตเห็นได้ว่ารูปร่างของเส้นสายธารการไหล และเส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล จะ
 แตกต่างกันสำหรับแต่ละระบบอ้างอิง(โดยการไหลเป็นผู้ถูกสังเกต) และสามารถอธิบายได้อย่าง
 ละเอียคว่า ภาพการไหลแต่ละระบบเป็นอย่างไร รายละเอียดของรูปร่างของเส้นสายธารการไหล
 และเส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล เมื่อเส้นโค้งที่ถูกบันทึกด้วยกล้องที่กำลังเคลื่อนที่หรือ
 กล้องที่อยู่กับที่ในห้องทดลอง จะเห็นว่าการไหลแบบไม่คงตัวจะปรากฏในลักษณะที่คงตัว แก่ผู้
 สังเกตซึ่งเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเคลื่อนที่ของการไหล การไหลแบบคงตัวที่ปรากฏออกมานั้นจะเห็น
 ได้จากระบบอ้างอิงซึ่งเคลื่อนที่ และการไหลย้อนกลับจะเกิดขึ้นเมื่อการไหลถูกรบกวน

ถ้าการกระจายความเร็วของสนามการไหลทั้งหมดหาได้จากการทดลองและเป็นไปได้ที่เรา
 สามารถจะคำนวณการไหลของสนามเดียวกันภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างกันได้ เช่น ค่าความเร็วคง
 ที่ เส้นโค้งของการหมุนวนคงที่



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงชั้นการไหลเทียบกับผู้สังเกต a) เส้นสายธารการไหลเมื่อผู้สังเกตอยู่กับที่ b) เส้นสายธารการไหลเมื่อผู้สังเกตเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคลื่น c) เส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล

2.2 ทางเดินของคายในของไหล

โครงสร้างของการไหลของของไหลหาได้จากการฉีดคายลงในของไหลหรือให้มันเกิดปฏิกิริยาเคมีในของไหล ซึ่งกรณีนี้อาศัยสารละลายทางเคมี ให้เกิดเป็นคายในบริเวณการไหล การฉีดคายเป็นที่นิยมมากสำหรับการสังเกตการไหลของน้ำ โดยคายนี้ถูกปล่อยออกจากหลอดฉีดเล็กๆ ตรงตำแหน่งที่ต้องการหรือจากช่องเล็กๆ ๆ ซึ่งติดตั้งตรงผนังของแบบจำลอง วิธีทั้งสองแบบนี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงความจริงที่ว่า การไหลหลักนี้จะถูกรบกวนจากเครื่องฉีดคาย โดยจะถูกทำให้

กระจายออกไปไกลพอที่จะทำให้ทวนกระแสมาได้ ถ้าคายที่ถูกปล่อยออกมาเป็นการไหลหมุนวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(Wake) อยู่ในหลอดจะช่วยป้องกันการเกิดเวกของหัวฉีดคายซึ่งทำให้การไหลเกิดการปั่นป่วนได้ เทคนิคอย่างหนึ่งของการไหล คือ ให้ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Renold number) ของการไหลหมุนวนใน หลอด (Tube wake) ต่ำกว่าค่าวิกฤติของทางเดิน โดยส่วนใหญ่จะใช้ปีโตนโพรบ (Pitot probes) สำหรับการไหลของอากาศเป็นเครื่องพ่นคาย ทางเดินส่วนใหญ่มีขนาดศูนย์กลางภายนอก 1 มิลลิเมตร หรือน้อยกว่านั้นส่วนเครื่องพ่นอื่น ๆ จะเป็น หลอดไฮโปเดอริมิก (Hypodermic tubes) หรือหลอดฉีดยา (Syring)

อัตราที่ฉีดคายออกไปต้องเหมาะสมกับความเร็วของของไหล ถ้าอัตราการฉีดพ่นคายมากเกินไป จะได้ลำของคายที่พ่นคล้ายเจ็ต และจะเกิดการไหลวนไปตามท่อฉีด (Injector tube) ระหว่างลำของไหลและการไหลหลัก ถ้าคายถูกปล่อยจากรูที่เล็กจากผิวแบบจำลอง ส่วนประกอบของความเร็วของสารละลายคายจะตั้งฉากกับผิวแบบจำลอง และจะมีค่าต่ำสุด ดังนั้นการไหลของชุดพ่นคายต้องแทรกเข้าไปในการไหลหลักรอบแบบจำลอง และจะเปลี่ยนความหนาของชั้นของไหล เนื่องจากผลของมวลที่ฉีดและโมเมนตัม

คายที่เหมาะสมในการเกิดเส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของของไหล และโครงสร้างการไหล ต้องมีคุณสมบัติตรงตามความต้องการ ซึ่งนอกจากคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัสดุที่ใช้ในการดู ลักษณะการไหล สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือค่ากลางของแรงลอยตัว (Neutral buoyancy) ซึ่งถ้าค่าความเสถียรภาพสูงก็จะไม่รวมตัวง่าย ๆ และมองเห็นได้ชัด

ค่ากลางของแรงลอยตัว เป็นเหมือนค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหลที่ทำงานในน้ำ ค่าน้ำหนักจำเพาะที่ต้องการ อาจหาได้จากการผสมคายกับอัลกอฮอล์ ของผสมนี้ไม่ใช่สารละลาย และอยู่ภายใต้การกระทำแรงเฉื่อย หรือแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) ซึ่งเป็นไปได้หลายรูปแบบแล้วแต่ชนิดของส่วนผสมที่ผสมกัน และเส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของคายจะค่อย ๆ

เสื่อมสลายลงหรือไม่บ่งชี้ทิศทางที่แน่นอน ปัญหาเหล่านี้จะน้อยมากถ้าสารละลายของคายถูกเตรียมให้เจือจางอย่างสมบูรณ์

คายจะถ่ายทอดคุณสมบัติไปยังเส้นทางการไหลและจะผสมกับของไหลรอบๆเส้นทางของคาย และจะค่อย ๆ หายไปอย่างรวดเร็วขึ้นถ้าเป็นการไหลแบบการไหลปั่นป่วน การผสมจะเกิดขึ้นที่ตรงรอยต่อของทางที่คายไหล

ดังนั้นวิธีการคือเราต้องจำกัดการไหลให้เป็นแบบราบเรียบ หรือให้ความเร็วในการไหลของของไหลต่ำ การผสมหรือการแพร่ของคายในสารทำงานไม่มีลักษณะที่แน่นอน เส้นแสดงตำแหน่งอนุภาคของคาย จะได้จากการผสมกันของคายกับนม และคาดคะเนได้ว่านมจะหน่วงการแพร่ของสารละลายคายในน้ำ ขณะเดียวกันเนื่องจากคุณสมบัติของนมช่วยในการกระเจิงแสงทำให้มองเห็นได้ชัด ดังนั้นการใช้นมเป็นของผสมในคายจะส่งผลดีในทั้งสองด้าน ความแตกต่างกันมากของเส้นทางของคายนี้ก็ยังคงตำแหน่งอนุภาคไว้พร้อมไปกับการแพร่อย่างรวดเร็ว ส่วนหนึ่งของคายที่จะแสดงให้เห็นจากแหล่งกำเนิดการแพร่ ช่องว่างของฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent) ในระบบแสง จะใช้ในการสังเกตการกระเจิงของแสง จากรอบทางเดินของอนุภาคซึ่งอาจเกิดเงาในสนามการไหลได้ ทั้งจากแสงของเส้นทางของคาย หรือจากการแบบจำลองที่ทดสอบ

การเลือกคายขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการทดลอง สีสผสมอาหารผสมกับนมจะเป็นคายที่นิยมที่สุด จากผลของการกระทำของช่องทางไหลจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันต่ำที่สุด ความแตกต่างของเส้นทางไหลแต่ละเส้นนั้น จะเกิดจากโครงสร้างการไหลที่ใช้ในการไหล, การไหลหมุนวน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ชนิดของคายที่ใช้ในการทดลอง

สารทำงาน	คาย
น้ำ	นมและสีผสมอาหาร
น้ำเกลือ	นม
น้ำ	สีผสมอาหาร
น้ำเกลือ	สีผสมอาหาร
สารละลายโพลีเมอร์	สีผสมอาหาร
น้ำ	หมึก
สารละลายโพลีเอทาลีน/ไกลโคล	หมึก
น้ำ	Printer 's white
น้ำ	โปรตีนซีรัมเพอร์มังกานेट
น้ำ	Crystal violet
น้ำ	Gentian violet
น้ำ	Methylene blue dye
น้ำเกลือ	Methynol blue dye
น้ำเกลือ	Blue Dextran dye
น้ำ	Rheoscopic fluid AQ 1000
น้ำ	Black Nigrosin
น้ำ	Rhodamine
น้ำ	Fluoresceine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ของฉายฟลูออเรสเซนซ์ คือการมองเห็นทางการไหลของคายที่ดีขึ้น แต่จะเหมาะกับการใช้ในการไหลสำหรับบริเวณกว้างๆซึ่งคายนี้จะถูกกระตุ้นโดยใช้แหล่งกำเนิดที่เกิดในช่วงสเปกตรัมของฟลูออเรสเซนซ์ เช่นแสงตะกั่ว (Mercury lamp) หรืออาร์กอนเลเซอร์ (Argon laser) ในกรณีนี้จะเป็นการมองในแนวตั้งฉากและในแนวเอียง การบันทึกการกระทำของรังสีของฟลูออเรสเซนซ์ ที่ได้จากการสังเกตควรใช้กล้องถ่ายรูปที่มีความไวของชัตเตอร์เหมาะสมกับแสงในช่วงสเปกตรัม การใช้คายฟลูออเรสเซนซ์นี้จะวัดความเข้มข้นของมันโดยใช้ฟลูออโรมิเตอร์

(Fluorometer) กฎที่สำคัญของการใช้วัสดุฟลูออเรสเซนซ์ คือการหาค่าความเร็วหรือภาวะทางอุณหพลศาสตร์การไหล โรดามีน (Rhodamine) เป็นสีผงที่ไม่เป็นพิษที่นิยมนำมาใช้เป็นสีย้อม โดยใช้อัตราส่วน 2:100 ละลายในน้ำและยังสามารถละลายในเมทานอลได้ดีอีกด้วย ซึ่งตรงนี้เป็นจุดที่อาจใช้ปรับค่าความหนาแน่นได้ ตารางที่ 2.1 จะแสดงให้เห็นชนิดของสีย้อมชนิดต่าง ๆ รวมถึงเครื่องหมายทางการค้า

จากการทดลองในการมองการไหลแบบอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) สำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เดียวกัน รวมทั้งขนาดของแบบจำลองและความเร็วของน้ำในอากาศ เพื่อให้สามารถมองเห็นได้ที่ความเร็วสัมพัทธ์ต่ำ ๆ เทคนิคพิเศษของการมองทาวริงแทงค์ (Towing tanks) โดยให้เกิดเป็นชั้นบางๆตามแนวขวางของคายในน้ำ ก่อนที่แบบจำลองนั้นจะถูกเซตให้อยู่ในสนามการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านแบบจำลองเราจะมองเห็นการเคลื่อนที่ของชั้นสีและบันทึกไว้ ชั้นของคายจะถูกทำให้เสถียรโดยชั้นของเกลืออ่อนในแทงค์ ดังนั้นจึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการศึกษาการแบ่งชั้นของของไหล ถ้าสีย้อมนี้ถูกปล่อยอย่างทันทีทันใดไปตามทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลส่วนใหญ่ เราจะสามารถเห็นโครงร่างของความเร็วเฉพาะที่ โดยเส้นทางของคายที่เปลี่ยน

ไปในสนามการไหล กลไกของการฉีดคายอย่างรวดเร็วไปตรงทุก ๆ จุดของเส้นการไหลนี้ จะเป็นการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รบกวนการไหลทำให้ความเร็วที่วัดได้ผิดไปทำให้น่าไปใช้ไม่ได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการฉีดสีในของไหลไปตามเส้นโค้งที่กำหนดด้วยการควบคุมชั่วคราว อาจนำการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าวิธีโฟโตเคมีคัล (Photochemical) มาใช้

วิธีหนึ่งในการควบคุม หรือ ความหนาระหว่างการไหลสองอย่างซึ่งแตกต่างกัน จะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงของคาย (Dye producing) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างรอยต่อของของไหลทั้งสองอย่างนี้ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้สารวัดความเป็นกรดต่าง ซึ่งจะใช้น้ำและสีที่เปลี่ยนนี้จะขึ้นกับค่าของ pH ที่เปลี่ยน ซึ่งสารที่ใช้ในวิธีนี้จะแสดงอยู่ในตาราง 2.2 ค่า pH นี้จะใช้ไม่ได้ถ้าสารเหล่านั้นเกิดการผสมกันในของไหลที่ถูกฉีดซึ่งถูกดูดเข้าไปในของไหลที่อยู่ในน้ำ ของไหลสองชนิดนี้ให้ค่า pH ซึ่งแตกต่างกันอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี นอกจากนี้บริเวณที่ผสมกันของของไหลสองชนิดนี้จะมองเห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงของคาย ชั้นที่ผสมกันหรือชั้นของแรงเฉือน (Shear layer) นั้นสามารถมองเห็นได้ ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาโครงสร้างของการรวมตัวกัน (Cohesion) แต่อัตราการผสมกันจะวัดได้จากกราฟที่ด้วย เคนซิโตมิเตอร์ (Densitometer)

ตารางที่ 2.2 pH indicator และ อัตราของการเปลี่ยนสี

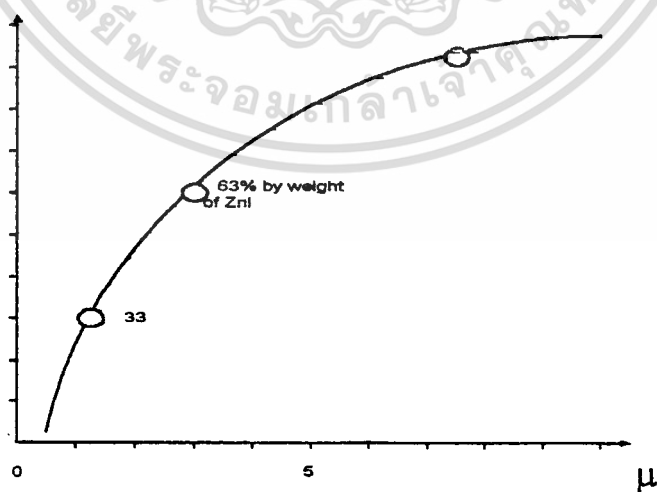
Indicator	pH (1) / color	pH (2) / color
Bromo cresol green	3.6 / yellow	5.2 / blue
Bromo phenol red	5.2 / yellow	7.0 / red
Bromo thymol blue	6.0 / yellow	7.6 / blue
Meta cresol purple	7.6 / yellow	9.2 / purple
Thymol blue	8.0 / yellow	9.6 / blue

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาของการเปลี่ยนแปลงคายแบบอื่น ๆ ที่ถูกควบคุมเวลาจะถูกนำมาใช้วัดจังหวะการไหลของของไหลที่ผ่านภาชนะรูปร่างต่าง ๆ สารทำงานที่ใช้จะถูกเตรียมจากสารละลายสองชนิดผสมกัน เวลาเกิดปฏิกิริยาจะประกอบด้วยการกลับเป็นของผสมสีฟ้าหลังจากการผสมกันทันที ถ้าของผสมนั้นถูกทำขึ้นอย่างต่อเนื่องและทันทีทันใดก่อนที่จะนำไปใช้ในการไหล นี่เป็นอีกทางหนึ่งที่จะแสดงให้เห็นของไหลแต่ละส่วนในขณะที่เกิดปฏิกิริยา

2.3 การวัดความเร็วโดยใช้วิธีสเปกเคิลโฟโตกราฟี (Speckle photography)

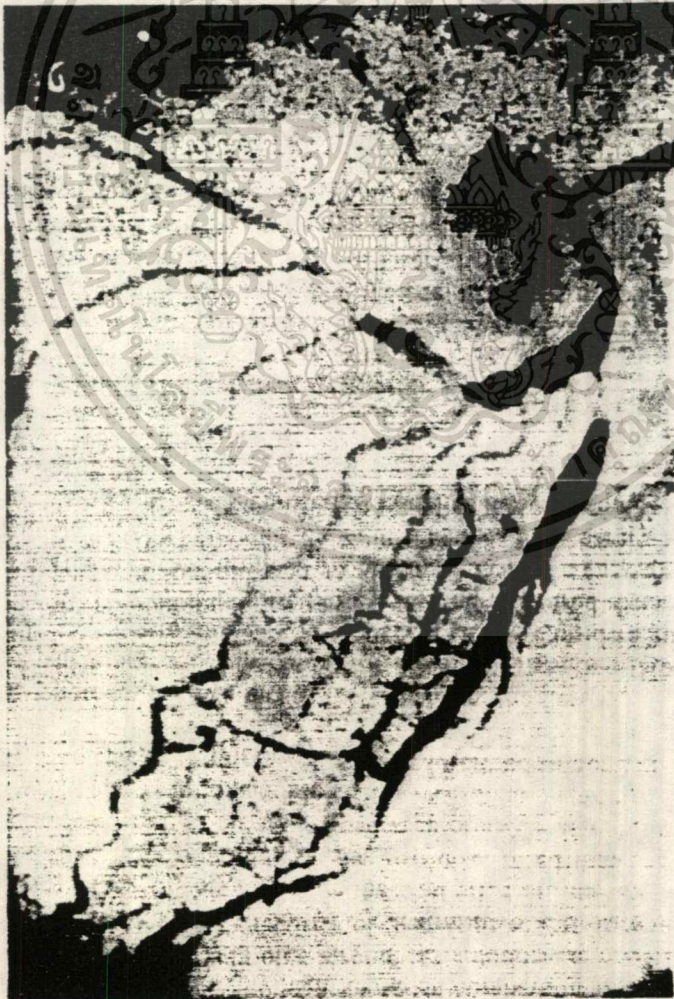
เลเซอร์สเปกเคิลโฟโตกราฟี (Laser speckle photography) เป็นวิธีการวัดการเคลื่อนที่และพื้นที่ผิวที่มีรูปร่าง สำหรับของแข็งทางกล โดยนำปรากฏการณ์ของเลเซอร์สเปกเคิลมาใช้อธิบายทางเดินของอนุภาคของของไหล (Tracer particles) เทคนิคนี้เป็นวิธีที่พิเศษกว่าวิธีแบบจำลองโดยตรง (Direct visualization) เราสามารถแยกพิจารณาให้ละเอียดขึ้นได้ เพราะว่าสามารถที่จะใช้วัดความเร็วปริมาณมากๆ ได้ และทำให้เกิดภาพจำลอง (Visual pattern) ขนาดใหญ่ ทำให้ง่ายต่อการบันทึกผล



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงค่าดัชนีหักเห(n) กับค่าความหนืด(μ) ในสารละลายของซิงค์ไอโอไดด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

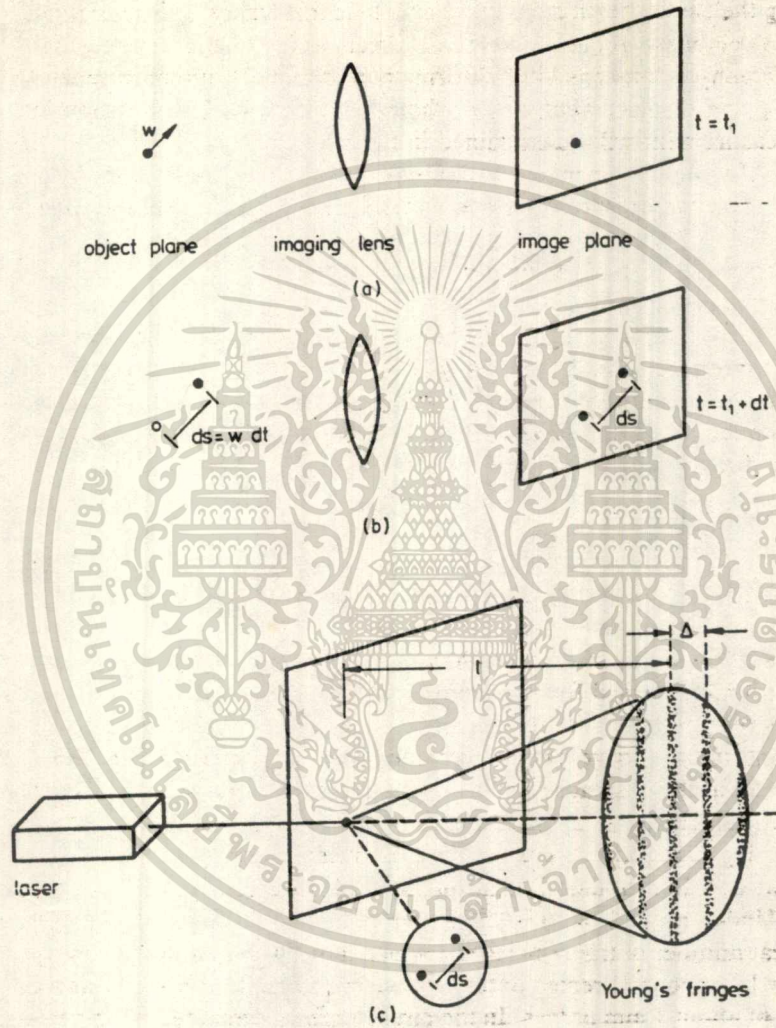
หลักการเรขาคณิตจุดสังเกต (Object point) ซึ่งคิดว่าอยู่บนแผ่นราบ (Image plane) จุดสังเกต จะเคลื่อนที่เป็นระยะทางเล็ก ๆ (ds) จากนั้นจุดที่เกิดภาพจะถูกย้ายไปในทิศทางเดียวกันเป็นระยะ ds ถ้าเรากำหนดอัตราที่เกิดภาพ (Imaging ratio) มีค่า 1:1 ในรูปของฉากแสงคู่ ฉากแสงอันแรกถูกใช้ก่อนอันที่ 2 หลังจากการเคลื่อนที่ของจุดสังเกตซึ่งจะเกิดขึ้น 2 ครั้ง ห่างกันเป็นระยะ ds ดังรูปที่ 2.3 โดยนำมาประยุกต์ใช้กับการไหลของของไหลโดยจุดที่ถูกสังเกตจะแทนการเคลื่อนที่ของอนุภาคชิ้นหนึ่ง ซึ่งไหลด้วยความเร็ว w การเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างฉากแสงคู่คือ $ds = wdt$ โดย dt เป็นระยะเวลาการเคลื่อนที่ระหว่างฉากแสงคู่ เมื่อรู้เวลา dt วัดความเร็ว w ก็จะหารระยะ ds ได้ ดังนั้นวิธีสเปกเคิลโฟโตกราฟี เป็นวิธีการวัดขนาดและทิศทางของการเคลื่อนที่ในแนวราบสำหรับพื้นที่การไหล หลักการของวิธีวัดจะอธิบายดังนี้



รูปที่ 2.3 ภาพที่ได้จากการเอ็กซ์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากปรับปรุงฉากคู่ จุด 2 จุดที่ปรากฏบนแผ่นราบ คือจุดสว่าง 2 จุดบนฉาก จุด 2 จุด นี้ถูกส่องแสงจากด้านหลังโดยแสงเลเซอร์เล็ก ๆ (ดังรูปที่ 2.4) การแพร่ของแสงจากช่องว่างไปยัง แผ่นราบ จุด 2 จุดที่แพร่มาเกิดจากแหล่งจ่าย 2 แหล่ง ซึ่งจะฉายแสงได้รูปกรวย 2 รูป



รูปที่ 2.4 ภาพที่ได้จากวิธีสเปกเคิลโฟโตกราฟี

การซ้อนกันของกรวยมาจากแหล่งจ่าย 2 แหล่งที่แทรกซ้อนกัน เส้นขนานและช่องว่างที่ ขอบเท่ากัน (กฎของยังก์สฟริงก์) สามารถสังเกตจากแผ่นราบธรรมดาในระดับสายตา หรือแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

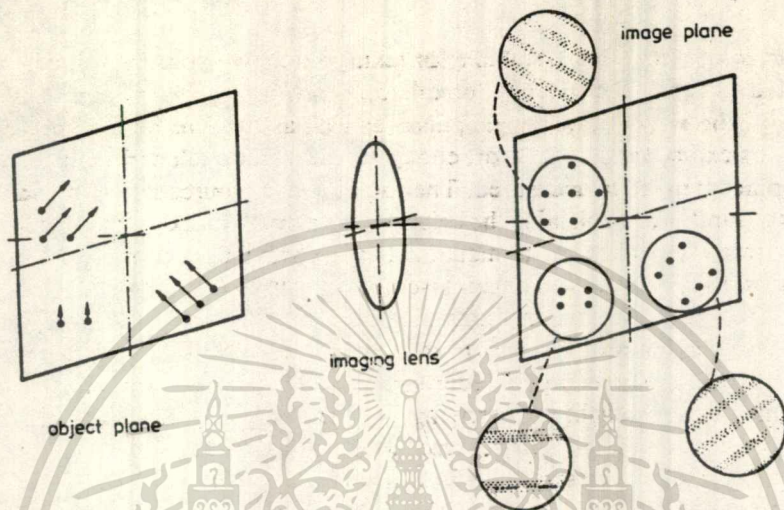
ราบกับแหล่งจ่าย 2 แหล่งห่างกันเป็นระยะ 1 ขอบตั้งฉากกับทิศทางของระยะ ds และถูกแยกโดยช่องว่างขอบ (Δ)

จะได้
$$\Delta = \lambda/ds$$

λ คือความยาวคลื่นของเลเซอร์ ขนาดของ ds ควบคุมขนาดของช่องว่างขอบ ให้อยู่ในระบบของการซ้อนกันของขอบ

แม้ว่าขนาดของอนุภาคจะอยู่ห่างกันจากความเป็นจริง แต่ก็เป็นวิธีที่ใช้อธิบายขอบเขตที่แน่นอนได้ จุดประสงค์คือใช้อธิบายว่า อนุภาคคือจุดสังเกตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด dp ดังนั้นขอบเขตค่าสุดของการเคลื่อนที่ที่ใช้วัฏระยะนี้คือ $ds \geq dp$ ขอบเขตจะสูงขึ้นเมื่อ Δ เล็กลงมาก ๆ นั่นคือเมื่อขอบของระบบแคบเกินไป ขอบเขตที่สูงขึ้นจะมีค่าไม่เกิน $ds \approx 20dp$ ภายใต้เหตุการณ์นี้ บนแผ่นราบที่ถูกส่องแสงจะเต็มไปด้วยกลุ่มอนุภาคจำนวนมากเคลื่อนที่ระหว่างฉากคู่ แสงเลเซอร์ที่ส่องไปยังฉากคู่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร หรือน้อยกว่านั้น แสงที่ฉายมาจะเป็นพื้นที่วงกลมทำให้อาจมีจุดเกิดขึ้นหลายคู่ ถ้าจุดเหล่านี้เคลื่อนที่พร้อมกันจำนวนมาก ก็จะเหมือนกับผลของยังก์สฟริงก์ (Young's fringes) ที่ถูกฉายแสง 1 คู่ รูปที่ 2.5 เป็นภาพแสดงแต่ละสถานะมีกลุ่มอนุภาค 3 กลุ่มกำลังเคลื่อนที่อยู่บนแผ่นราบด้วยความเร็วที่ต่างกัน แสงเลเซอร์ถูกใช้ในการหาค่าของแสงแต่ละกลุ่มในฉากคู่ ซึ่งจะได้เป็นระบบขอบเฉพาะ (Respective fringe system) โดยขอบจะตั้งฉากกับทิศความเร็ว ซึ่งอนุภาคที่มีช่องว่างห่างกันน้อยๆจะมีความเร็วสูง ๆ

ถ้าจุดสังเกตหลายคู่ ถูกส่องแสงเวลาเดียวกันโดยแสงเลเซอร์จะไม่ผ่านเหมือนกันหมด ดังนั้นความแตกต่างของระบบนั้นจะเกิดขึ้นและจะเกิดการซ้อนกันและกัน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสมกับการหาค่า คือขอบจะไม่เกี่ยวข้องกัน (Decorrelate fringe) จากรูปที่ 2.5 เราจะได้รูปแบบของขอบซึ่งมีความแตกต่างระหว่างขอบสูงสุดที่จะใช้งานได้ดี (Correlate fringe)



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงกลุ่มของสลีปเกิดซึ่งมีขนาดความเร็วแตกต่างกัน 3 กลุ่ม

อาจสรุปได้ว่า จะเกิดการหักเหเพียงเล็กน้อย และทิศทางการเคลื่อนของจุดสังเกต เนื่องจาก การสูญเสียของขอบที่ไม่เหมาะสมและเกี่ยวข้องกัน ถ้าเราประมาณค่าองศาของการไม่เกี่ยวข้องกัน และวัดค่าช่องว่างของขอบ (Fringe spacing) และทิศทางของระบบที่ลดความไม่เหมาะสม เราให้ เหตุผลว่าค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของจุดสังเกตทั้งหมด ซึ่งจากกลุ่มถูกฉายแสงและตั้งอยู่ในภาคตัด ขวาวของแสงเลเซอร์การลดขนาดภาคตัดขวาวนี้เช่น การปรับโฟกัสจนได้ขนาดที่ต้องการ

พิจารณาการไหลจริง แผ่นราบในสนามการไหลจะถูกฉายโดยแสงที่มีขนาดเล็ก การ เคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคที่ถูกฉายแสงบนแผ่นราบนี้คือจุดสังเกต ฉากถูกฉายแสงโดยเลเซอร์สี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทับทิม 2 จังหวะซึ่งเป็นแหล่งจ่ายที่เหมาะสมที่สุด ช่วงกว้างของสัญญาณแต่ละครั้งพอดีกับช่วงเวลาระหว่างหลายสัญญาณ สามารถควบคุมให้สั้นพอที่จะประมาณค่าการเคลื่อนที่โดยการวัดได้

กลุ่มอนุภาคที่ถูกกล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี จะสะท้อนแสงเลเซอร์ให้เปลี่ยนไป รูปแบบที่เราสังเกตในแนวราบเป็นผลของการแทรกซ้อนมากมายระหว่างรัศมีของแสงจากทิศที่เปลี่ยนไป แต่ละแบบเรียกรูปแบบสเปกเกิล (Speckle pattern) โครงสร้างที่เป็นเช่นนี้เป็นสถานะเฉพาะ ซึ่งเราเรียกว่าจุดที่เกิดภาพของกลุ่มอนุภาคเส้นศูนย์กลางของสเปกเกิล คือ D_p หากจากทฤษฎี ดิฟแฟรกชัน (Diffraction)

ในฉากแสงคู่จะบรรจุข้อมูลการกระจายของเวกเตอร์ความเร็ว (2 มิติ) ในแผ่นที่ถูกฉายแสง การหาค่าบนแผ่นราบจะพิจารณาโดยวิธีจุดต่อจุด (Point by point) กับแสงเลเซอร์ ตามรูปที่ 2.4 วิธีนี้เรียกว่าวิธีการสร้างใหม่ (Reconstruction) โดยข้อมูลจะถูกสร้างใหม่จาก สเปกเกิลแกรม (Specklegram) โดยการหาค่าที่เหมาะสมโดยวิธีจุดต่อจุด แต่ละจุดที่ถูกส่องแสงตามรูปแบบของยังก์สฟริงก์ จากการวัดขอบของช่องว่างและทิศทางของขอบ วัดค่าความเร็วประกอบ 2 จุดบนแผ่นราบที่ถูกส่องแสงในแต่ละระบบของยังก์สฟริงก์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 เวกเตอร์ความเร็วตั้งฉากกับทิศทางของขอบเนื่องจากการกระจายที่เพิ่มขึ้นในภาคตัดขวางของแสงเลเซอร์ การลดลงมากขึ้นในทิศทางรัศมี พื้นที่สีดำที่เกิดขึ้นกลางรูปเกิดจากการแผ่รังสีโดยตรงของแสงเลเซอร์

จากรูปแบบของขอบ (Fringe pattern) เป็นไปไม่ได้ที่จะกำหนดว่า อนุภาคจะเคลื่อนที่ในทิศเดียวกันหรือตรงข้ามกัน โดยเฉลี่ยการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นระหว่างฉากคู่คือการเปรียบเทียบความถี่ที่ถูกเลื่อนไปในเลเซอร์ดอปเปลอร์อิมโมเมตรี (Laser Doppler Anemometry)

การลดลงมากขึ้นในทิศทางรัศมี พื้นที่สีดำที่เกิดขึ้นกลางรูปเกิดจากการแผ่รังสีโดยตรงของแสงเลเซอร์

จากรูปแบบของขอบ (Fringe pattern) เป็นไปไม่ได้ที่จะกำหนดว่า อนุภาคจะเคลื่อนที่ในทิศเดียวกันหรือตรงข้ามกัน โดยเฉลี่ยการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นระหว่างฉากคู่คือการเปรียบเทียบความถี่ที่ถูกเลื่อนไปในเลเซอร์ดอปเปลอร์อินิโมเมตรี (Laser Doppler Anemometry)



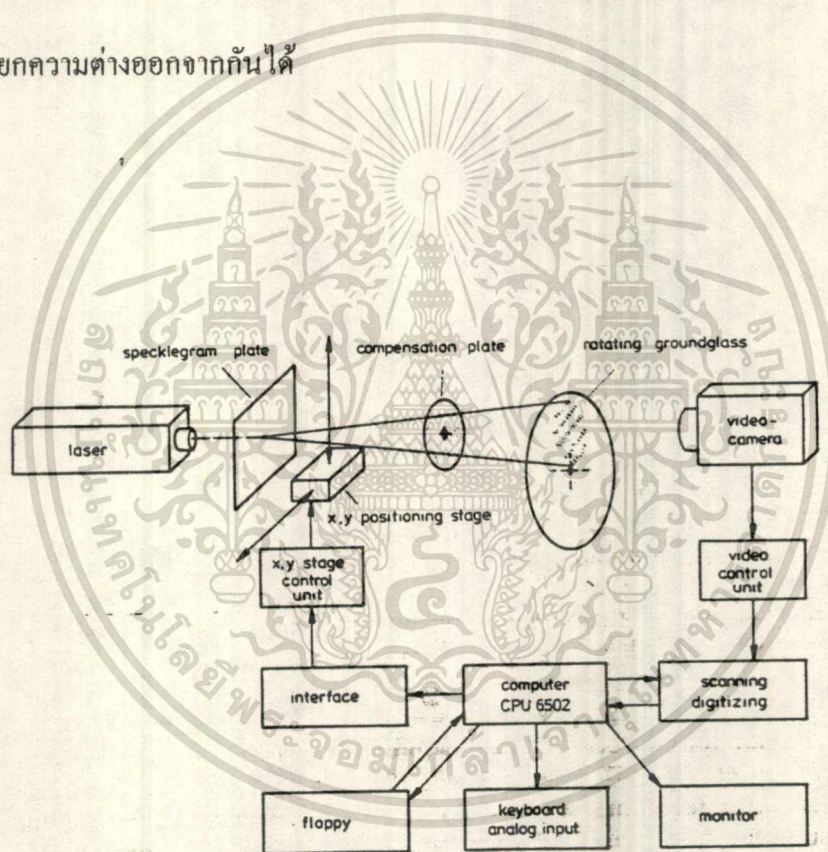
รูปที่ 2.6 ภาพที่ได้จากระบบของยังก์สฟริงก์

ความเร็วประกอบปกติบนแผ่นราบที่ถูกส่องแสงไม่สะท้อนกลับ ถ้าการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทิศที่สามนี้อยู่ในแผ่นราบที่ถูกแทนที่ของฉากคู่ จะปรากฏเป็นภาพเดียวในฉากคู่ แสงที่กระจายจากแต่ละอนุภาคช่วยในการลดการรบกวนของขอบที่ปรากฏ จากการพิจารณาสัญญาณที่

ไม่เกี่ยวข้องเนื่องจากการหักเหเล็กน้อยในเวกเตอร์การเคลื่อนที่ จะเห็นได้ว่าการรบกวนเกิดจากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงแบบปั่นป่วนในเวกเตอร์ความเร็วเนื่องจากการกระจายที่ไม่เป็นปกติกับขนาดของอนุภาคในเวลาเดียวกัน การรบกวนจะมีข้อมูลซึ่งถูกนำมาใช้เพิ่มในการหาค่าเฉลี่ยความเร็ว และข้อมูลจากลักษณะการไหลปั่นป่วน หรือขนาดอนุภาคและนำมารวมกัน

ความแม่นยำของยังก์สเฟริงก์ในกระบวนการสร้างใหม่สามารถปรับปรุงได้ ถ้าการทิวคูณของแสงที่ซ้อนกันเป็นระเบียบมากกว่าการซ้อนกันของแสง 2 เส้น การฉายแสงและการบันทึกสามารถแยกจากแหล่งจ่ายสีขาวได้ แต่การแทรกซ้อนกันจะทำให้บันทึกผลไม่ได้ เนื่องจากเครื่องจะไม่สามารถแยกความต่างออกจากกันได้



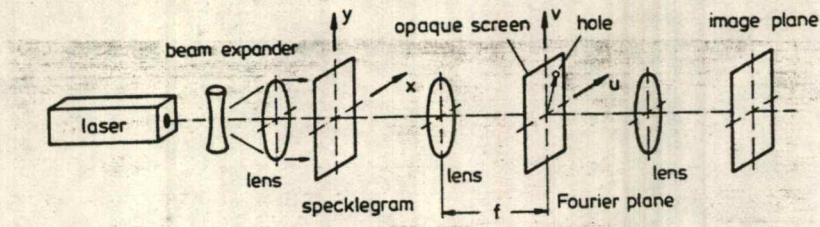
รูปที่ 2.7 ภาพแสดงแผนภูมิระบบตรวจจับและคำนวณหาค่าอัตโนมัติของสเปกเคิลแกรม

รูปแบบของสเปกเคิลที่ถูกบันทึกมีโครงสร้างที่ดีมาก และมันจำเป็นที่จะต้องกระจายการ

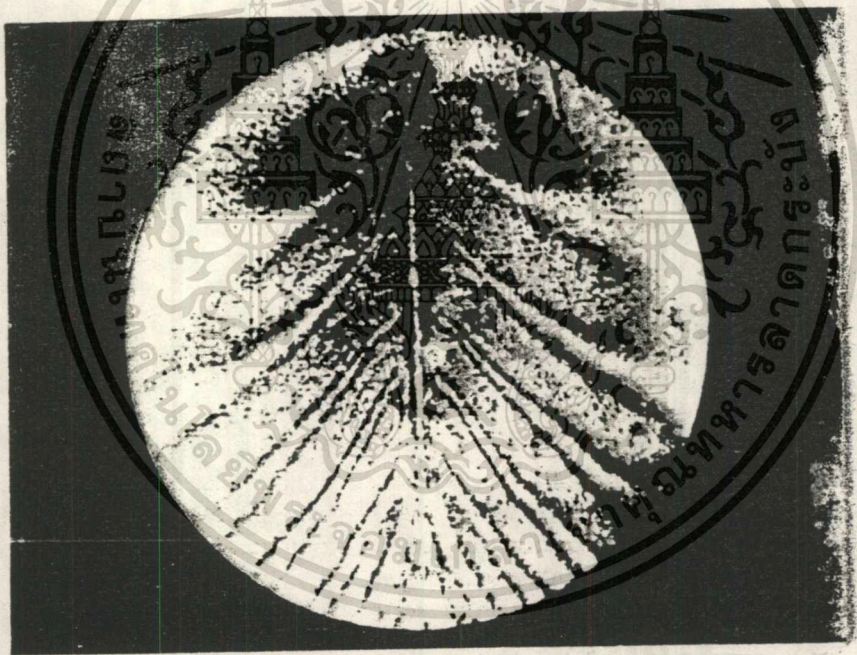
เคลื่อนที่ของจุดที่สังเกต การละลายอย่างสูงของโฮโลกราฟีฟิล์ม (Holographic film) ถูกนำมาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ประโยชน์มากมาย ข้อมูลที่ถูกเก็บบันทึกไว้ในสเปกเคิลแกรมเป็นข้อมูลที่กระจายอย่างหนาแน่นมากบนเวกเตอร์การเคลื่อนที่ หรือความเร็วและการสังเกตของสเปกเคิลแกรม ใช้วิธีจุดต่อจุดสำหรับการการสร้าใหม่ของข้อมูลเป็นกระบวนการที่เสียเวลามากถ้าคำนวณด้วยมือในการวิเคราะห์ส่วนประกอบข้อมูลของการไหล ดังนั้นจึงควรใช้คอมพิวเตอร์มาช่วย (ดูรูปที่ 2.7)

เทคนิคของสเปกเคิลนี้ ใช้สำหรับเพิ่มผลลัพธ์โดยการสร้าใหม่อีกวิธีหนึ่ง ในภาพจริงของสนามการไหล วิธีวิเคราะห์ข้อมูลนี้เรียกว่า สเปซฟิลเตอร์ริง (Spatial filtering) รูปแบบการติดตั้งของการสร้าใหม่แสดงในรูปที่ 2.8 ฉากถูก ถูกส่องแสงด้วยแสงเลเซอร์ที่ขยายสเปกเคิลแกรมเป็นความคิดตามความหมายของเลนส์ในแผ่นราบฟูริเยร์ (Fourier plane) ซึ่งได้กล่าวมาก่อนแล้วคือวิธีจุดต่อจุด รูปแบบของยังก์สฟริงก็ถูกสังเกตโดยมีฉากมัวๆ ตั้งอยู่ในแผ่นราบที่มีช่องโปร่งใสตั้งอยู่บนแกน แสงเล็ก ๆ สามารถผ่านเข้าไปในช่องถึงเลนส์อันที่ 2 ในแผ่นราบสุดท้าย นี่เป็นลักษณะแนวคิดของสเปกเคิลแกรม ทุกจุดของสเปกเคิลแกรมถูกส่องโดยแสงเลเซอร์ที่ขยายออก แผ่นราบฟูริเยร์ถูกรอบคลุมโดยขอบที่ซ้อนกันจำนวนมาก แสงสามารถผ่านเข้าไปในช่องของแผ่นราบฟูริเยร์ที่ตั้งบนขอบแสงที่ซ้อนกัน จะพบว่าความต้องการนี้จะพบในระบบที่ตั้งฉากกับรัศมีซึ่งประกอบด้วย ช่อง, แกน, ระยะจากช่องถึงระดับสายตา และขอบช่องว่างที่เป็นจำนวนเต็ม ซึ่งผลที่จะเกิดภายหลัง คือจุดแต่ละจุดจะเกิดการถูกฉายแสงในแผ่นราบแผ่นสุดท้าย ซึ่งความเร็วการไหลและทิศทางของจุดสังเกตเป็นค่าที่แน่นอน ในการไหลบนแผ่นราบอย่างถูกต้อง จุดที่ถูกฉายแสงในแผ่นราบจะอยู่บนเส้น โค้งหรือขอบของความเร็วประกอบที่เท่ากัน ความเร็วที่ต่างกันจากขอบสู่ขอบจะคงที่ จำนวนและทิศทางของความเร็วประกอบจะหมายถึง ความเร็วขอบที่เท่ากัน (Equivelocity fringe) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของช่องในแผ่นราบฟูริเยร์



รูปที่ 2.8 รูปแบบการติดตั้งสำหรับวิธีการสร้างใหม่



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงระบบของความเร็วยกของขอบที่เท่ากัน

รูปที่ 2.9 แสดงระบบของความเร็วยกของขอบที่เท่ากัน ในสนามการไหลของแผ่นราบภายในเลนส์ขนาดใหญ่ ซึ่งถูกผลิตโดยการเคลื่อนที่ทรงกระบอกไปสู่น้ำเกลือเข้มข้น และการสังเกตความเร็วยกในเวลาเดียวกัน ความโค้งของเฟสที่เท่ากันในระบบคลื่น การติดตั้งของช่องที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งต่างกัน ในแผ่นราบฟูรีเยร์ และผลลัพธ์จากความเร็วประกอบที่ต่างกัน ความเร็วขอบที่เท่ากันจะสังเกตได้ การรีคอนสตรัคชันโดยวิธีสปาสเชียลเฟลเตอร์ริง ต้องทำให้ได้รับแสงที่ต่ำลง

การประยุกต์สเปกเทิลโฟโตกราฟี สำหรับการวัดความเร็วคือความถี่ซึ่งมีค่าไม่มากนัก ขอบเขตที่แสดงคือการหาแหล่งจ่ายแสงอัลตราชอร์ต (Ultrashort) สำหรับฉายให้ฉากปัญหาที่เล็กน้อยเมื่อเทียบกับการวัดความเร็วการไหลที่น้อย ๆ แต่มีการประยุกต์สำเร็จมาแล้วโดยวิธีเบอร์นาร์ดคอนเวคชัน (Bernard convection) อย่างไรก็ตาม ที่สภาวะปกติการวัดความเร็วของแก๊สได้พิสูจน์มาแล้วว่าได้ผลที่แน่นอนกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีบท

3.1 เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re)

$$Re = \frac{\text{แรงเฉื่อย}}{\text{แรงเนื่องจากความหนืด}}$$

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

L = ความยาวของแผ่นราบ

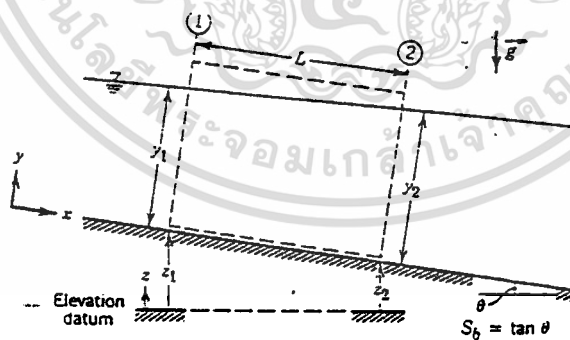
ρ = ความหนาแน่นของของไหล

V = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล

μ = ความหนืดของของไหล

ν = ความหนืดจลน์

3.2 ฟรูดนัมเบอร์ (Froude number)



รูปที่ 3.1 ปริมาตรควบคุมและพิกัดต่าง ๆ ในช่องทางเปิด

$$Fr = V / \sqrt{gL}$$

$$Fr = \frac{\text{แรงเฉื่อย (Inertia force)}}{\text{แรงโน้มถ่วง (Gravity forces)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L = ลักษณะความยาว (Characteristic length) ในช่องทางไหลแบบเปิด (Open channel flow) คือค่าความลึกของน้ำ

$Fr < 1$ การไหลเป็นแบบภายใต้จุดวิกฤต (Subcritical point)

$Fr = 1$ การไหลเป็นแบบที่จุดวิกฤต (Critical point)

$Fr > 1$ การไหลเป็นแบบเหนือจุดวิกฤต (Supercritical point)

เนื่องจากชุดการทดลองเป็นช่องทางไหลแบบเปิดที่มีระดับเท่ากันหมด ค่า Fr จึงเท่ากัน

หมด เราจึงไม่คิดผลของ Fr

3.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier - Stokes equation)

สมการนาเวียร์-สโตกส์ ของพิกัดฉาก

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

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

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

สมการนาเวียร์-สโตกส์ ของพิกัดทรงกระบอก

พิจารณาในแนวแกน r :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_\theta \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \\ = \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - 2 \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right\} \end{aligned}$$

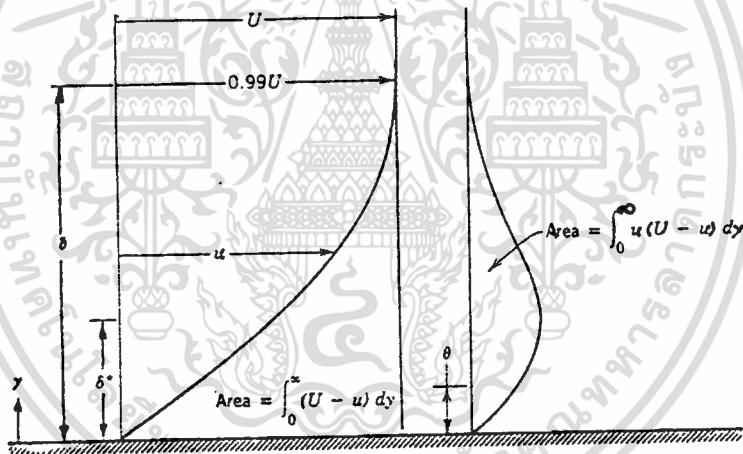
พิจารณาในแนวแกน θ :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + v_\theta \frac{\partial v_\theta}{r \partial \theta} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\ = \rho g_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial [rv_\theta]}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + 2 \frac{\partial v_r}{r \partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right\} \end{aligned}$$

พิจารณาในแนวแกน z :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_\theta \frac{\partial v_z}{r \partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right\} \end{aligned}$$

3.4 ความหนาของชั้นของไหล (Boundary layer thickness)



รูปที่ 3.2 ความหนาของชั้นของไหล

ให้ δ = การกระจายความหนาของชั้นของไหล (Boundary-layer disturbance thickness)

$$\delta = \frac{u}{U} = 0.99$$

ให้ δ^* = ระยะความหนาขจัด (Displacement thickness)

$$\rho U \delta^* = \int_0^\infty \rho (U - u) dy$$

สำหรับของเหลวอัดตัวไม่ได้; $\rho =$ ค่าคงที่

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^{\delta} (1 - \frac{u}{U}) dy$$

ให้ θ = ความหนาของชั้นโมเมนตัม (Momentum thickness)

$$\rho U^2 \theta = \int_0^{\delta} \rho u (U - u) dy$$

$$\theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U} (1 - \frac{u}{U}) dy$$

$$\equiv \int_0^{\delta} \frac{u}{U} (1 - \frac{u}{U}) dy$$

ชั้นของไหลจะคิดที่ตำแหน่งที่ค่าความเร็ว $u=0.99U$ เพื่อค่าของ y มากกว่า δ แล้ว $u=U$

โดยค่า U หามาจากสมการที่ (1)

3.5 ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อระยะทางเปลี่ยนไป (Pressure Gradient)

ถ้า $\frac{dP}{dx} \neq 0$

จากสมการโมเมนตัม

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \frac{d}{dx} (U^2 \theta) + \delta^* U \frac{dU}{dx}$$

จะได้ $\frac{\tau_w}{\rho} = U^2 \frac{d\theta}{dx} + (\delta^* + 2\theta) \frac{dU}{dx}$

$$\tau_w / \rho U^2 = \frac{cf}{2} = \frac{d\theta}{dx} + (H + 2) \frac{\theta}{U} \frac{dU}{dx} \quad (7)$$

เมื่อ $H = \frac{\delta^*}{\theta}$: รูปแบบความเร็ว (Velocity profile) “เซพแฟคเตอร์” (Shape factor)

3.6 แรงฉุด (Drag Force) และค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด (Drag Coefficient)

$$F_D = \int_{\text{surface}} P dA$$

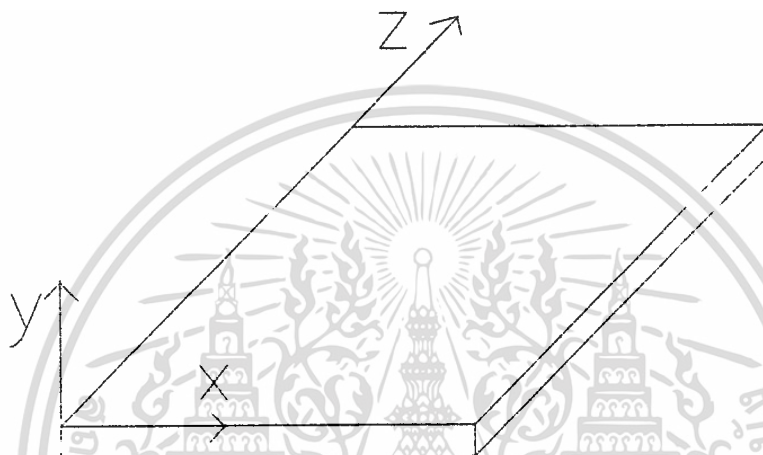
$$C_D = F_D / \frac{1}{2} \rho V^2 A$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การคำนวณ

4.1 การคำนวณสำหรับแผ่นราบ



รูปที่ 4.1 แสดงภาพแผ่นราบ

สำหรับ ρ และ μ คงที่ จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ของฟลักซิด การวิเคราะห์จะมีเงื่อนไขดังนี้

1. ของไหลเป็นแบบของเหลวไม่อัดตัว (Incompressible fluid)
2. การวิเคราะห์การไหลเป็นแบบ 2 มิติ
3. การไหลเป็นแบบคงที่ (Steady flow)
4. แผ่นราบอยู่ในแนวระดับ
5. ความเร็วในแนวแกน Y น้อยกว่าความเร็วในแนวแกน X มาก ๆ

การวิเคราะห์จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2. v_z = 0$$

$$3. \partial p / \partial x = 0$$

$$4. v \ll u$$

พิจารณาในแนวแกน x :

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

$$\rho \left(\frac{u \partial u}{\partial x} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.1.1)$$

จากสมการ 4.1.1 จัดให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite - difference) จะได้

$$\rho \left\{ U_{(m,n)} \left[\frac{U_{(m+1,n)} - U_{(m-1,n)}}{2\Delta x} \right] \right\}$$

$$= \mu \left[\frac{U_{(m+1,n)} - U_{(m,n)} + U_{(m-1,n)}}{\Delta x^2} \right] + \mu \left[\frac{U_{(m,n+1)} - U_{(m,n)} + U_{(m,n-1)}}{\Delta y^2} \right]$$

จัดรูปสมการเพื่อหาค่า $U_{(m,n)}$

$$U_{(m,n)} = \left\{ \frac{\mu [U_{(m+1,n)} + U_{(m-1,n)}]}{\Delta x^2} + \frac{\mu [U_{(m,n+1)} + U_{(m,n-1)}]}{\Delta y^2} \right\}$$

$$\div \left\{ \frac{\rho [U_{(m+1,n)} + U_{(m-1,n)}]}{2\Delta x} + \frac{\mu}{\Delta x^2} + \frac{\mu}{\Delta y^2} \right\} \quad (4.1.2)$$

จากสมการ 3.4.1

$$\delta^* = \int^{\infty} (1 - u/U) dy$$

จัดให้อยู่ในรูป ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ จะได้

$$\delta^* = \sum_{j=0}^{\infty} \left(1 - \frac{U_{(m,j)}}{U} \right) \Delta y \quad (4.1.3)$$

จากสมการ 3.4.2

$$\theta \cong \int \frac{u}{U} (1 - \frac{u}{U}) dy$$

จัดให้อยู่ในรูป ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

$$\theta = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{U_{(m,j)}}{U} (1 - \frac{U_{(m,j)}}{U}) \Delta y \quad (4.1.4)$$

จากสมการ 3.5.3

$$\tau_w = \rho U^2 \frac{d\theta}{dx}$$

จัดให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

$$\tau_w(m) = \rho U \frac{[\theta_{(m+1)} - \theta_{(m)}]}{2\Delta x} \quad (4.1.5)$$

จากสมการ 3.6.1

$$\begin{aligned} F_D &= \int \tau_w dA \\ &= \int_{\text{surface}} \tau_w(1) dA \\ F_D &= \int_{\text{surface}} \tau_w dx \end{aligned}$$

จัดให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

$$F_D = \sum_{i=0}^L \tau_w(m) \Delta x \quad (4.1.6)$$

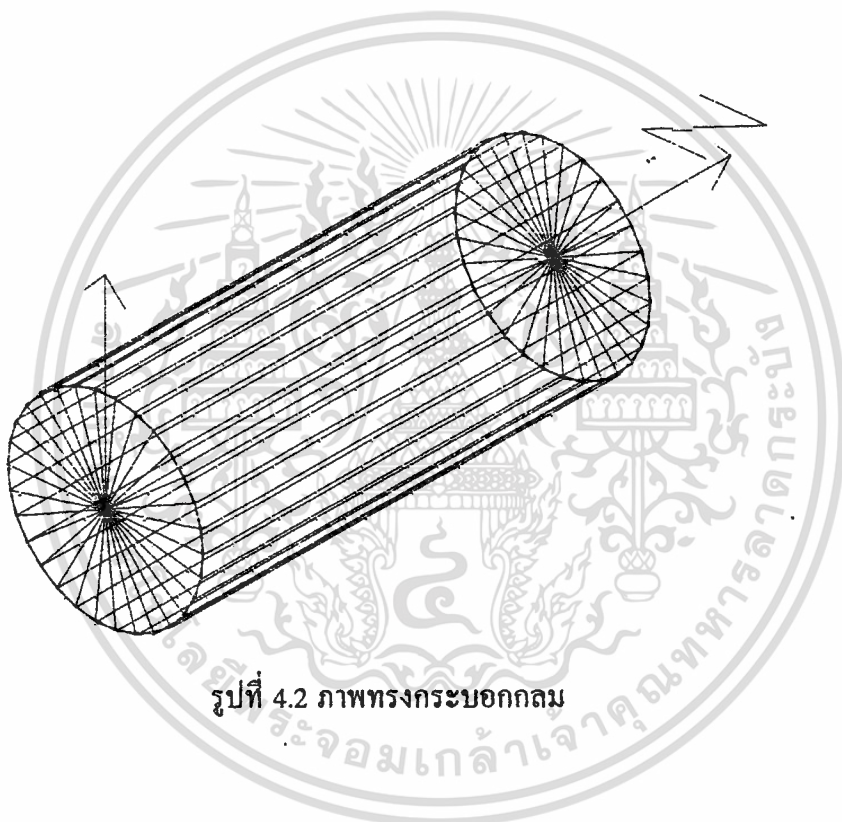
จากสมการ 3.6.2

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 (1)(L)} \\
 &= \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 L} \quad (4.1.7)
 \end{aligned}$$

4.2 การคำนวณสำหรับวัตถุทรงกระบอก



รูปที่ 4.2 ภาพทรงกระบอกกลม

สำหรับ ρ และ μ คงที่ จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ของพิกัดทรงกระบอก

การวิเคราะห์จะมีเงื่อนไขดังนี้

1. ของไหลเป็นของไหลแบบของเหลวไม่อัดตัว
2. การวิเคราะห์การไหล จะวิเคราะห์เป็นแบบ 2 มิติ
3. การไหลเป็นแบบคงที่
4. ชั้นของไหลบางมาก ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์จะได้

1. $\rho =$ ค่าคงที่
2. $v_z = 0$
3. $\partial v_r / \partial t$
4. ความดันของไหลที่ระดับเดียวกันภายนอกชั้นของไหลกับภายในชั้นของไหลมีค่าเท่ากัน

จะได้ $P_2 = P_1 - \rho g r \sin \theta$

P_2 คือ ความดันที่ตำแหน่งใด ๆ ของของไหลที่อยู่ระดับเดียวกัน

P_1 คือ ความดันที่ระดับเริ่มต้นภายนอกชั้นของไหล

พิจารณาในแนวแกน r :

$$\begin{aligned} & \rho \left(\cancel{\frac{\partial v_r}{\partial t}} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_\theta \frac{\partial v_r}{r \partial \theta} + v_\theta^2 + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \\ & = \rho g_r = \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial [r v_r]}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - 2 \frac{\partial v_\theta}{r^2 \partial \theta} + \cancel{\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}} \right\} \\ & \rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_\theta \frac{\partial v_r}{r \partial \theta} + v_\theta^2 + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \\ & = \rho g(\sin \theta) - \frac{\partial (P_1 - \rho g r \sin \theta)}{\partial r} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial [r v_r]}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - 2 \frac{\partial v_\theta}{r^2 \partial \theta} \right\} \\ & \left(\rho v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\rho v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{v_\theta^2}{r} \right) \\ & = \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial [r v_r]}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - 2 \frac{\mu}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \quad (4.2.1) \end{aligned}$$

พิจารณาในแนวแกน θ :

$$\begin{aligned} & \rho \left(\cancel{\frac{\partial v_\theta}{\partial t}} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + v_\theta \frac{\partial v_\theta}{r \partial \theta} + v_r v_\theta + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\ & = \rho g_\theta - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial [r v_\theta]}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + 2 \frac{\partial v_r}{r^2 \partial \theta} + \cancel{\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2}} \right\} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho \left(\frac{v_r \partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right) \\ = -\rho(-g \cos \theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial (P_1 - \rho g r \sin \theta)}{\partial \theta} + \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial [r v_\theta]}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right\}$$

$$\left(\rho v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \rho \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} \right) \\ = \mu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial [r v_\theta]}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right\} \quad (4.2.2)$$

จากสมการ 4.2.1 เขียนให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ได้ดังนี้

$$\rho v_r^{(m,n)} \frac{[v_r^{(m,n+1)} - v_r^{(m,n-1)}]}{2\Delta r} + \frac{\rho v_\theta^{(m,n)} [v_r^{(m+1,n)} - v_r^{(m-1,n)}]}{r} - \frac{v_\theta^{(m,n)}}{r} \\ = \mu \frac{[v_r^{(m,n+1)} - 2v_r^{(m,n)} + v_r^{(m,n-1)}]}{\Delta r^2} + \frac{\mu [v_r^{(m,n+1)} - v_r^{(m,n-1)}]}{2\Delta r} - \frac{\mu v_\theta^{(m,n)}}{r^2} \\ + \frac{\mu [v_r^{(m+1,n)} - 2v_r^{(m,n)} + v_r^{(m-1,n)}]}{r^2} - \frac{2\mu [v_r^{(m+1,n)} - v_r^{(m-1,n)}]}{r^2} \frac{1}{2\Delta \theta}$$

จัดรูปสมการจะได้

$$v_r^{(m,n)} = \left\{ \frac{v_\theta^{(m,n)}}{r} + v_r^{(m+1,n)} + \frac{[-\rho v_\theta^{(m,n)} + \mu \frac{(1-\Delta \theta)}{\Delta \theta}]}{2r\Delta \theta} + \frac{v_r^{(m-1,n)} [\rho v_\theta^{(m,n)} + \mu \frac{(1-\Delta \theta)}{\Delta \theta}]}{2r\Delta \theta} \right. \\ \left. + v_r^{(m,n+1)} \left[\frac{\mu}{\Delta r^2} + \frac{\mu}{2r\Delta r} \right] + v_r^{(m,n-1)} \left[\frac{\mu}{\Delta r^2} - \frac{\mu}{2r\Delta r} \right] \right\} \\ \div \left\{ \frac{[v_r^{(m,n+1)} - v_r^{(m,n-1)}]}{2\Delta r} + \frac{[2\mu - \mu + 2\mu]}{\Delta r^2} \frac{1}{r^2} \frac{1}{\Delta \theta^2} \right\} \quad (4.2.3)$$

จากสมการ 4.2.2 เขียนให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ได้ดังนี้

$$\rho v_r^{(m,n)} \frac{[v_\theta^{(m,n+1)} - v_\theta^{(m,n-1)}]}{2\Delta r} + \frac{\rho v_\theta^{(m,n)} [v_\theta^{(m+1,n)} - v_\theta^{(m-1,n)}]}{r} - \frac{\rho v_r^{(m,n)} v_\theta^{(m,n)}}{r}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= \mu \left[\frac{v_{\theta(m,n+1)} - 2v_{\theta(m,n)} + v_{\theta(m,n-1)}}{\Delta r^2} \right] + \frac{\mu}{r} \left[\frac{v_{\theta(m,n+1)} - v_{\theta(m,n-1)}}{2\Delta r} \right] - \frac{\mu v_{\theta(m,n)}}{r^2} \\
&+ \frac{\mu}{r^2} \left[\frac{v_{\theta(m+1,n)} - 2v_{\theta(m,n)} + v_{\theta(m-1,n)}}{\Delta \theta^2} \right] + \frac{2\mu}{r^2} \left[\frac{v_{\theta(m+1,n)} - v_{\theta(m-1,n)}}{2\Delta \theta} \right]
\end{aligned}$$

จัดรูปสมการจะได้เป็น

$$\begin{aligned}
v_{\theta(m,n)} &= \left\{ v_{\theta(m,n+1)} \left[\frac{\mu}{\Delta r^2} + \frac{\mu}{2r\Delta r} - \frac{\rho}{2\Delta r} v_{r(m,n)} \right] + v_{\theta(m,n-1)} \left[\frac{\mu}{\Delta r^2} - \frac{\mu}{2r\Delta r} + \frac{\rho}{2\Delta r} v_{r(m,n)} \right] \right. \\
&+ \frac{(\mu)}{r^2 \Delta \theta^2} v_{\theta(m+1,n)} + \frac{(\mu)}{r^2 \Delta \theta^2} v_{\theta(m-1,n)} + \frac{(\mu)}{r^2 \Delta \theta} [v_{r(m+1,n)} - v_{r(m-1,n)}] \left. \right\} \\
&\div \left\{ \frac{\rho}{r} \left[\frac{v_{\theta(m+1,n)} - v_{\theta(m-1,n)}}{2\Delta \theta} \right] + \frac{\rho}{r} v_{r(m,n)} + \frac{\mu}{r^2} + \frac{\mu}{\Delta r^2} + \frac{\mu}{\Delta \theta^2} \frac{1}{r} \right\} \quad (4.2.4)
\end{aligned}$$

จากสมการ 3.4.1

$$\begin{aligned}
\delta^* &= \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U} \right) dy \\
&\equiv \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U} \right) r d\theta
\end{aligned}$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ จะได้

$$\delta^*_{(n)} = \sum_{m=0}^{\delta} \left(1 - \frac{u_{(m,n)}}{U} \right) r \Delta \theta \quad (4.2.5)$$

จากสมการ 3.4.2

$$\begin{aligned}
\theta &= \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U} \right) dy \\
&= \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U} \right) r d\theta
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดสมการให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ จะได้

$$\theta_{(m)} = \sum_{m=0}^{\delta} u_{(m,n)} \left(1 - \frac{u_{(m,n)}}{U} \right) r \Delta\theta$$

$$\theta_{(m)} = r \sum_{m=0}^{\delta} u_{(m,n)} \left(1 - \frac{u_{(m,n)}}{U} \right) \Delta\theta \quad (4.2.6)$$

จากสมการ 3.5.4

$$\begin{aligned} \frac{\tau_w}{\rho} &= U^2 \frac{d\theta}{dx} + (\delta^* + 2\theta) \frac{dU}{dx} \\ &= U^2 \frac{d\theta}{dx} \cdot \frac{dx}{d\theta} + (\delta^* + 2\theta) \frac{dU}{dx} \cdot \frac{dx}{d\theta} \\ &= U^2 \frac{d\theta}{dx} (-r \sin\theta) + (\delta^* + 2\theta) U (-r \sin\theta) \frac{du}{dx} \\ &= -U^2 r \sin\theta \frac{d\theta}{dx} - (\delta^* + 2\theta) U r \sin\theta \frac{du}{dx} \end{aligned}$$

U = ค่าการกระจายความเร็ว (Free stream velocity distribution)

สำหรับ ทรงกระบอกกลม

$$U = 2U_\infty \sin\theta$$

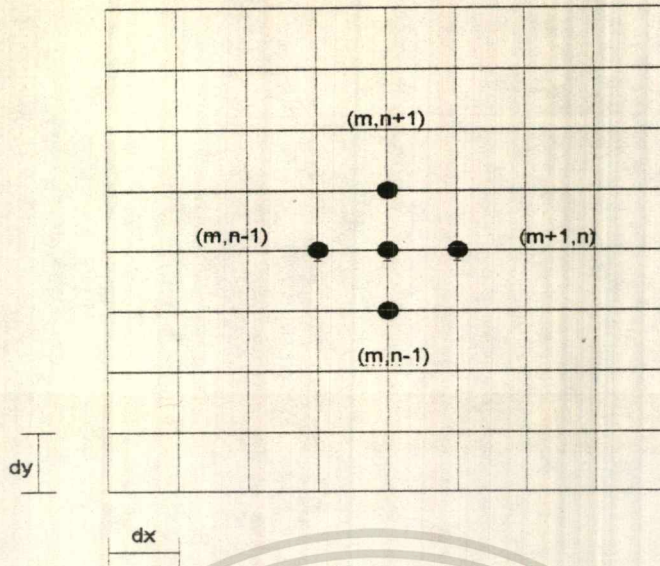
ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \frac{\tau_w}{\rho} &= -(2U_\infty \sin\theta)^2 r \sin\theta \frac{d\theta}{d\theta} - (\delta^* + 2\theta) (2U_\infty \sin\theta) U r \sin\theta \frac{d(2U_\infty \sin\theta)}{d\theta} \\ \frac{\tau_w}{\rho} &= -4rU_\infty^2 r \sin^3\theta \frac{d\theta}{d\theta} - (\delta^* + 2\theta) 4U_\infty^2 \sin^2\theta \cos\theta \end{aligned}$$

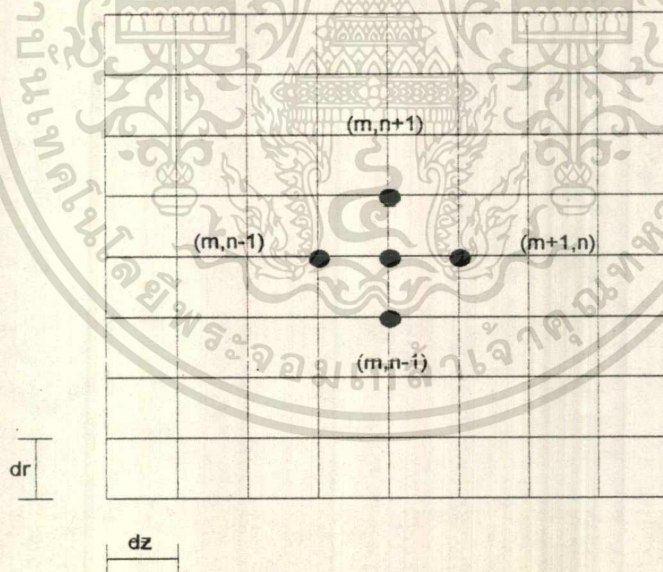
จัดสมการให้อยู่ในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

$$\tau_w = -4rU_\infty^2 r \sin^3\theta_{(n)} \frac{[\theta_{(n+1)} + \theta_{(n-1)}]}{2\Delta\theta} - (\delta^* + 2\theta) 4U_\infty^2 \sin^2\theta_{(n)} \cos\theta_{(n)}$$

$$\tau_w = -4rU_\infty^2 r \sin^3\theta_{(n)} \frac{[\theta_{(n-1)} + \theta_{(n+1)}]}{2\Delta\theta} - (\delta^* + 2\theta) 4U_\infty^2 \sin^2\theta_{(n)} \cos\theta_{(n)}$$



รูปที่ 4.3 การสร้างไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ สำหรับแผ่นราบ



รูปที่ 4.4 การสร้างไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ สำหรับทรงกระบอก

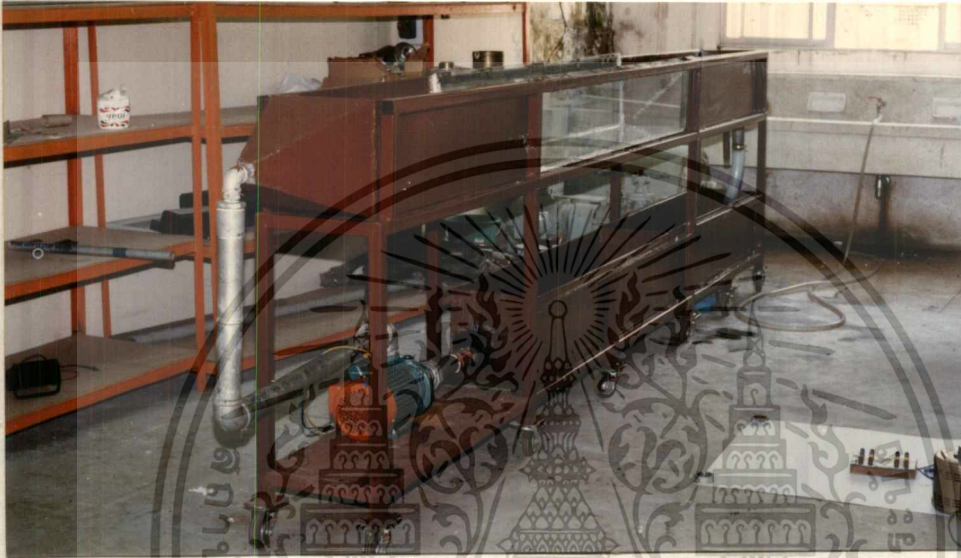
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

5.1 อุปกรณ์การทดลอง

5.1.1 ตู้ทดลอง

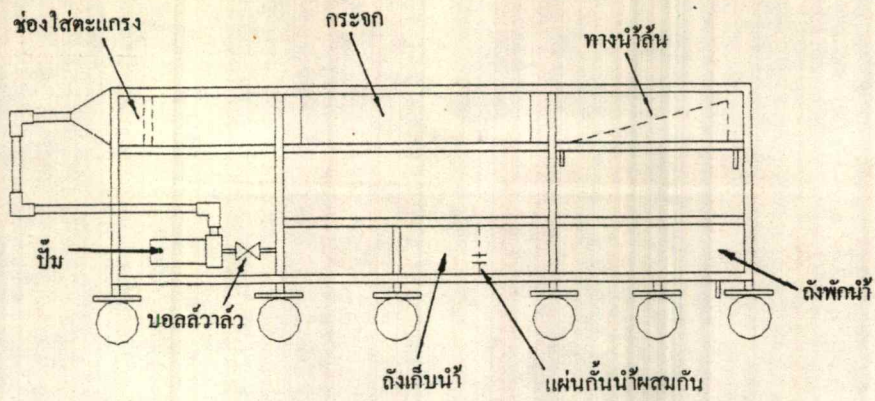


รูปที่ 5.1.1 a รูปตู้ทดลอง

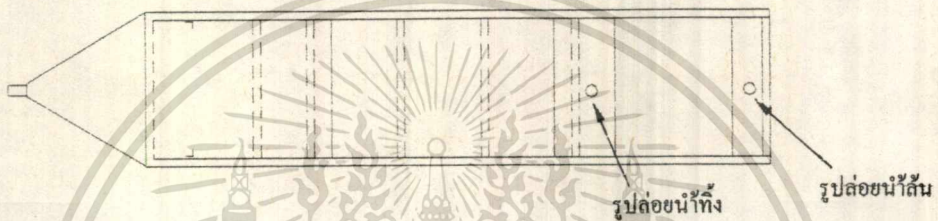


รูปที่ 5.1.1 b รางน้ำส่วนบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



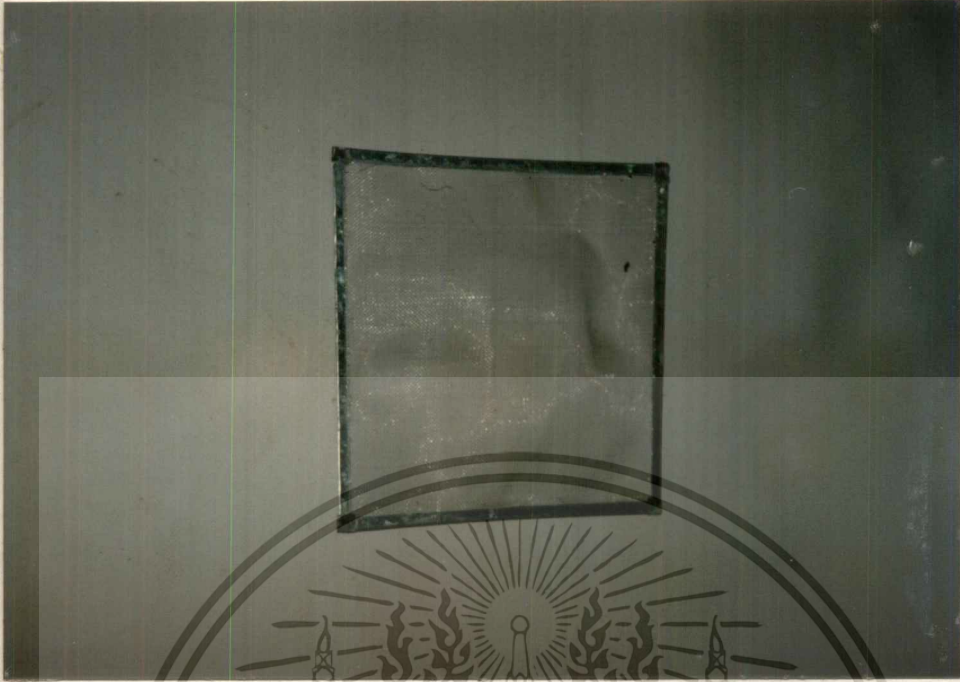
รูปที่ 5.1.2 a แบบตู้ทดลองด้านข้าง



รูปที่ 5.1.2 b แบบตู้ทดลองด้านบน

ตู้ทดลองจะประกอบไปด้วยรางน้ำซึ่งมีส่วนที่เป็นกระจกใสอยู่ตรงส่วนกลางของรางน้ำ, ทางน้ำล้น, ถังพักน้ำ, ถังเก็บน้ำ, ท่อระบายน้ำทิ้งและช่องใส่ตะแกรง น้ำที่ใช้ในการทดลองจะไหลวนอยู่ในชุดทดลองน้ำถูกส่งจากปั๊ม ผ่านดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) ทางด้านหน้า เพื่อลดความเร็วของการไหลลง หลังจากนั้นน้ำจะไหลผ่านชุดตะแกรงในช่วงถัดมาเพื่อทำให้การไหลราบเรียบขึ้น จากนั้นจะผ่านมายังส่วนกลางตู้ทดลองที่เป็นกระจกใส เพื่อใช้ในการสังเกตการไหลและการบันทึกภาพการไหลของของไหลที่ผ่านแบบจำลองแบบต่างๆ หลังจากนั้นน้ำจะไหลไปยังทางน้ำล้น และไหลลงสู่ถังพักน้ำที่ส่วนล่างของตู้ทดลอง และไหลเข้าถังเก็บน้ำต่อไป ระหว่างถังเก็บน้ำและถังพักน้ำจะมีท่อน้ำต่อกันอยู่ ถ้าไม่ต้องการให้น้ำในถังพักน้ำไหลเข้าถังเก็บน้ำ ก็ใช้ฝาครอบท่อบปิดท่อบระหว่างถังทั้งสองได้

5.1.2 ชุดตะแกรง



รูปที่ 5.1.3 ชุดตะแกรง

ชุดตะแกรงเป็นตะแกรงซึ่งทำมาจากมุ้งลวดอะลูมิเนียม ชุดตะแกรงนี้มีหน้าที่ทำให้น้ำซึ่งไหลในรางน้ำส่วนบนมีการไหลที่สม่ำเสมอขึ้นและยังช่วยลดความเร็วของของไหล ถ้าต้องการให้ความเร็วของของไหลลดลงมากขึ้น ก็ใส่แผ่นตะแกรงเพิ่มขึ้น และยังมีผลทำให้การไหลสม่ำเสมอขึ้นด้วย

5.1.3 ชุดฉีดคาย



รูปที่ 5.1.4 ชุดฉีดคาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดฉีดคายจะประกอบไปด้วย

3.1) หลอดฉีดขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.2) สายยาง ซึ่งเจาะรูเอาไว้เพื่อฉีดคายที่เตรียมไว้ออกมา โดยรูที่เจาะไว้จะต้องมีขนาดพอเหมาะ เพื่อให้การฉีดคายไม่ออกมามากหรือน้อยเกินไป

3.3) โครงเหล็กยึดสายยาง ทำหน้าที่ยึดสายยางที่จะฉีด

ชุดฉีดคายนี้อาจเคลื่อนย้ายได้สะดวก เมื่อใช้งานเสร็จแล้วก็สามารถออกมาจากตู้ทดลอง

ได้

5.1.4 มานอมิเตอร์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันที่ตกคร่อมระหว่างแบบจำลอง

5.1.5 อุปกรณ์ถ่ายภาพ

จากการทดลองจะทำการถ่ายภาพวีดีโอ และรูปภาพ จึงต้องใช้ชุดถ่ายวีดีโอ และชุดถ่ายภาพ

ซึ่งจะประกอบไปด้วย

1 กล้องวีดีโอ

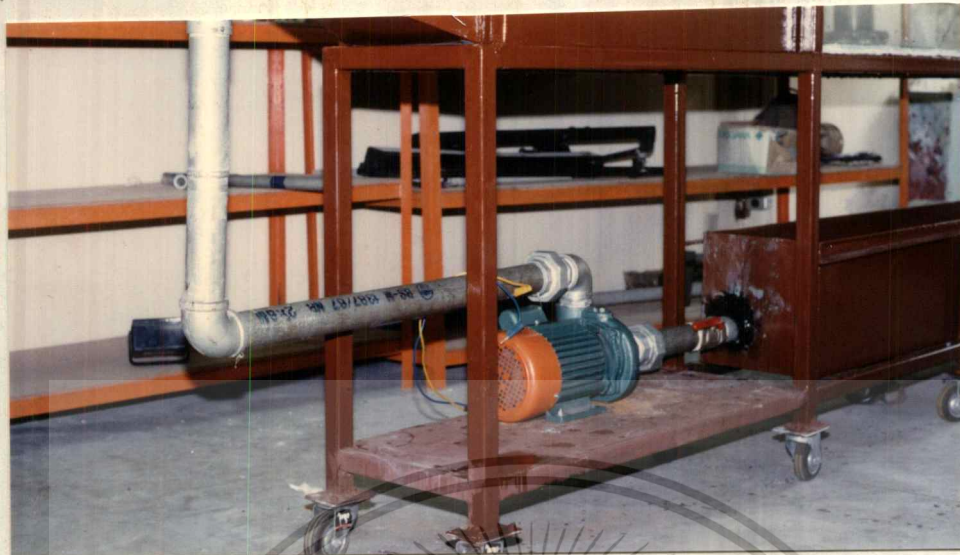
2 กล้องถ่ายรูป

3 ขาตั้งกล้อง

4 สปอร์ตไลท์

5 ฉาก

5.1.6 ชุดปั๊มและวาล์ว



รูปที่ 5.1.5 ชุดปั๊มและวาล์ว

ชุดปั๊มจะติดตั้งอยู่ทางด้านล่างของตู้ทดลอง ทำหน้าที่ส่งน้ำขึ้นไปสู่รางน้ำทางด้านบนก่อนที่จะเข้าปั๊ม จะติดตั้งวาล์วชนิดบอลวาล์วซึ่งจะทำหน้าที่ปิด-เปิด ให้นำน้ำจากส่วนบนไหลลงมาจนถึงเก็บน้ำหลังจากปิดปั๊มแล้ว

ปั๊มที่ใช้เป็นปั๊ม ASUNO (ที่มีค่ามากที่สุด)

แบบ : TD - 2005

เฮดปั๊ม : 2 กำลังม้า

แรงดันไฟฟ้า : 220 / 240 โวลต์

ความถี่ : 50 / 60 เฮิร์ตซ

กระแสไฟฟ้า : 8 แอมแปร์

ความเร็วรอบต่อนาที (RPM) : 3,000

ความสูงสูงสุด (Maximum head) : 20 เมตร

ความจุสูงสุด (Maximum capacity) : 400 LPN

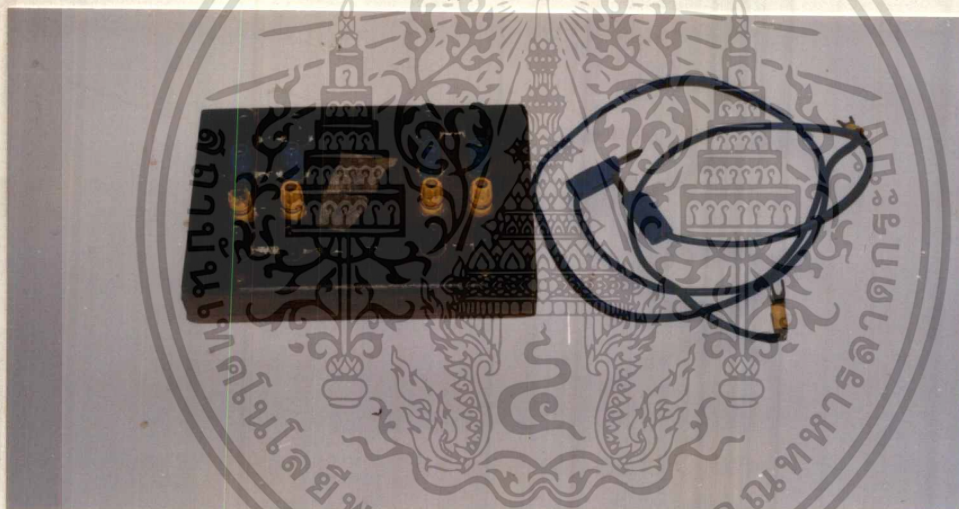
ท่อทางเข้าออก (Outlet - Inlet) : 2" × 2"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.7 หม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 5.1.6 a หม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 5.1.6 b ชุดสายไฟ

หม้อแปลงไฟฟ้า ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้จ่ายไฟขนาดต่าง ๆ ให้กับบีม เพื่อปรับความเร็วรอบของบีมทำให้อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง

หม้อแปลงไฟฟ้า ที่ใช้มีคุณลักษณะ ดังนี้

แบบ : TSB - 15M , 3 กิโลโวลต์-แอมแปร์

อินพุต : 110 / 220 โวลต์, 50 - 60 เฮิร์ตซ,

เอาต์พุต : 0 - 260, 15 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.9 แบบจำลองและชุดแขวนแบบจำลอง

ในการทดลองจะใช้แบบจำลองที่นำมาทดลอง มี 2 แบบ คือ แผ่นราบ และทรงกระบอก

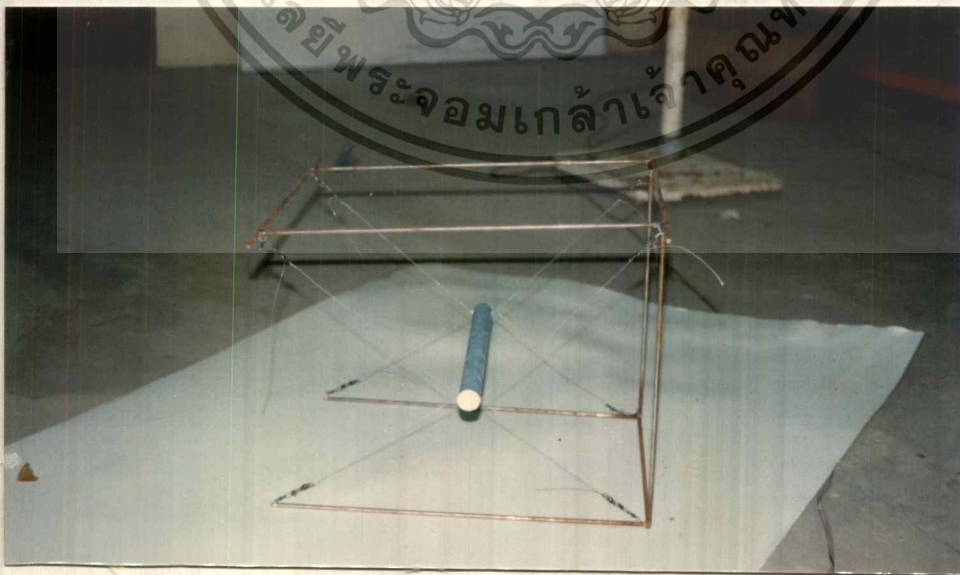
1. แบบจำลองของแผ่นราบทำจากแผ่นเหล็กชุบสังกะสี มีขนาด 11" × 11"



รูปที่ 5.1.7 a รูปแบบจำลองแผ่นราบและชุดแขวน

2. แบบจำลองของทรงกระบอกทำจากท่อพีวีซีขนาดต่าง ๆ นำมาหล่อด้วยปูนซีเมนต์ปิดหัว

ท้าย

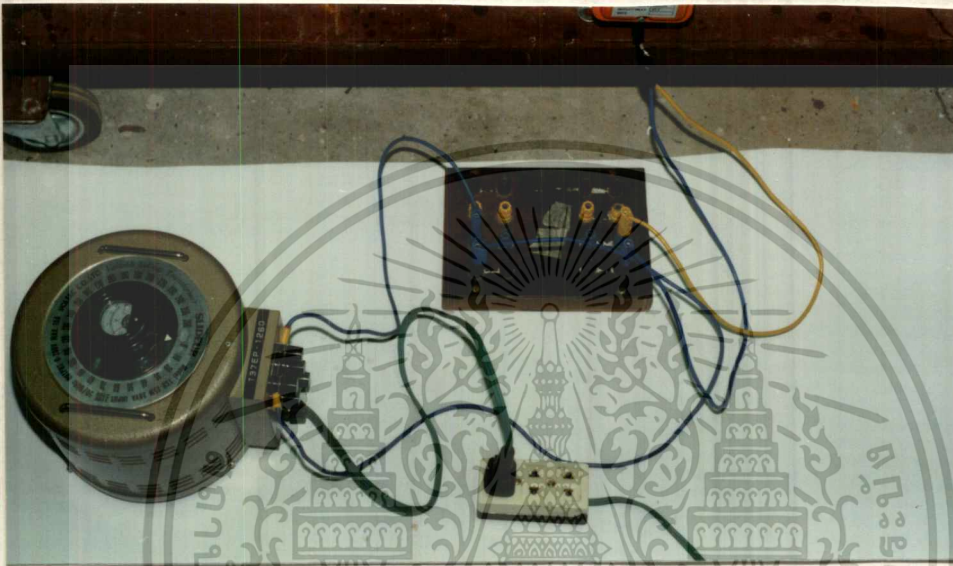


รูปที่ 5.1.7 b รูปแบบจำลองของทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 วิธีการทดลอง

1. เติมน้ำในรางชุดทดลองให้เต็ม ใส่วัตถุที่จะทดลองลงในรางทดลอง
2. ผสมสีผสมอาหารที่จะทำเป็นคายแล้วบรรจุในชุดฉีดคาย
3. ต่อไฟปั๊มเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 5.2.1 การต่อชุดสายไฟของปั๊มกับหม้อแปลงไฟฟ้า

4. จัดแสงสำหรับการถ่ายภาพ เตรียมกล้องวิดีโอและกล้องถ่ายรูป
5. เปิดบอลลาลัว
6. ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่หม้อแปลงไฟฟ้าจนกว่าปั๊มจะเริ่มทำงาน ปั๊มจะเริ่มทำงานที่แรงดันไฟฟ้า มีค่าประมาณ 90 โวลต์
7. ใส่ตะแกรงลวดในช่องใส่ตะแกรง จนการไหลค่อนข้างสม่ำเสมอ
8. ประกอบแบบจำลองเข้ากับชุดเขว่น แล้วนำแบบจำลองไปวางไว้ในรางน้ำส่วนบน
9. วางชุดฉีดคายไว้ข้างหน้าแบบจำลองห่างประมาณ 15 เซนติเมตร
10. ใช้ชุดสอดไวร์ (Hot wire) วัดความเร็วของการไหลก่อนผ่านแบบจำลองโดยวัดค้ำ

หน้าห่างประมาณ 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. นำค่าที่วัดได้ ไปใส่ในช่องใส่ค่าความเร็วของการไหล ที่ตู้การทดลอง ซึ่งอยู่ด้านหลังตู้
12. เริ่มฉีดคาย โดยให้ความเร็วของคายที่ฉีดออกมามีค่าเท่ากับความเร็วของไหลในตู้ทดลอง
13. บันทึกภาพและถ่ายวีดีโอ
14. ทำการวัดค่าความเร็วของการไหลที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลอง โดยใช้ชุดวัดความเร็ว
15. เพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าใหม่ แล้วทำการทดลองตามข้อ 9 - 13 จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (ประมาณ 220 โวลต์)
16. ใช้মানอมิเตอร์วัดค่า ΔP



บทที่ 6

โปรแกรมและการใช้งาน

โปรแกรมการคำนวณนี้ใช้โปรแกรมเมทแลบ (Matlab) ในการเขียนโปรแกรม ซึ่งเป็น

โปรแกรมที่สามารถแสดงผลออกมาเป็นรูปภาพต่างๆได้ โปรแกรมการคำนวณนี้จะมี 2

โปรแกรม ได้แก่ โปรแกรมการคำนวณการไหลผ่านแผ่นราบ และโปรแกรมการคำนวณการไหลผ่านทรงกระบอก

แต่การใช้โปรแกรมนี้มีข้อจำกัด ในเรื่องการกำหนดความละเอียดของการแบ่งกริด (Grid)

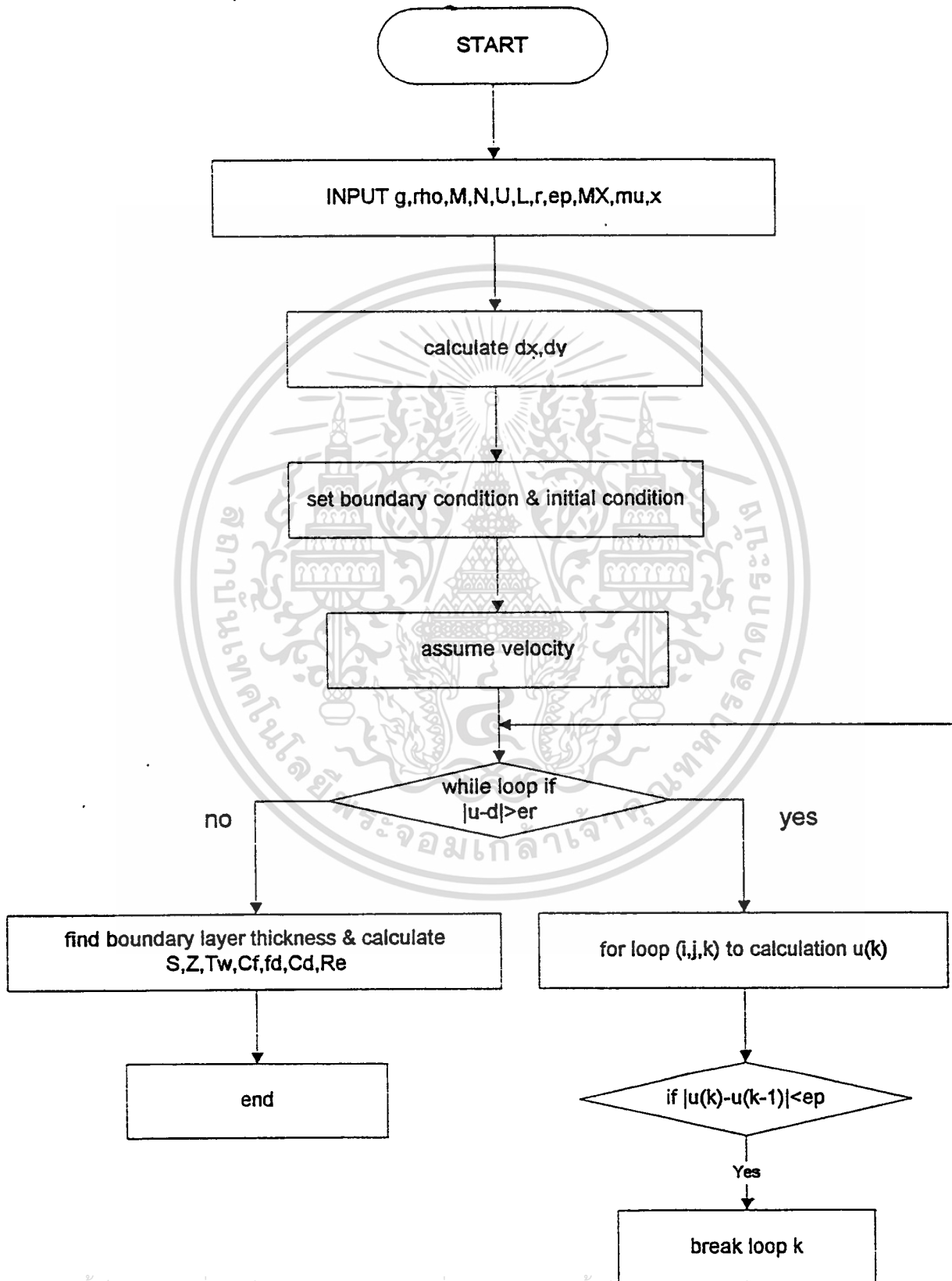
การกำหนดค่าควรไม่เกิน 50×50 ช่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1 โปรแกรมและการใช้งานสำหรับการไหลผ่านแผ่นราบ

6.1.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการไหลผ่านแผ่นราบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตเห็น เป็ไซ้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

"The flow chart of flatplate"

6.1.2 โปรแกรมสำหรับการไหลผ่านแผ่นราบ

```

%flow over flatplate
g=input('gravity (m/s^2) , g = ');
rho=input('Density of fluid (kg/m^3) ,rho = ');
M=input('number of REM(i) , M = ');
N=input('number of REM(j) , N = ');
U=input('free stream velocity (m/s),U-infinity = ');
L=input('plate lenght , L = ');
r=input('gamma , r = ');
ep=input('error , ep = ');
mx=input('number of REM(k) , mx = ');
range=input('Y-axis consideration range , range = ');
dx=L/M; % difference in X-axis
dy=range/N; % difference in Y-axis
mu=input('Absolute viscosity (dynamic) (poise) , mu = ');
er=input('error of metrix u , er = ');

%define boundary condition & initial condition
for q=1:N+1
    u(1,q)=U; %free stream velocity
end
for p=1:M+1
    u(p,1)=0;
    u(p,N)=U;
end

%assume velocity at any point
for i=2:M+1
    for j=2:N+1
        u(i,j)=U;
        w(1)=u(i,j);
        d(i,j)=u(i,j);
    end
end

%find velocity at any point
for i=1:M+1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for j=1:N+1
    e(i,j)=U;
end
end
while max(max(abs(e)))>=er
    d=u;
    for i=2:M
        for j=2:N
            for k=2:mx
                w(k)=(mu*(( ( u(i+1,j)+u(i-1,j) )/(dx^2) )+(( u(i,j+1)+u(i,j-1) )/(dy^2) ) ))/((u(i+1,j)-u(i-1,j))/(2*dx))+(2*
mu)/(dx^2))+((2*mu)/(dy^2) );

                if abs(w(k)-w(k-1))<=ep
                    u(i,j)=w(k);

                    break;
                end
            end%for of k
        end%for of j
    end%for of i
    e=u-d;
end

clear i;
clear j;
%find boundary layer thickness , Sb(i)
for i=2:M
    for j=2:N
        if abs(u(i,j)-(0.99*U))<=er
            s(i)=j;
            Sb(i)=j*dy;
            break;
        end %of if
    end
end
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clear i;
clear j;
%find displacement thickness, S*(i) & momentum thickness, Z(i)
for i=2:M
    for j=2:s(i)
        Ss(j)=(1-(u(i,j)/U))*dy;
        Zz(j)=(u(i,j)/U)*Ss(j);
    end
    S(i)=sum(Ss); %displacement thickness
    Z(i)=sum(Zz); %momentum thickness
end
for i=2:M-1
    Zd(i)=( Z(i+1)-Z(i-1) )/(2*dx); %diff zeta by dx
    Tw(i)=(rho*(U^2) )*Zd(i); %shear stress
    Cf(i)=Tw(i)/(0.5*rho*(U^2)); %skin friction coefficient
end
%find drag force & drag coefficient
f=sum(Tw);
fd=f*dx;
Cd=fd/(0.5*rho*U^2*L);

%find Re(x)
for i=2:M-1
    Re(i)=rho*U*i*dx/mu;
end
%plot
plot(Re(i),Tw(i),'- -');
xlabel('Re'),ylabel('Tw');
plot(Re(i),Sb(i));
xlabel('Re'),ylabel('boundary layer thickness');
plot(Re(i),S(i),'-');
xlabel('Re'),ylabel('displacement thickness');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 การใช้งานโปรแกรมสำหรับการไหลผ่านแผ่นราบ

1. ลบค่าข้อมูลเก่า โดยคำสั่ง Clear
2. เรียกโปรแกรมแผ่นราบโดยใช้คำสั่ง flatplate
3. หลังจากเรียกโปรแกรมแผ่นราบแล้ว จึงป้อนข้อมูลต่าง ๆ ของการไหล ตามลำดับดังนี้

$$3.1 \text{ Gravity (m/s}^2 \text{)} = g$$

$$3.2 \text{ Density of fluid (kg/m}^3 \text{)} = \rho$$

$$3.3 \text{ Number of Rem(j) } = M$$

$$3.4 \text{ Number of Rem(j) } = N$$

$$3.5 \text{ Free stream velocity (m/s}^2 \text{)} = U_\infty$$

$$3.6 \text{ Plate length (m)} = L$$

$$3.7 \text{ Gamma } = \gamma$$

$$3.8 \text{ Error } = \epsilon_p$$

$$3.9 \text{ Number of Rem(k) } = mx$$

$$3.10 \text{ Y-axis considerable range (m)} = \text{range}$$

$$3.11 \text{ Absolute viscosity (dynamic)(poise)(N.sec/m}^2 \text{)} = \mu$$

$$3.12 \text{ Error of matrix U } = \epsilon_r$$

4. หลังจากโปรแกรมการคำนวณเสร็จ จะต้องให้คำสั่งในการแสดงคำนวณออกมาเป็นค่า

ต่าง ๆ ดังนี้

$$4.1 \text{ การให้แสดงค่าความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ } U(i,j) \text{ โดยการใช้คำสั่ง U}$$

โปรแกรมจะแสดงค่า ออกมาทีละช่วง โดยแกนตั้งเป็นค่า y ที่ตำแหน่งต่างๆ แกนนอนเป็นค่า x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยโปรแกรมจะแสดงค่าออกมาที่ละ 7 หลัก ค่าขอบที่แสดงออกมามีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

4.2 การแสดงค่าความหนาของชั้นของไหล (δ_x) โดยใช้คำสั่ง sb โปรแกรมจะแสดงค่า δ_x ออกมาทั้งหมดทุกตำแหน่งของค่า x ต่าง ๆ ค่าของความหนาของชั้นของไหลที่แสดงออกมามีหน่วยเป็นเมตร

4.3 การแสดงค่าระยะความหนาจัต (δ^*) โดยใช้คำสั่ง s โปรแกรมจะแสดงค่า δ^* ออกมาทั้งหมดทุกตำแหน่งของค่า x ต่าง ๆ ระยะความหนาจัตจะมีหน่วยเป็นเมตร

4.4 การแสดงค่าความหนาของชั้นโมเมนต์ (θ) โดยใช้คำสั่ง z โปรแกรมจะแสดงค่า θ ออกมาทุกตำแหน่งของค่า x ต่าง ๆ ค่าความหนาของชั้นโมเมนต์จะมีหน่วยเป็นเมตร

4.5 การแสดงค่าความเค้นเฉือน (τ_w) โดยใช้คำสั่ง Tw โปรแกรมจะแสดงค่า τ_w ออกมาทุกตำแหน่งของค่า x ต่าง ๆ ค่าความเค้นเฉือนจะมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

4.6 การแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือน (Wall shear stress coefficient, C_f) โดยใช้คำสั่ง Cf โปรแกรมจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนออกมาทั้งหมดทุกตำแหน่งของค่า x ต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนไม่มีหน่วย

4.7 การแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงจุด (Drag Coefficient , C_D) โดยใช้คำสั่ง C_D โปรแกรมจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงจุดออกมาทั้งหมด

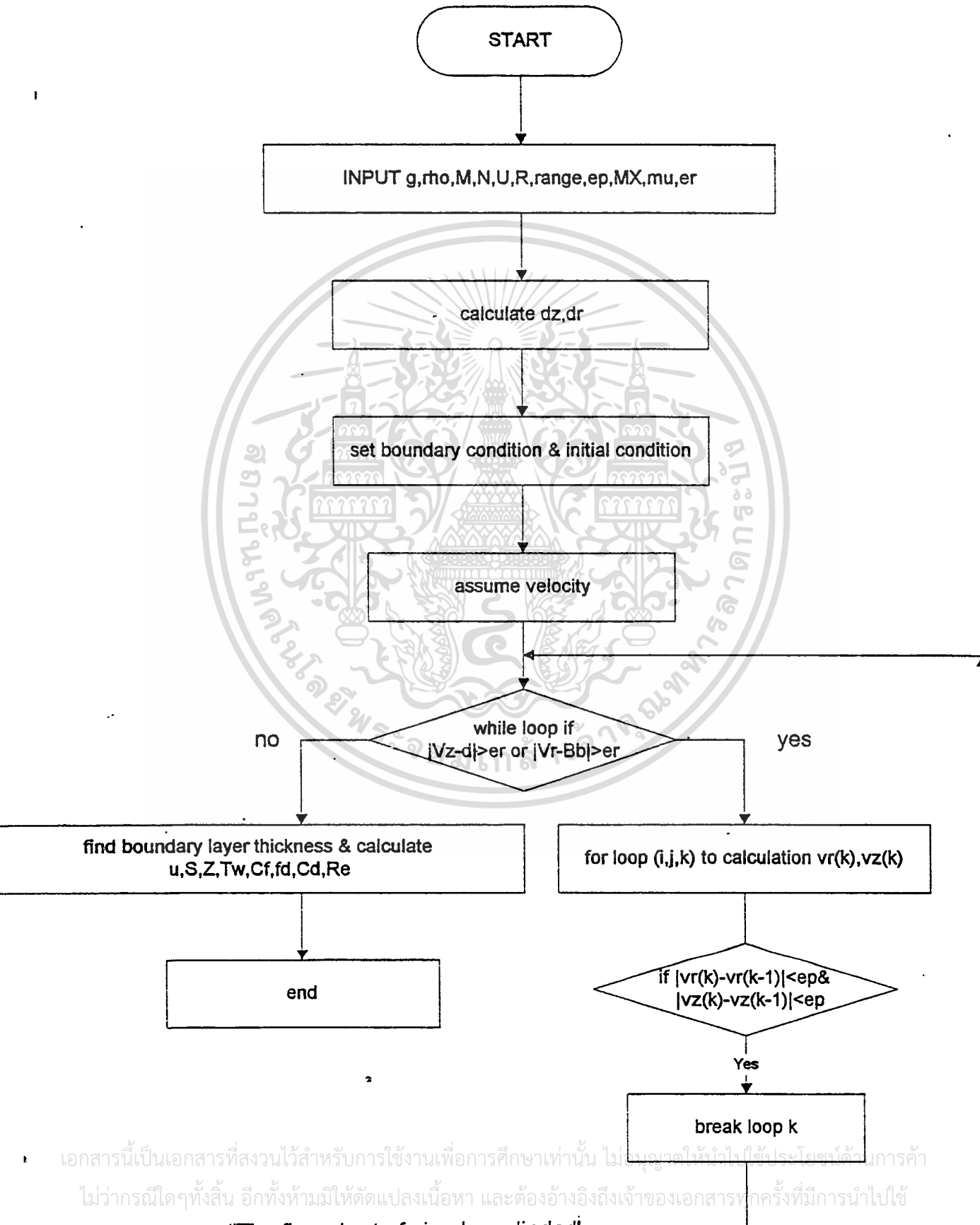
4.8 การแสดงค่าแรงจุด (F_D) โดยใช้คำสั่ง fd โปรแกรมจะแสดงค่าแรงจุดออกมาแรงจุดจะมีหน่วยเป็น นิวตัน/ ความกว้างของแผ่นราบ

4.9 การแสดงกราฟของเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) กับค่าต่าง ๆ จะใช้คำสั่ง

> plot (Re,x) โดย x คือค่าตัวแปรใดๆที่จะนำมาเขียนกราฟ แล้วกด Alt + Tab ไปที่ Fig 1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 โปรแกรมและการใช้งานสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกกลม

6.2.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมการไหลผ่านทรงกระบอกกลม



"The flow chart of circular cylinder"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 โปรแกรมสำหรับกรไหลผ่านทรงกระบอกกลม

```

%flow over cylinder
R=input('Radius of cylinder(m) , R = ');
range=input('Radial consideration range (including cylinder radius) (m) ,range = ');
rho=input('Density of fluid(kg/m3) , rho = ');
U=input('Free stream velocity (m/s), U-infinity = ');
pz=input('Zeta difference (percent), percent zeta = ');
M =input('number of REM(i), M = ');
N=input('number of REM(j), N = ');
mu=input('Absolute viscosity (Dynamic) (poise) (N*Sec/m^2) , mu = ');
Rz=(pz*pi)/100;
dr=(range-R)/M;
dz=Rz/N;
ep=input('error ,epselon = ');
mx=input('number of REM(k) , mx = ');
er=input('error of matrix ,er = ');
dp=input(' Difference presssure across the model , dp = ');
%define boundary condition & initial condition
for p=1:M
    Vr(p,1)=U*(cos(dz));
    Vz(p,1)=U*(sin(dz));
end
for q=1:N
    Vr(1,q)=0; %no slip condition
end
%assume radial & zeta velocity at any point
for i=2:M+2
    for j=2:N+2
        r(i,j)=R+(j*dr);
        Vr(i,j)=U*(cos(j*dz))*(1-((R^2)/(r(i,j)^2)));
        vr(1)=Vr(i,j);
        Vz(i,j)=U*(sin(j*dz))*(1+((R^2)/(r(j,j)^2)));
        vz(1)=Vz(i,j);
    end
end

```

ฐานนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end
%assume initial value of matrix Ee & matrix h , (error matrix)
for i=1:M+2
    for j=1:N+2
        r(i,j)=R+(j*dr);
        Ee(i,j)=U*(cos(j*dz))*(1-(R^2)/(r(i,j)^2));
        h(i,j)=U*(sin(j*dz))*(1+(R^2)/(r(i,j)^2));
    end
end
%find radial velocity & zeta velocity at any point
while 'max(max(abs(Ee)))>er' | 'max(max(abs(h)))>=er'
    Bb=Vz;
    Dd=Vr;
    for i=3:M
        for j=3:N
            for k=2:mx
                t1(k)=((rho*Vz(i,j))*(Vr(i+1,j)-Vr(i-1,j)))/(r(i,j)^2*dz);
                t2(k)= ((rho/r(i,j))*(Vz(i,j)^2));
                t3(k)= ((r(i,j+2)*Vr(i,j+2))+r(i,j-2)*Vr(i,j-2))*((mu)/(4*r(i,j)*(dr^2)));
                t4(k)=(mu/((r(i,j)^2)*(dz^2)))*(Vr(i+1,j)+Vr(i-1,j));
                t5(k)=(2*mu)/((r(i,j)^2)*2*dz)*(Vr(i+1,j)-Vr(i-1,j));
                t6(k)=(((rho)*(Vr(i,j+1)-Vr(i,j-1)))/(2*dr))+((mu)/(2*(dr^2)))+(2*mu)/((r(i,j)^2)*(dz^2)));
                vr(k)=(-t1(k)+t2(k)+t3(k)+t4(k)+t5(k))/(t6(k));

                a(k)=(rho*Vr(i,j))*((Vz(i,j+1)-Vz(i,j-1))/(2*dr));
                b(k)=(mu/(4*r(i,j)*(dr^2)))*((r(i,j+2)*Vz(i,j+2))+r(i,j-2)*Vz(i,j-2));
                c(k)=(mu/((r(i,j)^2)*(dz^2)))*(Vz(i+1,j)+Vz(i-1,j));
                d(k)=(mu/((r(i,j)^2)*(dz)))*(Vr(i+1,j)-Vr(i-1,j));
                e(k)=((rho/r(i,j))*((Vz(i+1,j)-Vz(i-1,j))/(2*dz)))+(Vr(i,j)*rho)/r(i,j)+(mu/(2*(dr^2)))+(2*mu)/((r(i,j)^2)*
                (dz^2)));
                vz(k)=(-a(k)+b(k)+c(k)+d(k))/(e(k));

                if abs(vz(k) - vz(k-1))<= ep & abs(vr(k)-vr(k-1))<=ep
                    Vr(i,j)=vr(k);
                    Vz(i,j)=vz(k);
                    break

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end % of if

end %of for k

end %of for j

end %of for i

```

```

Ee=Vr-Dd;

```

```

h=Vz-Bb;

```

```

end %of while

```

```

clear i;

```

```

clear j;

```

```

%find u

```

```

for i=1:M

```

```

for j=1:N

```

```

u(i,j)=sqrt(Vr(i,j)^2+Vz(i,j)^2);

```

```

end %of for j

```

```

end %of for i

```

```

clear i;

```

```

clear j;

```

```

%find boundary-layer thickness ,Ss(i)

```

```

for j=2:M

```

```

for i=2:N

```

```

if abs(u(i,j)-0.99*U)<=ep

```

```

Ss(j)=i*dr;

```

```

s(j)=i;

```

```

j

```

```

break

```

```

end %[if]

```

```

end

```

```

end

```

```

%find displacment thickness & momentum thickness

```

```

for j=2:N

```

```

for i=2:s(i)

```

```

Sa(i)=( 1 - (u(i,j)/U) ) *r*dz;

```

```

Zz(i)=(u(i,j)/U)*Sa(i);

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

end      % of for j
      %find zigma of Sa(i),Zz(i)
S(j)=sum(Sa);      % displacement thickness ,S*
Z(j)=sum(Zz);      % momentum thickness , Z
end      % of for i

%find shear stress (Tw) , the skin friction coefficient (Cf)
for j=2:M-1
    Tw(j)=(R*(U^2))*((( Z(j-1)*(sin((j-1)*dz)^2)) - (Z(j+1)*(sin((j+1)*dz)^2))) / (2*dz)) + ((S(j)+(2*Z(j)))*(R*
(U^2))*(( sin((j-1)*dz)^2)-(sin((j+1)*dz)^2))/dz));
end

%find force drag & drag coefficient (per one unit lenght)
f=sum(Tw);
Fd=(f*R*dz)+(dp*2*R);
Cd=Fd/(rho*R*(U^2)*pi);

%find Renold number .Re(x)
Re=(rho*U*(2*R))/(mu);

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.3 การใช้งานโปรแกรมสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกกลม

1. ลบค่าข้อมูลเก่าโดยใช้คำสั่ง clear
2. เรียกโปรแกรมชื่อ Circular cylinder
3. หลังจากเรียกโปรแกรมแล้ว ป้อนข้อมูลการไหลตามลำดับดังนี้

3.1 Radius of cylinder (m) = R

3.2 Radial consideration range (including cylinder radius) (m) = range

3.3 Density of fluid (kg/m^3) = rho

3.4 Free stream velocity (m/s) = U - infinity

3.5 Zeta difference (%) = percent zeta

3.6 Number of Rem(i) = M

3.7 Number of Rem(j) = N

3.8 Absolute viscosity (Dynamic,poise) ($\text{N}\cdot\text{sec} / \text{m}^2$)

3.9 Error , ϵ = (m/s)

3.10 Assume value of radial velocity (m/s) = r

3.11 Assume value of zeta velocity (m/s) = Z

3.12 Error of metrix = er

4. หลังจากโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จแล้ว จะต้องป้อนคำสั่งในการแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนี้

4.1 การให้แสดงค่าความเร็วต่างๆโดยใช้คำสั่ง Vr จะแสดงค่า Vr ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

Vz จะแสดงค่า V θ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

U จะแสดงค่า U ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยโปรแกรมจะแสดงค่าออกมาเป็นช่วง ๆ โดยแกนตั้งจะเป็นค่าที่ θ ต่าง ๆ และแกนนอนจะเป็นค่าที่ r ต่าง ๆ ซึ่งจะแสดงค่าในแนวแกนตั้งออกมาทีละ 7 หลัก

ค่า V_r, V_z, U จะมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

4.2 การแสดงค่าความหนาของชั้นของไหล ($\delta\theta$) โดยใช้คำสั่ง δs โปรแกรมจะแสดงค่าความหนาของชั้นของไหลออกมาทุกตำแหน่งของค่า θ ต่าง ๆ ค่าของความหนาของชั้นของไหลมีหน่วยเป็นเมตร

4.3 การแสดงค่าระยะความหนาขจัด ($\delta^*\theta$) โดยใช้คำสั่ง s โปรแกรมจะแสดงค่าระยะความหนาขจัดออกมาทุกตำแหน่งของค่า θ ต่าง ๆ ค่าของระยะความหนาขจัดมีหน่วยเป็นเมตร

4.4 การแสดงค่าความหนาของชั้นโมเมนตัม (θ) โดยใช้คำสั่ง z โปรแกรมจะแสดงค่าความหนาของชั้นโมเมนตัมออกมาทุกตำแหน่งของค่าความหนาของชั้นโมเมนตัมต่างๆ ค่าของระยะความหนาขจัดมีหน่วยเป็นเมตร

4.5 การแสดงค่าความเค้นเฉือน (τ_w) โดยใช้คำสั่ง Tw โปรแกรมจะแสดงค่า τ_w ออกมาทุกตำแหน่งของค่า θ ต่าง ๆ ค่าของความเค้นเฉือนมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

4.6 การแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือน (C_f) โดยใช้คำสั่ง Cf โปรแกรมจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนออกมาทุกตำแหน่งของค่า θ ต่างๆ ค่าของสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือนไม่มีหน่วย

4.7 การแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด (C_D) โดยใช้คำสั่ง C_D โปรแกรมจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด สัมประสิทธิ์แรงฉุดไม่มีหน่วย

4.8 การแสดงค่าแรงฉุด (F_D) โดยใช้คำสั่ง Fd โปรแกรมจะแสดงค่าแรงฉุด ค่าของแรงฉุดมีหน่วยเป็นนิวตันต่อความยาวทรงกระบอก (N/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 การแสดงค่าของเรย์โนลด์คัมเบอร์โดยใช้คำสั่ง Re โปรแกรมจะแสดงค่า

เรย์โนลด์คัมเบอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

ผลการทดลอง

7.1 ผลการทดลองของการไหลผ่านแผ่นราบ

number of REM(i) , $M = 50$

number of REM(j) , $N = 50$

free stream velocity (m/s), $U\text{-infinity} = 1$

plate length(m) , $L = 0.3$

gamma , $r = 1$

error , $ep = 0.001$

number of REM(k) , $mx = 50$

Y-axis consideration range(m) , $range = 0.2$

Absolute viscosity (dynamic) (poise) ($N \cdot \text{Sec}/m^2$) , $\mu = 0.008$

error of matrix u , $er = 0.1$

> Tw

Tw =

Columns 1 through 7

0 225.0482 69.9806 40.1680 28.6603 4.8223 1.8706

Columns 8 through 14

0.6911 0.2447 0.0835 0.0276 0.0089 0.0028 0.0009

Columns 15 through 21

0.0003 0.0001 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

Columns 22 through 28

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

Columns 29 through 35

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0 0 0

Columns 36 through 42

0 0 0 0 0 0 0

Columns 43 through 49

0 0 0 0 0 -1.9368 -18.6824

> Cf

Cf =

Columns 1 through 7

0 0.4501 0.1400 0.0803 0.0573 0.0096 0.0037

Columns 8 through 14

0.0014 0.0005 0.0002 0.0001 0.0000 0.0000 0.0000

Columns 15 through 21

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

Columns 22 through 28

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

Columns 29 through 35

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0 0 0

Columns 36 through 42

0 0 0 0 0 0 0

Columns 43 through 49

0 0 0 0 0 -0.0039 -0.0374

> fd

fd =

2.1059

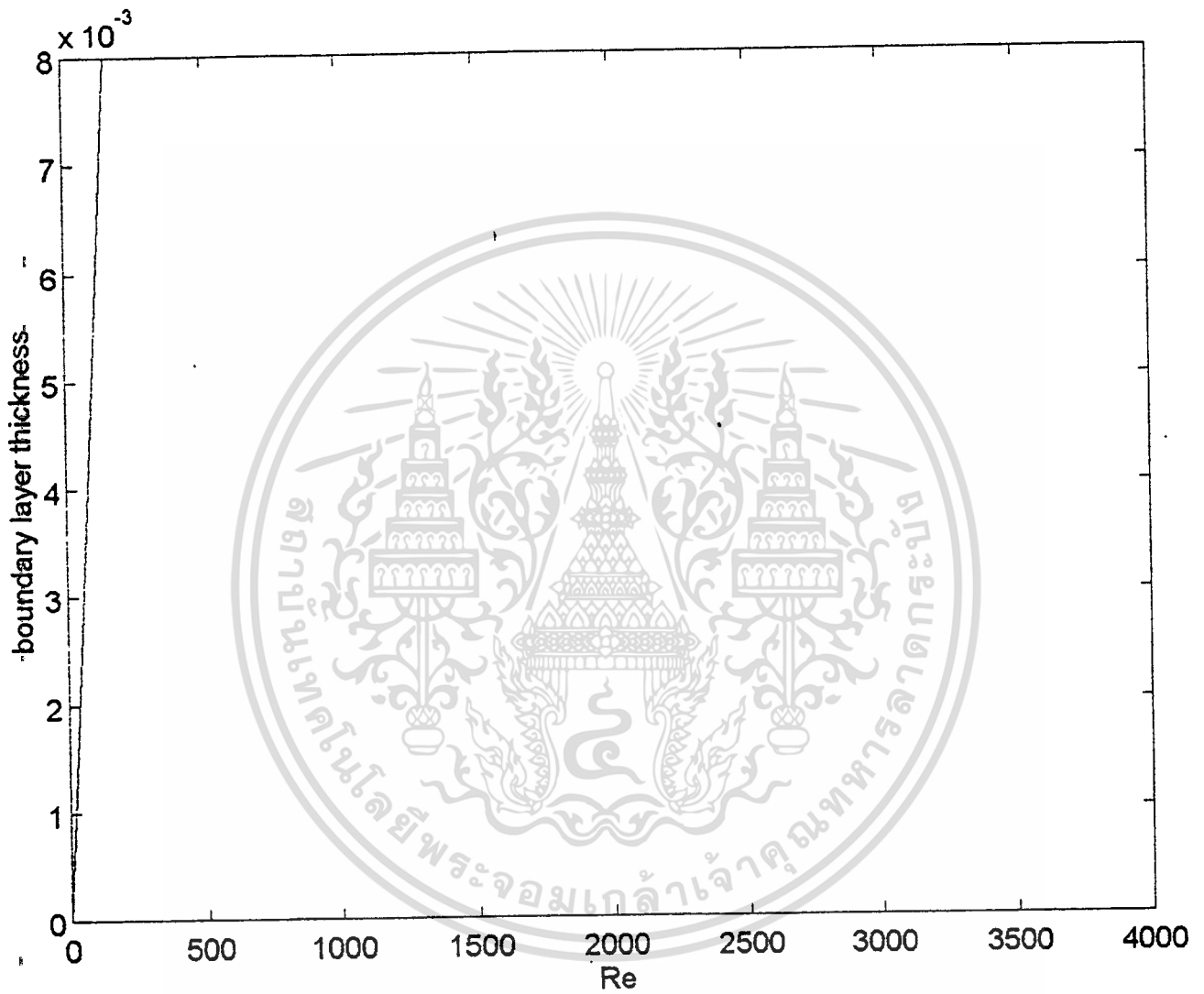
> Cd

Cd =

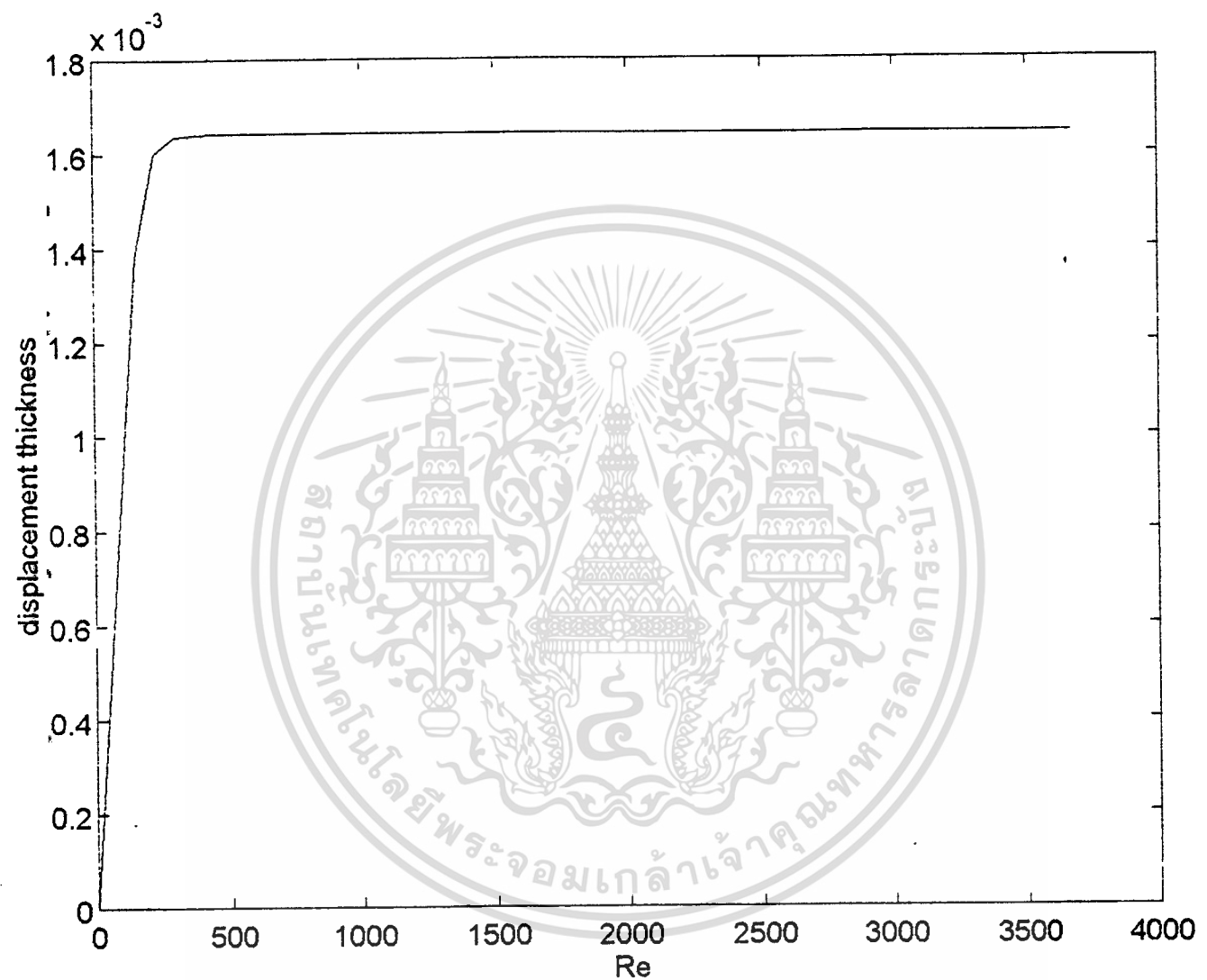
0.0140

>

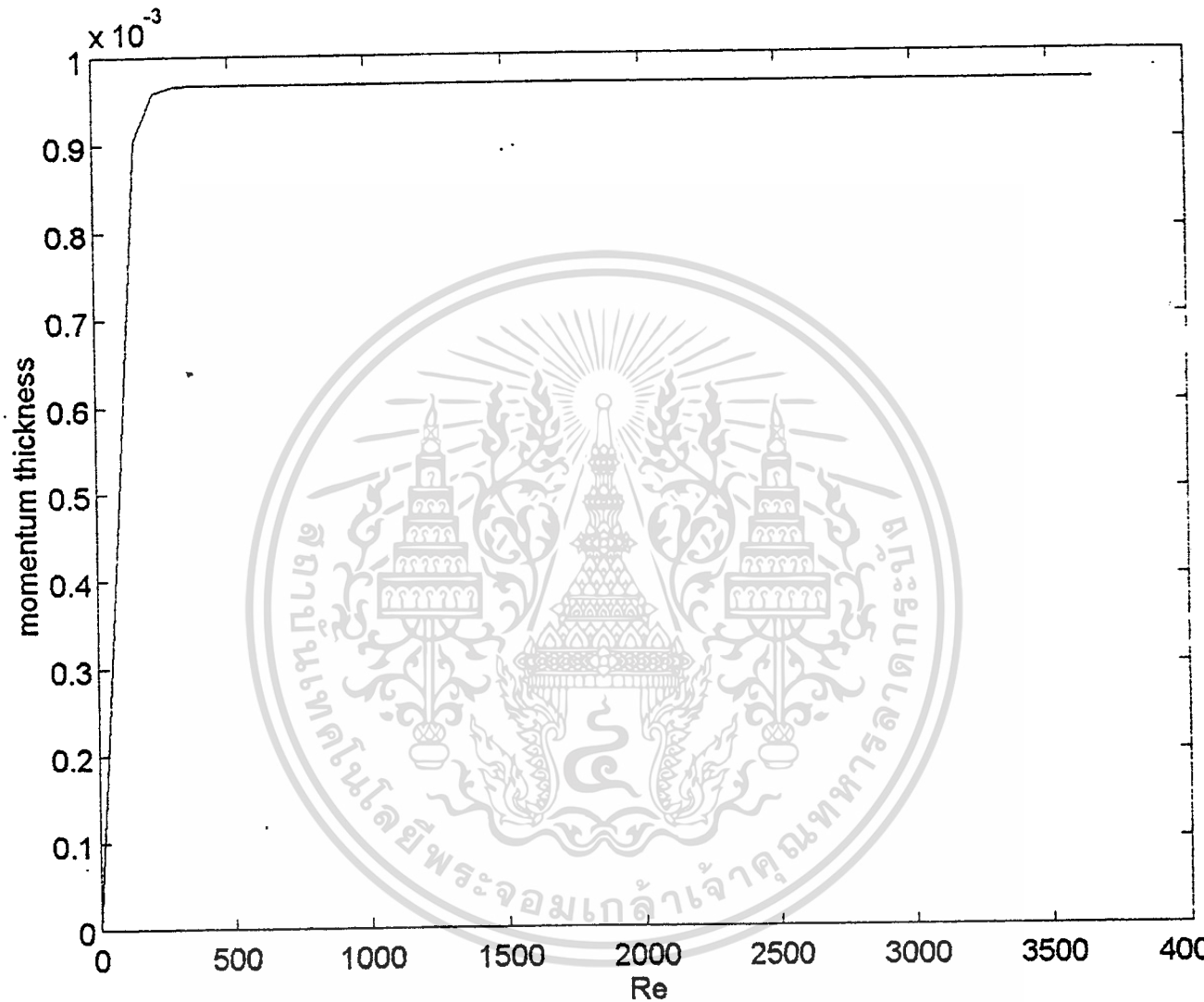
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



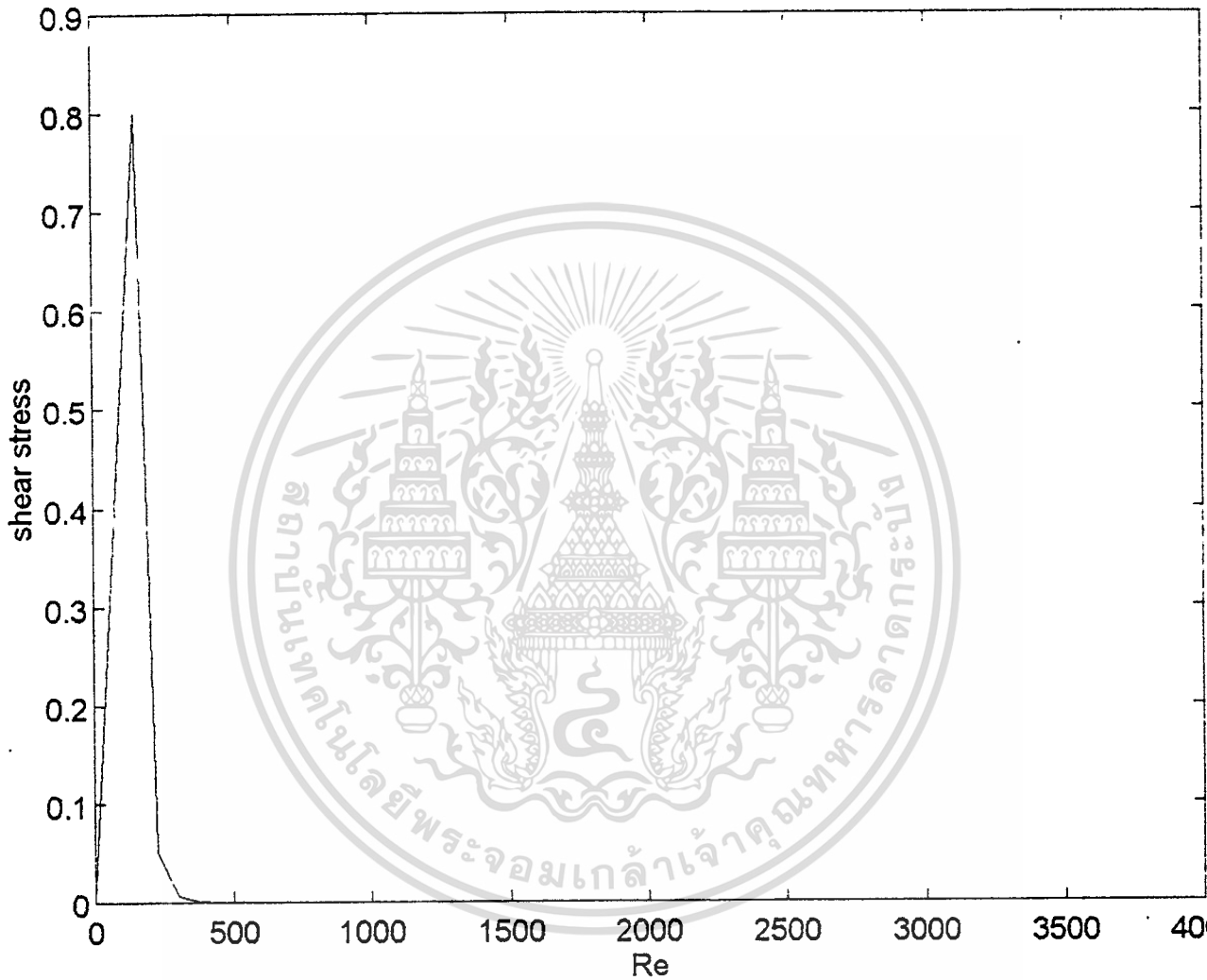
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

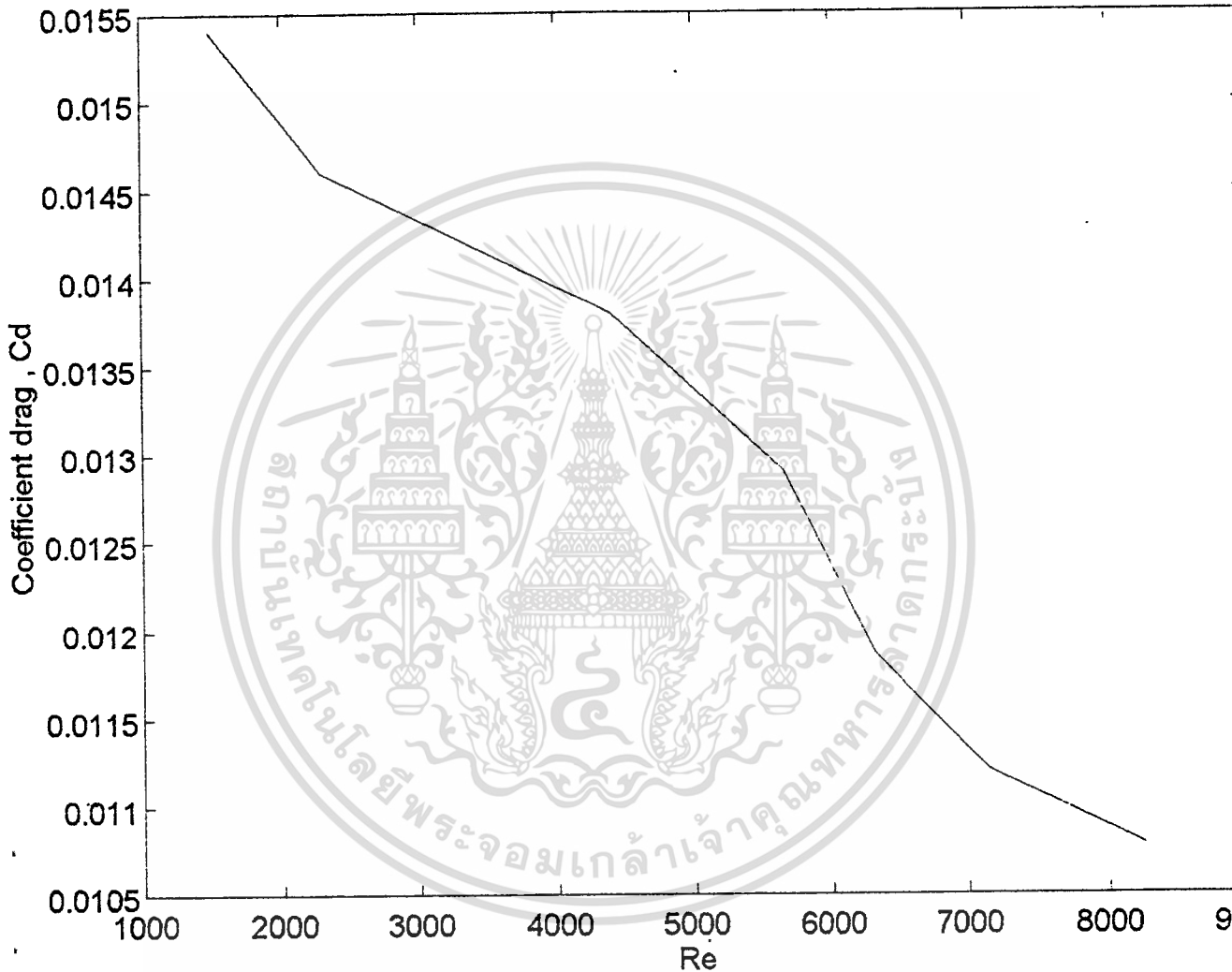


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.1 กราฟระหว่างสัมประสิทธิ์แรงกดและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับการไหลผ่านแผ่นราบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ผลการทดลองของการไหลผ่านทรงกระบอกกลม

>nn

Radius of cylinder(m) , $R = 0.03$

Radial consideration range (including cylinder radius) (m) , $range = 0.1$

Density of fluid(kg/m³) , $\rho = 1000$

Free stream velocity (m/s), $U_{\infty} = 5$

Zeta difference (percent), percent zeta = 10

number of REM(i), $M = 50$

number of REM(j), $N = 50$

Absolute viscosity (Dynamic) (poise) (N*Sec/m²) , $\mu = 0.008$

error , $\epsilon = 0.001$

number of REM(k) , $mx = 50$

error of matrix , $er = 0.1$

Difference pressure across the model , $dp = 740$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

> u

u =

Columns 1 through 7

0.0048	0.0097	0.0145	0.0193	0.0242	0.0290	0.0338
0.0053	0.0107	0.0160	0.0213	0.0266	0.0320	0.0373
0.0058	0.0116	0.0175	0.0233	0.0291	0.0349	0.0407
0.0063	0.0126	0.0189	0.0252	0.0316	0.0379	0.0442
0.0068	0.0136	0.0204	0.0272	0.0340	0.0408	0.0476
0.0073	0.0146	0.0219	0.0292	0.0365	0.0438	0.0511
0.0078	0.0156	0.0234	0.0311	0.0389	0.0467	0.0545
0.0083	0.0166	0.0248	0.0331	0.0414	0.0497	0.0580
0.0088	0.0175	0.0263	0.0351	0.0439	0.0526	0.0614
0.0093	0.0185	0.0278	0.0371	0.0463	0.0556	0.0648
0.0098	0.0195	0.0293	0.0390	0.0488	0.0585	0.0683
0.0102	0.0205	0.0307	0.0410	0.0512	0.0615	0.0717
0.0107	0.0215	0.0322	0.0430	0.0537	0.0644	0.0752
0.0112	0.0225	0.0337	0.0449	0.0562	0.0674	0.0786
0.0117	0.0234	0.0352	0.0469	0.0586	0.0703	0.0821
0.0122	0.0244	0.0366	0.0489	0.0611	0.0733	0.0855
0.0127	0.0254	0.0381	0.0508	0.0635	0.0762	0.0889
0.0132	0.0264	0.0396	0.0528	0.0660	0.0792	0.0924
0.0137	0.0274	0.0411	0.0548	0.0685	0.0821	0.0958
0.0142	0.0284	0.0426	0.0567	0.0709	0.0851	0.0993
0.0147	0.0294	0.0440	0.0587	0.0734	0.0880	0.1027
0.0152	0.0303	0.0455	0.0607	0.0758	0.0910	0.1062
0.0157	0.0313	0.0470	0.0626	0.0783	0.0939	0.1096
0.0162	0.0323	0.0485	0.0646	0.0808	0.0969	0.1130
0.0166	0.0333	0.0499	0.0666	0.0832	0.0999	0.1165
0.0171	0.0343	0.0514	0.0685	0.0857	0.1028	0.1199
0.0176	0.0353	0.0529	0.0705	0.0881	0.1058	0.1234
0.0181	0.0362	0.0544	0.0725	0.0906	0.1087	0.1268
0.0186	0.0372	0.0558	0.0744	0.0931	0.1117	0.1302
0.0191	0.0382	0.0573	0.0764	0.0955	0.1146	0.1337
0.0196	0.0392	0.0588	0.0784	0.0980	0.1175	0.1371
0.0201	0.0402	0.0603	0.0804	0.1004	0.1205	0.1406
0.0206	0.0412	0.0617	0.0823	0.1029	0.1234	0.1440
0.0211	0.0421	0.0632	0.0843	0.1053	0.1264	0.1474
0.0216	0.0431	0.0647	0.0863	0.1078	0.1293	0.1509
0.0221	0.0441	0.0662	0.0882	0.1103	0.1323	0.1543
0.0226	0.0451	0.0676	0.0902	0.1127	0.1352	0.1578
0.0230	0.0461	0.0691	0.0922	0.1152	0.1382	0.1612
0.0235	0.0471	0.0706	0.0941	0.1176	0.1411	0.1646
0.0240	0.0481	0.0721	0.0961	0.1201	0.1441	0.1681
0.0245	0.0490	0.0736	0.0981	0.1226	0.1470	0.1715
0.0250	0.0500	0.0750	0.1000	0.1250	0.1500	0.1749
0.0255	0.0510	0.0765	0.1020	0.1275	0.1529	0.1784
0.0260	0.0520	0.0780	0.1040	0.1299	0.1559	0.1818
0.0265	0.0530	0.0795	0.1059	0.1324	0.1588	0.1852
0.0270	0.0540	0.0809	0.1079	0.1348	0.1618	0.1887
0.0275	0.0549	0.0824	0.1099	0.1373	0.1647	0.1921
0.0280	0.0559	0.0839	0.1118	0.1398	0.1677	0.1956
0.0285	0.0569	0.0854	0.1138	0.1422	0.1706	0.1990
0.0289	0.0579	0.0868	0.1158	0.1447	0.1736	0.2024

Columns 8 through 14

0.0387	0.0435	0.0483	0.0532	0.0580	0.0628	0.0677
0.0426	0.0479	0.0533	0.0586	0.0639	0.0692	0.0746
0.0465	0.0524	0.0582	0.0640	0.0698	0.0756	0.0815
0.0505	0.0568	0.0631	0.0694	0.0757	0.0820	0.0883
0.0544	0.0612	0.0680	0.0748	0.0816	0.0884	0.0952
0.0584	0.0657	0.0729	0.0802	0.0875	0.0948	0.1021
0.0623	0.0701	0.0779	0.0856	0.0934	0.1012	0.1090
0.0662	0.0745	0.0828	0.0911	0.0993	0.1076	0.1159
0.0702	0.0789	0.0877	0.0965	0.1052	0.1140	0.1228
0.0741	0.0834	0.0926	0.1019	0.1111	0.1204	0.1296
0.0780	0.0878	0.0975	0.1073	0.1170	0.1268	0.1365
0.0820	0.0922	0.1025	0.1127	0.1229	0.1332	0.1434
0.0859	0.0966	0.1074	0.1181	0.1288	0.1396	0.1503
0.0898	0.1011	0.1123	0.1235	0.1347	0.1459	0.1571
0.0938	0.1055	0.1172	0.1289	0.1406	0.1523	0.1640
0.0977	0.1099	0.1221	0.1343	0.1465	0.1587	0.1709
0.1016	0.1143	0.1270	0.1397	0.1524	0.1651	0.1778
0.1056	0.1188	0.1319	0.1451	0.1583	0.1715	0.1846
0.1095	0.1232	0.1369	0.1505	0.1642	0.1779	0.1915
0.1134	0.1276	0.1418	0.1559	0.1701	0.1842	0.1984
0.1174	0.1320	0.1467	0.1613	0.1760	0.1906	0.2052
0.1213	0.1365	0.1516	0.1667	0.1819	0.1970	0.2121

0.1252	0.1409	0.1565	0.1721	0.1878	0.2034	0.2190
0.1292	0.1453	0.1614	0.1775	0.1936	0.2097	0.2258
0.1331	0.1497	0.1663	0.1829	0.1995	0.2161	0.2327
0.1370	0.1541	0.1712	0.1883	0.2054	0.2225	0.2396
0.1410	0.1586	0.1762	0.1937	0.2113	0.2289	0.2464
0.1449	0.1630	0.1811	0.1991	0.2172	0.2352	0.2533
0.1488	0.1674	0.1860	0.2045	0.2231	0.2416	0.2601
0.1528	0.1718	0.1909	0.2099	0.2289	0.2480	0.2670
0.1567	0.1762	0.1958	0.2153	0.2348	0.2543	0.2738
0.1606	0.1807	0.2007	0.2207	0.2407	0.2607	0.2807
0.1645	0.1851	0.2056	0.2261	0.2466	0.2670	0.2875
0.1685	0.1895	0.2105	0.2315	0.2525	0.2734	0.2943
0.1724	0.1939	0.2154	0.2369	0.2583	0.2798	0.3012
0.1763	0.1983	0.2203	0.2423	0.2642	0.2861	0.3080
0.1803	0.2027	0.2252	0.2476	0.2701	0.2925	0.3148
0.1842	0.2071	0.2301	0.2530	0.2759	0.2988	0.3217
0.1881	0.2116	0.2350	0.2584	0.2818	0.3052	0.3285
0.1920	0.2160	0.2399	0.2638	0.2877	0.3115	0.3353
0.1960	0.2204	0.2448	0.2692	0.2935	0.3179	0.3422
0.1999	0.2248	0.2497	0.2746	0.2994	0.3242	0.3490
0.2038	0.2292	0.2546	0.2799	0.3053	0.3305	0.3558
0.2077	0.2336	0.2595	0.2853	0.3111	0.3369	0.3626
0.2116	0.2380	0.2644	0.2907	0.3170	0.3432	0.3694
0.2156	0.2424	0.2693	0.2961	0.3228	0.3495	0.3762
0.2195	0.2468	0.2742	0.3014	0.3287	0.3559	0.3830
0.2234	0.2512	0.2790	0.3068	0.3345	0.3622	0.3898
0.2273	0.2556	0.2839	0.3122	0.3404	0.3685	0.3966
0.2313	0.2601	0.2888	0.3175	0.3462	0.3749	0.4034

Columns 15 through 21

0.0725	0.0773	0.0822	0.0870	0.0918	0.0967	0.1015
0.0799	0.0852	0.0905	0.0959	0.1012	0.1065	0.1118
0.0873	0.0931	0.0989	0.1047	0.1105	0.1163	0.1221
0.0946	0.1009	0.1073	0.1136	0.1199	0.1262	0.1325
0.1020	0.1088	0.1156	0.1224	0.1292	0.1360	0.1428
0.1094	0.1167	0.1240	0.1313	0.1385	0.1458	0.1531
0.1168	0.1245	0.1323	0.1401	0.1479	0.1556	0.1634
0.1241	0.1324	0.1407	0.1489	0.1572	0.1655	0.1737
0.1315	0.1403	0.1490	0.1578	0.1665	0.1753	0.1840
0.1389	0.1481	0.1574	0.1666	0.1759	0.1851	0.1943
0.1463	0.1560	0.1657	0.1755	0.1852	0.1949	0.2046
0.1536	0.1638	0.1741	0.1843	0.1945	0.2047	0.2149
0.1610	0.1717	0.1824	0.1931	0.2038	0.2145	0.2252
0.1684	0.1796	0.1908	0.2020	0.2131	0.2243	0.2355
0.1757	0.1874	0.1991	0.2108	0.2225	0.2341	0.2458
0.1831	0.1953	0.2074	0.2196	0.2318	0.2439	0.2561
0.1904	0.2031	0.2158	0.2284	0.2411	0.2537	0.2664
0.1978	0.2110	0.2241	0.2372	0.2504	0.2635	0.2766
0.2052	0.2188	0.2324	0.2461	0.2597	0.2733	0.2869
0.2125	0.2266	0.2408	0.2549	0.2690	0.2831	0.2972
0.2199	0.2345	0.2491	0.2637	0.2783	0.2928	0.3074
0.2272	0.2423	0.2574	0.2725	0.2876	0.3026	0.3177
0.2346	0.2502	0.2657	0.2813	0.2968	0.3124	0.3279
0.2419	0.2580	0.2740	0.2901	0.3061	0.3221	0.3381
0.2493	0.2658	0.2824	0.2989	0.3154	0.3319	0.3484
0.2566	0.2736	0.2907	0.3077	0.3247	0.3416	0.3586
0.2639	0.2815	0.2990	0.3165	0.3339	0.3514	0.3688
0.2713	0.2893	0.3073	0.3252	0.3432	0.3611	0.3790
0.2786	0.2971	0.3156	0.3340	0.3524	0.3708	0.3892
0.2859	0.3049	0.3239	0.3428	0.3617	0.3806	0.3994
0.2933	0.3127	0.3321	0.3516	0.3709	0.3903	0.4096
0.3006	0.3205	0.3404	0.3603	0.3802	0.4000	0.4198
0.3079	0.3283	0.3487	0.3691	0.3894	0.4097	0.4300
0.3152	0.3361	0.3570	0.3778	0.3986	0.4194	0.4401
0.3226	0.3439	0.3653	0.3866	0.4078	0.4291	0.4503
0.3299	0.3517	0.3735	0.3953	0.4171	0.4388	0.4605
0.3372	0.3595	0.3818	0.4041	0.4263	0.4485	0.4706
0.3445	0.3673	0.3901	0.4128	0.4355	0.4581	0.4807
0.3518	0.3751	0.3983	0.4215	0.4447	0.4678	0.4909
0.3591	0.3829	0.4066	0.4302	0.4539	0.4774	0.5010
0.3664	0.3906	0.4148	0.4389	0.4630	0.4871	0.5111
0.3737	0.3984	0.4231	0.4477	0.4722	0.4967	0.5212
0.3810	0.4062	0.4313	0.4564	0.4814	0.5063	0.5313
0.3883	0.4139	0.4395	0.4651	0.4905	0.5160	0.5413
0.3956	0.4217	0.4477	0.4737	0.4997	0.5256	0.5514
0.4029	0.4294	0.4560	0.4824	0.5088	0.5352	0.5615
0.4101	0.4372	0.4642	0.4911	0.5180	0.5448	0.5715
0.4174	0.4449	0.4724	0.4998	0.5271	0.5544	0.5815
0.4247	0.4527	0.4806	0.5084	0.5362	0.5639	0.5916

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
 ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

0.1063	0.1112	0.1160	0.1208	0.1256	0.1305	0.1353
0.1171	0.1225	0.1278	0.1331	0.1384	0.1437	0.1491
0.1280	0.1338	0.1396	0.1454	0.1512	0.1570	0.1628
0.1388	0.1451	0.1514	0.1577	0.1640	0.1703	0.1766
0.1496	0.1564	0.1632	0.1699	0.1767	0.1835	0.1903
0.1604	0.1677	0.1749	0.1822	0.1895	0.1968	0.2040
0.1712	0.1790	0.1867	0.1945	0.2022	0.2100	0.2178
0.1820	0.1902	0.1985	0.2067	0.2150	0.2232	0.2315
0.1928	0.2015	0.2103	0.2190	0.2277	0.2365	0.2452
0.2036	0.2128	0.2220	0.2313	0.2405	0.2497	0.2589
0.2144	0.2241	0.2338	0.2435	0.2532	0.2629	0.2726
0.2251	0.2353	0.2455	0.2557	0.2659	0.2761	0.2863
0.2359	0.2466	0.2573	0.2680	0.2786	0.2893	0.3000
0.2467	0.2579	0.2690	0.2802	0.2913	0.3025	0.3136
0.2575	0.2691	0.2808	0.2924	0.3040	0.3157	0.3273
0.2682	0.2804	0.2925	0.3046	0.3167	0.3288	0.3409
0.2790	0.2916	0.3042	0.3168	0.3294	0.3420	0.3546
0.2897	0.3028	0.3159	0.3290	0.3421	0.3552	0.3682
0.3005	0.3141	0.3276	0.3412	0.3548	0.3683	0.3818
0.3112	0.3253	0.3393	0.3534	0.3674	0.3814	0.3954
0.3220	0.3365	0.3510	0.3656	0.3801	0.3945	0.4090
0.3327	0.3477	0.3627	0.3777	0.3927	0.4076	0.4226
0.3434	0.3589	0.3744	0.3899	0.4053	0.4207	0.4362
0.3541	0.3701	0.3861	0.4020	0.4179	0.4338	0.4497
0.3648	0.3813	0.3977	0.4141	0.4305	0.4469	0.4632
0.3755	0.3925	0.4094	0.4262	0.4431	0.4599	0.4768
0.3862	0.4036	0.4210	0.4383	0.4557	0.4730	0.4903
0.3969	0.4148	0.4326	0.4504	0.4682	0.4860	0.5037
0.4076	0.4259	0.4442	0.4625	0.4808	0.4990	0.5172
0.4183	0.4371	0.4558	0.4746	0.4933	0.5120	0.5307
0.4289	0.4482	0.4674	0.4867	0.5058	0.5250	0.5441
0.4396	0.4593	0.4790	0.4987	0.5183	0.5379	0.5575
0.4502	0.4704	0.4906	0.5107	0.5308	0.5509	0.5709
0.4609	0.4815	0.5022	0.5228	0.5433	0.5638	0.5843
0.4715	0.4926	0.5137	0.5348	0.5558	0.5767	0.5976
0.4821	0.5037	0.5252	0.5467	0.5682	0.5896	0.6110
0.4927	0.5148	0.5368	0.5587	0.5806	0.6025	0.6243
0.5033	0.5258	0.5483	0.5707	0.5930	0.6154	0.6376
0.5139	0.5368	0.5598	0.5826	0.6054	0.6282	0.6509
0.5244	0.5479	0.5712	0.5946	0.6178	0.6410	0.6641
0.5350	0.5589	0.5827	0.6065	0.6302	0.6538	0.6774
0.5456	0.5699	0.5942	0.6184	0.6425	0.6666	0.6906
0.5561	0.5809	0.6056	0.6303	0.6548	0.6793	0.7038
0.5666	0.5919	0.6170	0.6421	0.6671	0.6921	0.7169
0.5772	0.6028	0.6284	0.6540	0.6794	0.7048	0.7301
0.5877	0.6138	0.6398	0.6658	0.6917	0.7175	0.7432
0.5982	0.6247	0.6512	0.6776	0.7039	0.7301	0.7562
0.6086	0.6357	0.6626	0.6894	0.7161	0.7428	0.7693
0.6191	0.6466	0.6739	0.7012	0.7283	0.7554	0.7823
0.6296	0.6575	0.6852	0.7129	0.7405	0.7680	0.7953

Columns 29 through 35

0.1401	0.1450	0.1498	0.1546	0.1594	0.1643	0.1691
0.1544	0.1597	0.1650	0.1703	0.1756	0.1809	0.1863
0.1686	0.1744	0.1802	0.1860	0.1918	0.1976	0.2034
0.1829	0.1891	0.1954	0.2017	0.2080	0.2143	0.2206
0.1971	0.2039	0.2106	0.2174	0.2242	0.2310	0.2377
0.2113	0.2186	0.2258	0.2331	0.2404	0.2476	0.2549
0.2255	0.2333	0.2410	0.2488	0.2565	0.2643	0.2720
0.2397	0.2480	0.2562	0.2644	0.2727	0.2809	0.2891
0.2539	0.2626	0.2714	0.2801	0.2888	0.2975	0.3062
0.2681	0.2773	0.2865	0.2957	0.3049	0.3141	0.3233
0.2823	0.2920	0.3017	0.3113	0.3210	0.3307	0.3403
0.2965	0.3066	0.3168	0.3270	0.3371	0.3473	0.3574
0.3106	0.3213	0.3319	0.3426	0.3532	0.3638	0.3744
0.3248	0.3359	0.3470	0.3581	0.3692	0.3803	0.3914
0.3389	0.3505	0.3621	0.3737	0.3853	0.3969	0.4084
0.3530	0.3651	0.3772	0.3893	0.4013	0.4134	0.4254
0.3672	0.3797	0.3923	0.4048	0.4173	0.4298	0.4423
0.3813	0.3943	0.4073	0.4203	0.4333	0.4463	0.4593
0.3953	0.4088	0.4223	0.4358	0.4493	0.4627	0.4762
0.4094	0.4234	0.4374	0.4513	0.4652	0.4791	0.4930
0.4235	0.4379	0.4523	0.4668	0.4812	0.4955	0.5099
0.4375	0.4524	0.4673	0.4822	0.4971	0.5119	0.5267
0.4516	0.4669	0.4823	0.4976	0.5129	0.5282	0.5435
0.4656	0.4814	0.4972	0.5130	0.5288	0.5445	0.5603
0.4796	0.4959	0.5121	0.5284	0.5446	0.5608	0.5770

0.4935	0.5103	0.5270	0.5438	0.5604	0.5771	0.5937
0.5075	0.5247	0.5419	0.5591	0.5762	0.5933	0.6104
0.5215	0.5391	0.5568	0.5744	0.5920	0.6095	0.6270
0.5354	0.5535	0.5716	0.5897	0.6077	0.6257	0.6437
0.5493	0.5679	0.5864	0.6049	0.6234	0.6418	0.6602
0.5632	0.5822	0.6012	0.6202	0.6391	0.6580	0.6768
0.5770	0.5965	0.6160	0.6354	0.6547	0.6740	0.6933
0.5909	0.6108	0.6307	0.6505	0.6703	0.6901	0.7098
0.6047	0.6251	0.6454	0.6657	0.6859	0.7061	0.7262
0.6185	0.6393	0.6601	0.6808	0.7015	0.7221	0.7426
0.6323	0.6536	0.6748	0.6959	0.7170	0.7380	0.7589
0.6461	0.6677	0.6894	0.7109	0.7325	0.7539	0.7753
0.6598	0.6819	0.7040	0.7260	0.7479	0.7697	0.7915
0.6735	0.6961	0.7185	0.7410	0.7633	0.7856	0.8077
0.6872	0.7102	0.7331	0.7559	0.7787	0.8013	0.8239
0.7009	0.7243	0.7476	0.7708	0.7940	0.8171	0.8401
0.7145	0.7383	0.7621	0.7857	0.8093	0.8328	0.8562
0.7281	0.7523	0.7765	0.8006	0.8246	0.8484	0.8722
0.7417	0.7663	0.7909	0.8154	0.8398	0.8640	0.8882
0.7552	0.7803	0.8053	0.8302	0.8549	0.8796	0.9041
0.7688	0.7943	0.8196	0.8449	0.8701	0.8951	0.9200
0.7823	0.8082	0.8339	0.8596	0.8852	0.9106	0.9359
0.7957	0.8220	0.8482	0.8743	0.9002	0.9260	0.9517
0.8092	0.8359	0.8625	0.8889	0.9152	0.9414	0.9674
0.8226	0.8497	0.8766	0.9035	0.9302	0.9567	0.9831

Columns 36 through 42

0.1739	0.1787	0.1835	0.1884	0.1932	0.1980	0.2028
0.1916	0.1969	0.2022	0.2075	0.2128	0.2181	0.2234
0.2092	0.2150	0.2208	0.2266	0.2324	0.2382	0.2440
0.2269	0.2332	0.2394	0.2457	0.2520	0.2583	0.2645
0.2445	0.2513	0.2580	0.2648	0.2716	0.2783	0.2851
0.2621	0.2694	0.2766	0.2839	0.2911	0.2984	0.3056
0.2797	0.2875	0.2952	0.3029	0.3107	0.3184	0.3261
0.2973	0.3055	0.3138	0.3220	0.3302	0.3384	0.3466
0.3149	0.3236	0.3323	0.3410	0.3497	0.3583	0.3670
0.3325	0.3416	0.3508	0.3600	0.3691	0.3783	0.3874
0.3500	0.3597	0.3693	0.3789	0.3886	0.3982	0.4078
0.3675	0.3777	0.3878	0.3979	0.4080	0.4181	0.4282
0.3850	0.3956	0.4062	0.4168	0.4274	0.4380	0.4485
0.4025	0.4136	0.4246	0.4357	0.4467	0.4578	0.4688
0.4200	0.4315	0.4430	0.4546	0.4661	0.4776	0.4891
0.4374	0.4494	0.4614	0.4734	0.4854	0.4973	0.5093
0.4548	0.4673	0.4798	0.4922	0.5046	0.5171	0.5295
0.4722	0.4852	0.4981	0.5110	0.5239	0.5368	0.5496
0.4896	0.5030	0.5164	0.5297	0.5431	0.5564	0.5697
0.5069	0.5208	0.5346	0.5484	0.5622	0.5760	0.5898
0.5242	0.5385	0.5528	0.5671	0.5814	0.5956	0.6098
0.5415	0.5563	0.5710	0.5858	0.6005	0.6151	0.6298
0.5588	0.5740	0.5892	0.6043	0.6195	0.6346	0.6497
0.5760	0.5916	0.6073	0.6229	0.6385	0.6541	0.6696
0.5932	0.6093	0.6254	0.6414	0.6575	0.6734	0.6894
0.6103	0.6269	0.6434	0.6599	0.6764	0.6928	0.7092
0.6274	0.6444	0.6614	0.6783	0.6952	0.7121	0.7289
0.6445	0.6620	0.6794	0.6967	0.7140	0.7313	0.7486
0.6616	0.6794	0.6973	0.7151	0.7328	0.7505	0.7682
0.6786	0.6969	0.7151	0.7334	0.7515	0.7696	0.7877
0.6956	0.7143	0.7330	0.7516	0.7702	0.7887	0.8072
0.7125	0.7317	0.7508	0.7698	0.7888	0.8077	0.8266
0.7294	0.7490	0.7685	0.7879	0.8073	0.8267	0.8459
0.7462	0.7662	0.7862	0.8060	0.8258	0.8456	0.8652
0.7631	0.7835	0.8038	0.8241	0.8443	0.8644	0.8844
0.7798	0.8006	0.8214	0.8420	0.8626	0.8832	0.9036
0.7965	0.8178	0.8389	0.8600	0.8809	0.9018	0.9227
0.8132	0.8348	0.8564	0.8778	0.8992	0.9205	0.9417
0.8299	0.8519	0.8738	0.8956	0.9174	0.9390	0.9606
0.8464	0.8688	0.8912	0.9134	0.9355	0.9575	0.9794
0.8630	0.8858	0.9085	0.9310	0.9535	0.9759	0.9982
0.8794	0.9026	0.9257	0.9487	0.9715	0.9942	1.0168
0.8959	0.9194	0.9429	0.9662	0.9894	1.0125	1.0354
0.9122	0.9362	0.9600	0.9837	1.0072	1.0307	1.0539
0.9286	0.9529	0.9770	1.0011	1.0250	1.0487	1.0724
0.9448	0.9695	0.9940	1.0184	1.0427	1.0668	1.0907
0.9610	0.9861	1.0109	1.0357	1.0603	1.0847	1.1089
0.9772	1.0026	1.0278	1.0529	1.0778	1.1025	1.1271
0.9933	1.0190	1.0446	1.0700	1.0952	1.1202	1.1451
1.0093	1.0354	1.0613	1.0870	1.1125	1.1379	1.1630

Columns 43 through 49

0.2076	0.2125	0.2173	0.2221	0.2269	0.2317	0.2365
0.2287	0.2340	0.2393	0.2446	0.2499	0.2552	0.2605
0.2498	0.2556	0.2613	0.2671	0.2729	0.2787	0.2845
0.2708	0.2771	0.2834	0.2896	0.2959	0.3022	0.3084
0.2918	0.2986	0.3053	0.3121	0.3188	0.3256	0.3323
0.3128	0.3201	0.3273	0.3345	0.3418	0.3490	0.3562
0.3338	0.3415	0.3492	0.3569	0.3646	0.3723	0.3800
0.3548	0.3629	0.3711	0.3793	0.3875	0.3957	0.4038
0.3757	0.3843	0.3930	0.4017	0.4103	0.4189	0.4276
0.3966	0.4057	0.4148	0.4240	0.4331	0.4422	0.4513
0.4174	0.4270	0.4366	0.4462	0.4558	0.4654	0.4750
0.4383	0.4483	0.4584	0.4685	0.4785	0.4886	0.4986
0.4591	0.4696	0.4801	0.4907	0.5012	0.5117	0.5222
0.4798	0.4908	0.5018	0.5128	0.5238	0.5347	0.5457
0.5005	0.5120	0.5235	0.5349	0.5463	0.5577	0.5691
0.5212	0.5331	0.5451	0.5570	0.5688	0.5807	0.5925
0.5419	0.5542	0.5666	0.5790	0.5913	0.6036	0.6159
0.5625	0.5753	0.5881	0.6009	0.6137	0.6264	0.6392
0.5830	0.5963	0.6096	0.6228	0.6360	0.6492	0.6624
0.6035	0.6173	0.6310	0.6446	0.6583	0.6719	0.6855
0.6240	0.6382	0.6523	0.6664	0.6805	0.6946	0.7086
0.6444	0.6590	0.6736	0.6881	0.7027	0.7171	0.7316
0.6648	0.6798	0.6948	0.7098	0.7247	0.7396	0.7545
0.6851	0.7005	0.7160	0.7314	0.7467	0.7621	0.7774
0.7053	0.7212	0.7371	0.7529	0.7687	0.7844	0.8001
0.7255	0.7418	0.7581	0.7743	0.7905	0.8067	0.8228
0.7457	0.7624	0.7791	0.7957	0.8123	0.8289	0.8454
0.7657	0.7829	0.8000	0.8170	0.8340	0.8510	0.8679
0.7858	0.8033	0.8208	0.8383	0.8556	0.8730	0.8903
0.8057	0.8237	0.8416	0.8594	0.8772	0.8949	0.9126
0.8256	0.8439	0.8622	0.8805	0.8986	0.9167	0.9348
0.8454	0.8641	0.8828	0.9014	0.9200	0.9385	0.9569
0.8651	0.8843	0.9033	0.9223	0.9413	0.9601	0.9789
0.8848	0.9043	0.9238	0.9431	0.9624	0.9816	1.0007
0.9044	0.9243	0.9441	0.9638	0.9835	1.0030	1.0225
0.9239	0.9442	0.9644	0.9845	1.0045	1.0244	1.0442
0.9434	0.9640	0.9845	1.0050	1.0253	1.0456	1.0657
0.9627	0.9837	1.0046	1.0254	1.0461	1.0666	1.0871
0.9820	1.0034	1.0246	1.0457	1.0667	1.0876	1.1084
1.0012	1.0229	1.0445	1.0659	1.0873	1.1085	1.1295
1.0203	1.0423	1.0642	1.0860	1.1077	1.1292	1.1506
1.0393	1.0617	1.0839	1.1060	1.1280	1.1498	1.1715
1.0583	1.0809	1.1035	1.1259	1.1481	1.1703	1.1922
1.0771	1.1001	1.1230	1.1457	1.1682	1.1906	1.2128
1.0958	1.1191	1.1423	1.1653	1.1881	1.2108	1.2333
1.1145	1.1381	1.1615	1.1848	1.2079	1.2308	1.2536
1.1330	1.1569	1.1807	1.2042	1.2276	1.2507	1.2737
1.1514	1.1756	1.1997	1.2235	1.2471	1.2705	1.2937
1.1698	1.1943	1.2185	1.2426	1.2665	1.2901	1.3135
1.1880	1.2128	1.2373	1.2616	1.2857	1.3096	1.3332

Column 50

0.2413
0.2658
0.2903
0.3147
0.3391
0.3634
0.3877
0.4120
0.4362
0.4604
0.4845
0.5086
0.5326
0.5566
0.5805
0.6044
0.6282
0.6519
0.6755
0.6991
0.7226
0.7460
0.7694
0.7926
0.8158
0.8389
0.8618

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ทุกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

--more--

0.8847
 0.9075
 0.9302
 0.9527
 0.9752
 0.9975
 1.0198
 1.0419
 1.0639
 1.0857
 1.1074
 1.1290
 1.1505
 1.1718
 1.1930
 1.2140
 1.2348
 1.2556
 1.2761
 1.2965
 1.3167
 1.3367
 1.3566

»
 »
 »
 »
 »
 »
 »
 »
 »
 »



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

» Tw

Tw =

1.0e+003 *

Columns 1 through 7

0	0.0365	0.0895	0.1730	0.2897	0.4411	0.6269
---	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 8 through 14

0.8443	1.0885	1.3525	1.6273	1.9023	2.1657	2.4050
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 15 through 21

2.6077	2.7619	2.8569	2.8836	2.8354	2.7086	2.5024
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 22 through 28

2.2192	1.8648	1.4483	0.9814	0.4783	0.0449	0.5710
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 29 through 35

1.0824	1.5619	1.9933	2.3624	2.6576	2.8702	2.9953
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 36 through 42

3.0314	2.9811	2.8506	2.6495	2.3903	2.0879	1.7587
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 43 through 49

1.4198	1.0884	0.7806	0.5108	0.2908	0.1296	0.0321
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

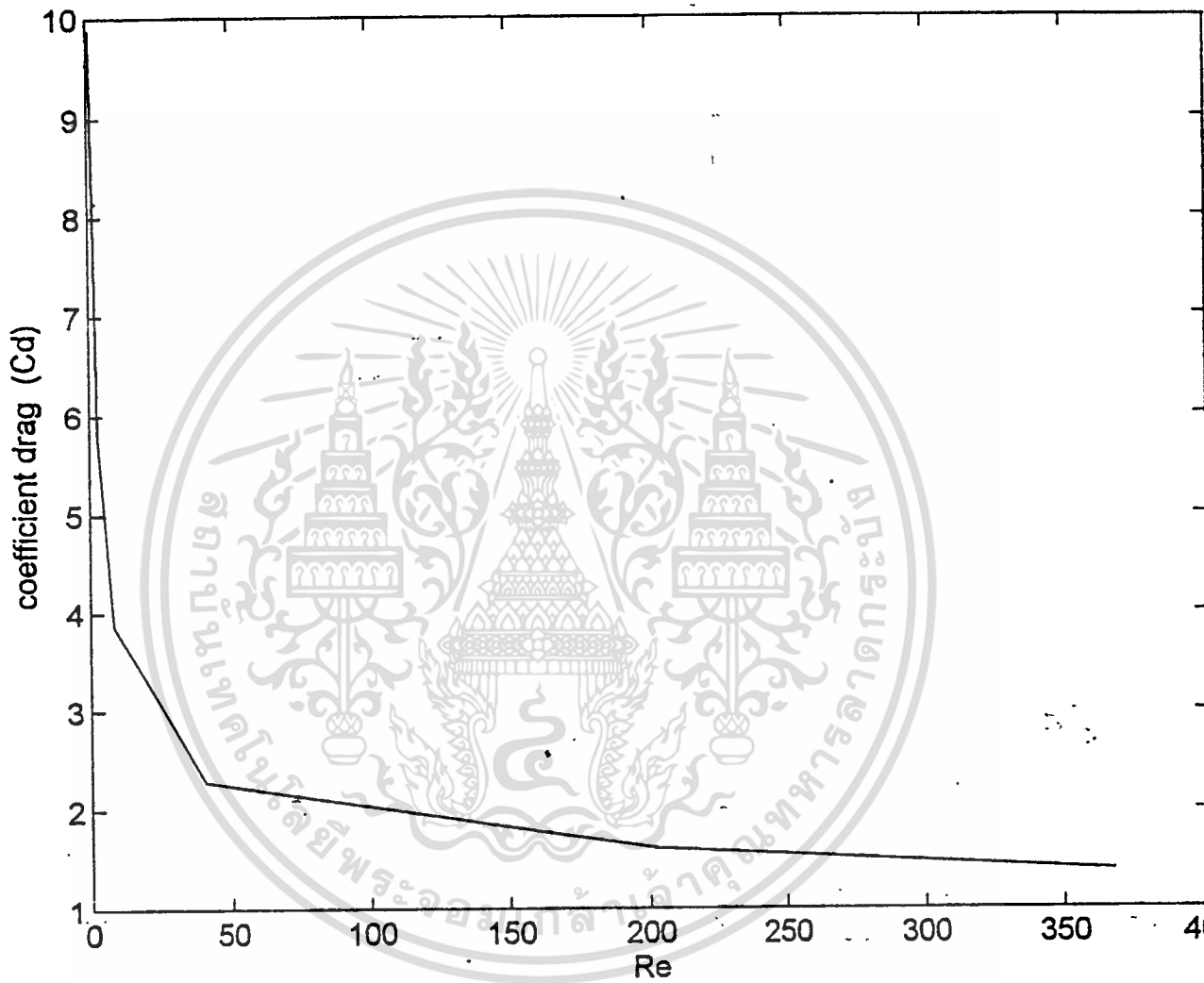
» Cd

Cd =

0.9589

»

7.2. กราฟระหว่างสัมประสิทธิ์แรงกดและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับการไหลผ่านทรงกระบอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 ภาพที่ได้จากการทดลองการไหลผ่านแผ่นราบ



รูปที่ 7.1 ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 1



รูปที่ 7.2 ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.3 ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 3

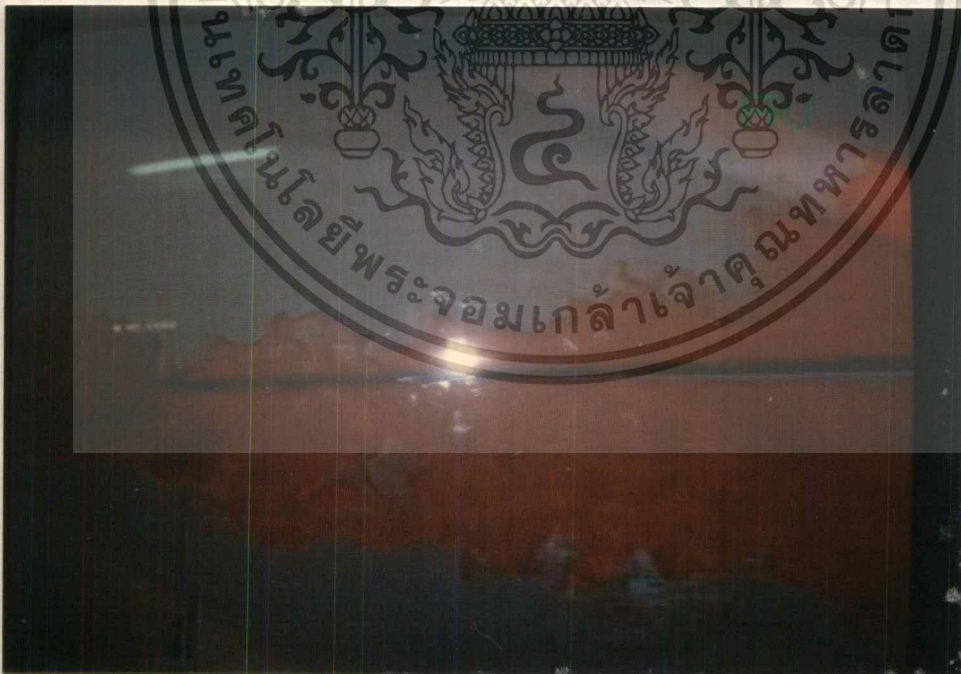


รูปที่ 7.4 ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



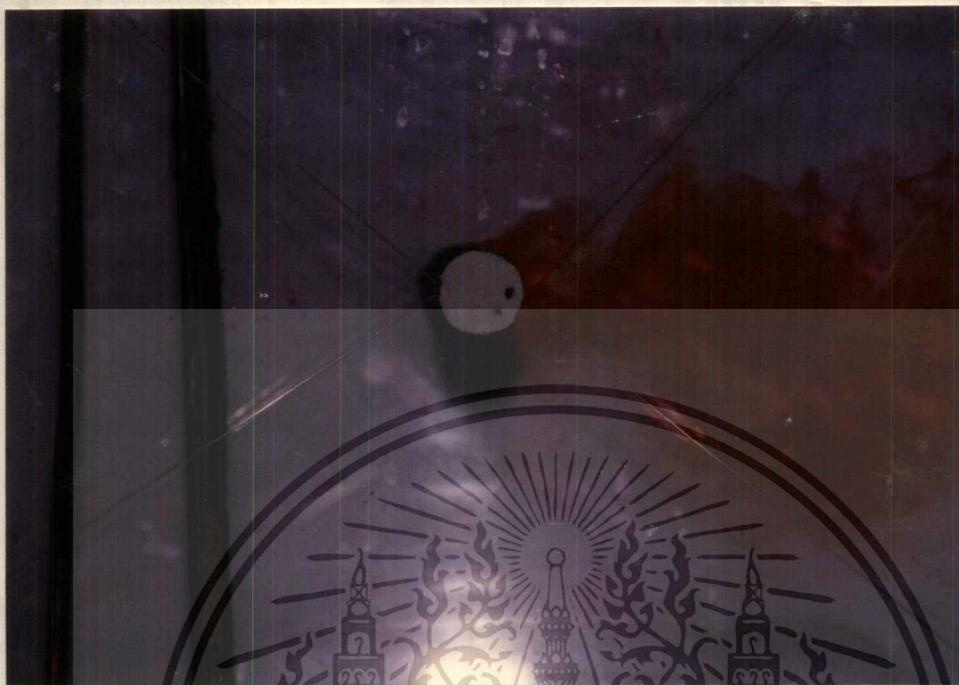
รูปที่ 7.5 ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 5



รูปที่ 7.6 ภาพแสดงการไหลผ่านแผ่นราบในการทดลองครั้งที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 ภาพที่ได้จากการทดลองการไหลผ่านทรงกระบอกกลม

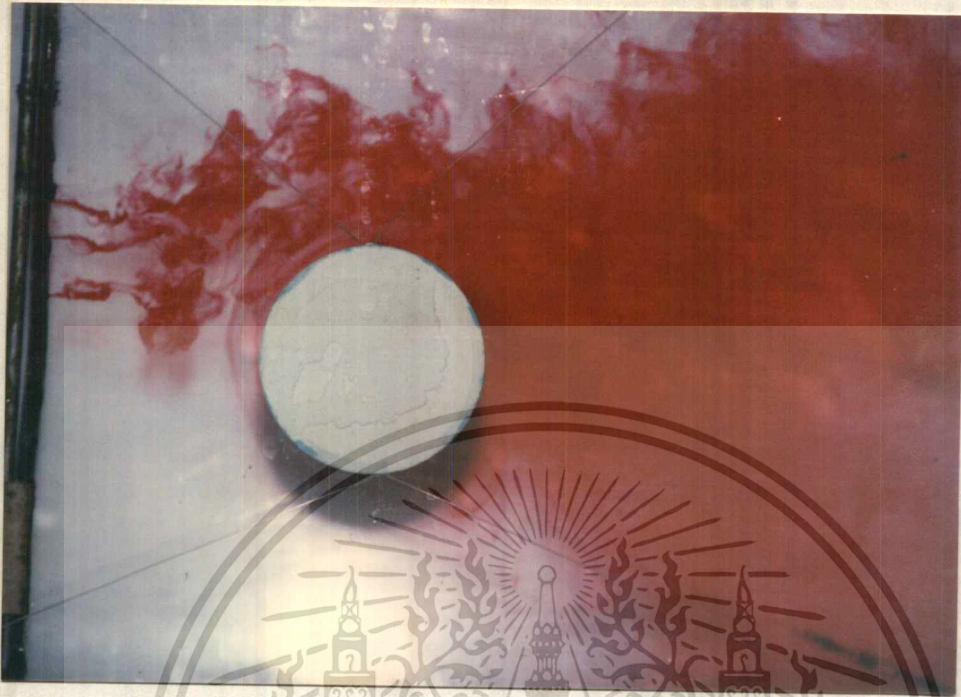


รูปที่ 7.7 ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกกลมในการทดลองครั้งที่ 1

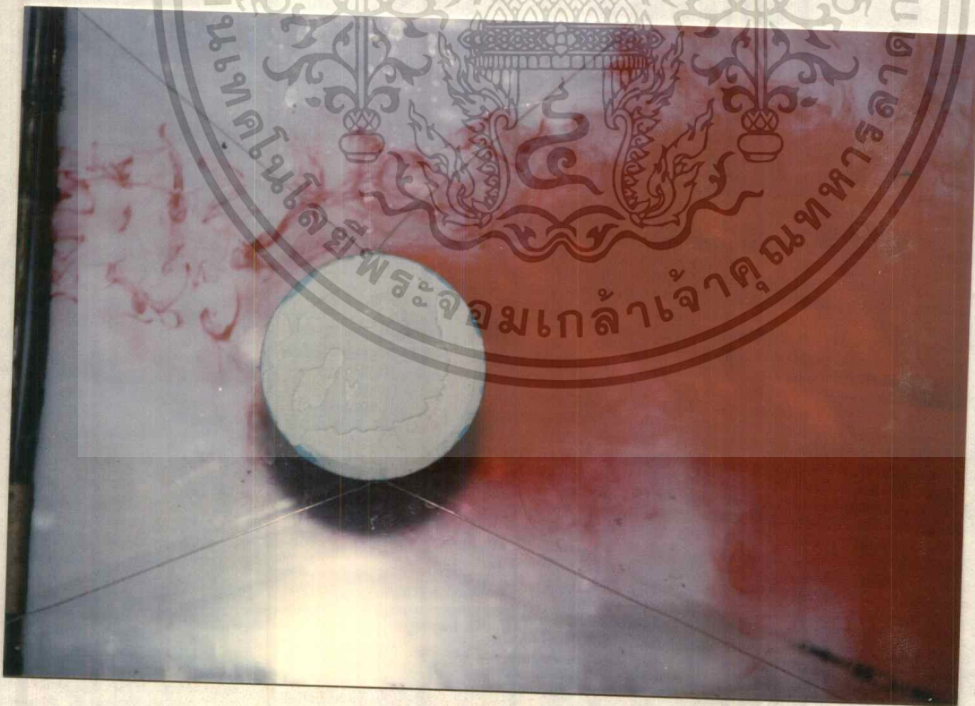


รูปที่ 7.8 ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกกลมในการทดลองครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.9 ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกกลมในการทดลองครั้งที่ 3

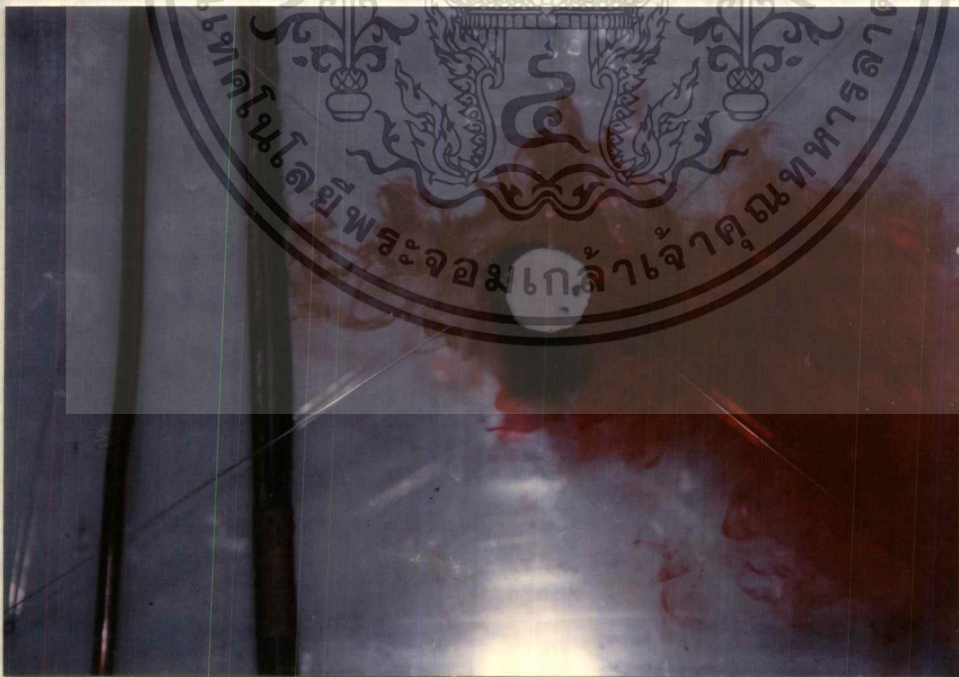


รูปที่ 7.10 ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกกลมในการทดลองครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.11 ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกกลมในการทดลองครั้งที่ 5



รูปที่ 7.12 ภาพแสดงการไหลผ่านทรงกระบอกกลมในการทดลองครั้งที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

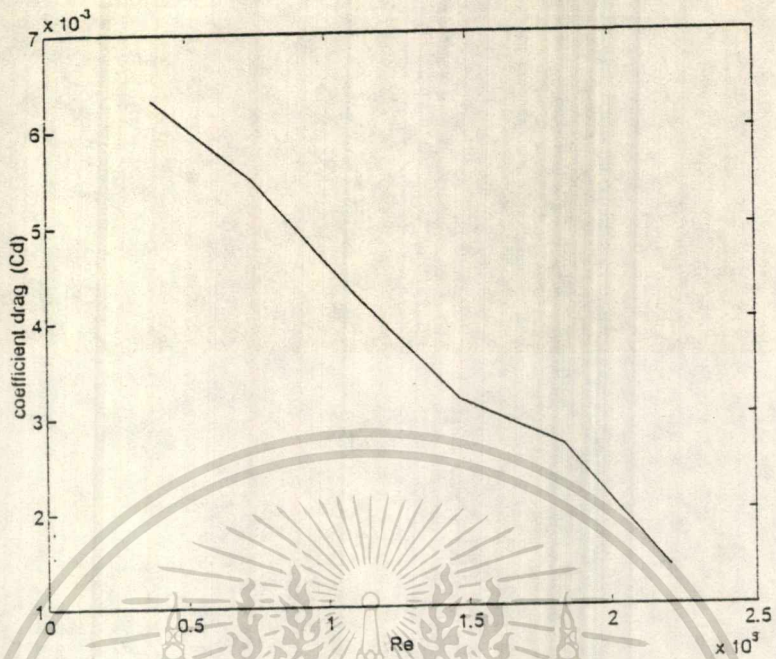
สรุปผลการทดลอง

8.1 สรุปผลที่ได้จากการคำนวณสำหรับการไหลผ่านแผ่นราบ

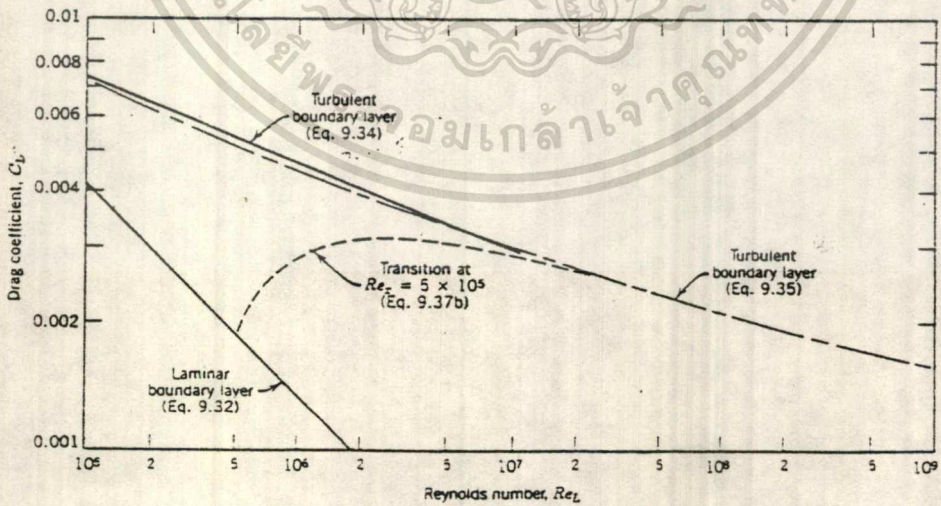
ค่าความหนาของชั้นของไหล (δ), ระยะความหนาจัด (δ^*) และค่าความหนาของชั้นโมเมนตัม (θ) จะแปรผันตรงกับความยาวของแผ่นราบ (x) ซึ่งจะได้ว่าความหนาของชั้นของไหล (δ), ระยะความหนาจัด (δ^*) และค่าความหนาของชั้นโมเมนตัม (θ) จะแปรผันตรงกับ Re_x และเมื่อเพิ่มค่าของความเร็วของการไหลอิสระ (Free stream) ความเร็วของของไหลก่อนเข้าสู่แผ่นราบ จะทำให้ค่าความหนาของชั้นของไหล (δ), ระยะความหนาจัด (δ^*) และค่าความหนาของชั้นโมเมนตัม (θ) ที่ตำแหน่ง x ต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

จากกราฟของ T_w กับ Re_x และค่า C_f กับค่า Re_x แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นเฉือน (T_w) และค่าสัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือน (C_f) จะมีค่าสูงในช่วงต้นของแผ่นราบ แล้วลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 2 ในช่วงที่ 3 ค่า T_w และค่า C_f จะค่อนข้างคงที่ แต่ใน 2 ตำแหน่งสุดท้ายค่า T_w และค่า C_f จะติดยและสูงขึ้นอย่างมากเพราะในการคำนวณ โปรแกรมต้องใช้เมตริกซ์มากกว่าที่เราต้องการหา ทำให้ค่าขอบนี้จะไม่เปลี่ยนไปตามโปรแกรม ดังนั้น 2 ค่าสุดท้ายจึงนำมาใช้ในการวิเคราะห์ไม่ได้

เมื่อเพิ่มค่าความเร็วของการไหลอิสระ (U) ซึ่งทำให้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่ม และจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดูด (C_D) มีค่าลดลง



รูปที่ 8.1 แสดงกราฟระหว่างค่า C_D กับค่า Re_L ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 8.2 แสดงกราฟระหว่างสัมประสิทธิ์แรงกดกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ได้จากทฤษฎี

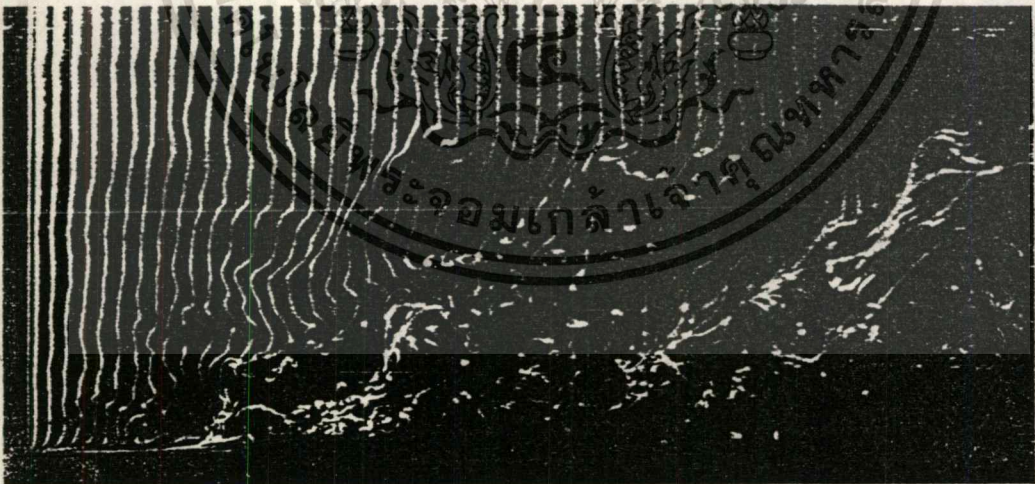
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 8.1 ซึ่งแสดงกราฟของสัมประสิทธิ์แรงจล (C_D) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_L) จะเห็นว่า มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่คาดว่าจะเป็นในรูปที่ 8.2

8.2 สรุปผลการทดลองที่สังเกตได้จากการฉีดสี

จากการบันทึกภาพการไหลของของไหลผ่านแผ่นราบจะสังเกตเห็นว่าเมื่อให้ความเร็วของความเร็วของการไหลอิสระของของไหลก่อนเข้าแผ่นราบมีค่าน้อย การไหลจะค่อนข้างราบเรียบ และจะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนและการไหลย้อนกลับน้อยมากหรือไม่เกิดเลย นั่นก็คือเมื่อความเร็วของการไหลอิสระมีค่าน้อยจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้ยาก

เมื่อให้ค่าความเร็วของการไหลอิสระมีค่ามากขึ้น และทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนได้เร็วขึ้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรไหลผ่านแผ่นราบโดยวิธีไฮโดรเจนบับเบิล (Hydrogen bubble method) จะมีความคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 8.3 แสดงภาพชั้นขีดผิวของของไหลเมื่อมีการไหลแบบปั่นป่วนผ่านแผ่นราบ

(ใช้วิธีไฮโดรเจนบับเบิล โดยมีน้ำเป็นสารทำงานซึ่งไหลด้วยความเร็ว 20.4

เซนติเมตรต่อวินาที , $Re = 990$)

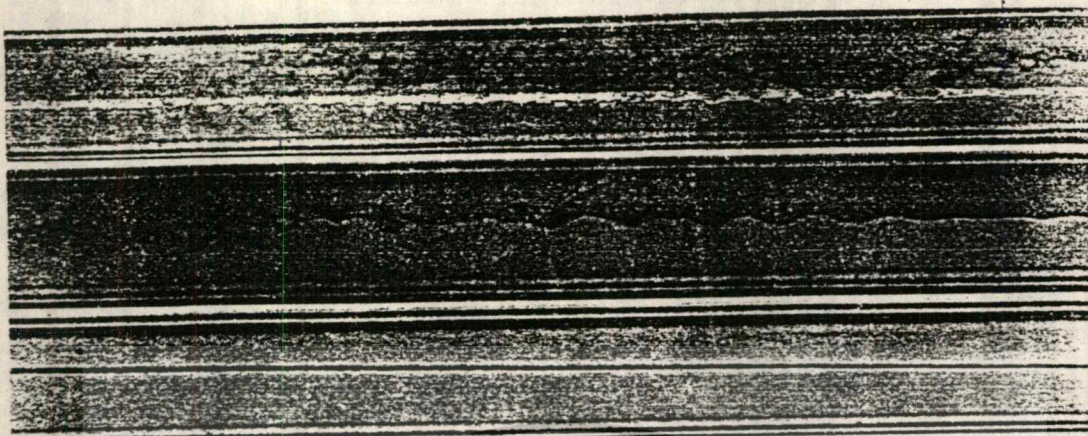
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8.4 ภาพการไหลของอากาศเมื่อมีค่าความเร็วการไหลอิสระเท่ากับ 3.3 เมตร/วินาที

$$Re = 2 \times 10^5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

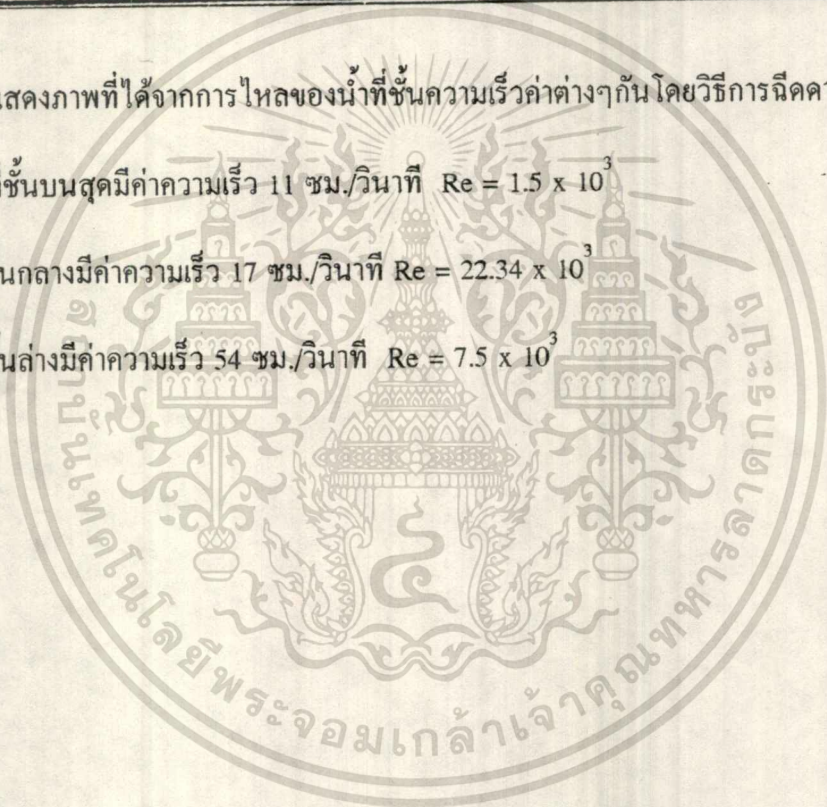


รูปที่ 8.5 แสดงภาพที่ได้จากการไหลของน้ำที่ชั้นความเร็วค่าต่างๆกัน โดยวิธีการฉีดคาย ซึ่ง

ที่ชั้นบนสุดมีค่าความเร็ว 11 ซม./วินาที $Re = 1.5 \times 10^3$

ชั้นกลางมีค่าความเร็ว 17 ซม./วินาที $Re = 22.34 \times 10^3$

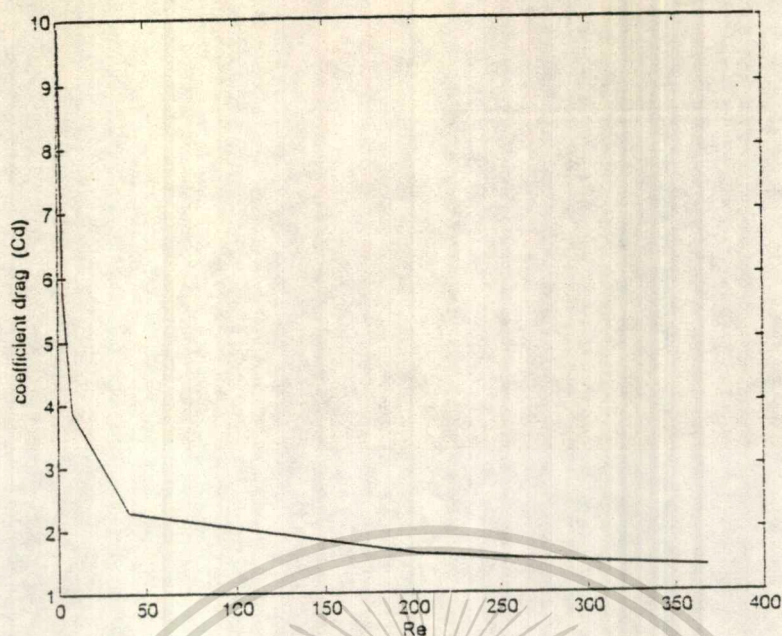
ชั้นล่างมีค่าความเร็ว 54 ซม./วินาที $Re = 7.5 \times 10^3$



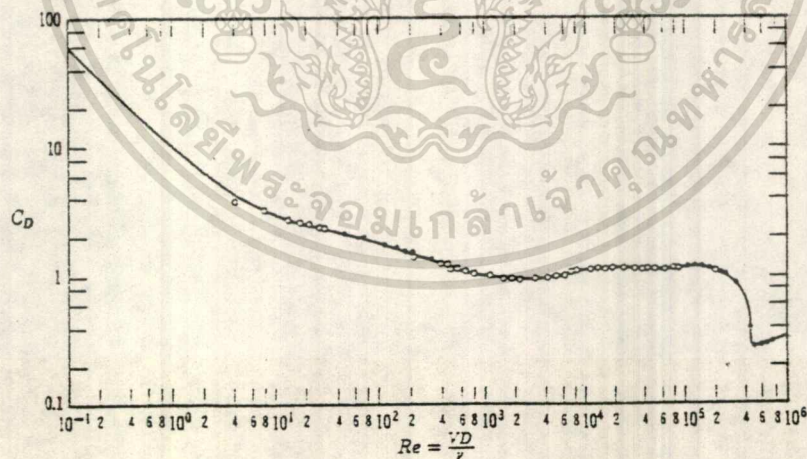
8.3 สรุปผลที่ได้จากการคำนวณสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกกลม

จากกราฟของค่า Re_D กับค่า C_D จะเห็นได้ว่าค่าของ C_D มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (Re_D ตั้งแต่ 0-250) หลังจากนั้นค่า Re_D ค่อนข้างคงที่ในช่วงที่ 2 ซึ่งมีผลมาจากในช่วงแรกที่มีค่า Re_D ต่ำ โดยจุดที่เกิดการไหลแยก (Separation) จะอยู่ที่ค่า θ มากๆ ค่าแรงกดเนื่องจากความเสียดทานจะมีค่ามากกว่าแรงกดเนื่องจากความดัน ค่าของแรงกดจึงขึ้นกับค่าแรงกดเนื่องจากความเสียดทานมากกว่า แต่เมื่อ Re_D มีค่าเพิ่มมากขึ้น (ความเร็วของการไหลอิสระมีค่าเพิ่มขึ้น) จุดที่เกิดการไหลแยกก็จะเกิดเร็วขึ้น มีผลทำให้ค่าแรงกดเนื่องจากความเสียดทานมีค่าลดลง ค่าของแรงกดจึงขึ้นกับค่าแรงกดเนื่องจากความดัน (ที่ค่อนข้างคงที่)





รูปที่ 8.6 แสดงกราฟระหว่างค่า C_D กับค่า Re_D ที่ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์



รูปที่ 8.7 แสดงกราฟระหว่างค่า C_D กับ Re_D ตามทฤษฎี

จากผลการคำนวณของ T_w ในช่วงแรกซึ่งมีค่า Re ตั้งแต่ 0-70 ค่า T_w จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงที่ 2 ซึ่งมีค่า Re ตั้งแต่ 70-95 ค่า T_w จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในช่วงสุดท้าย ค่า T_w จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

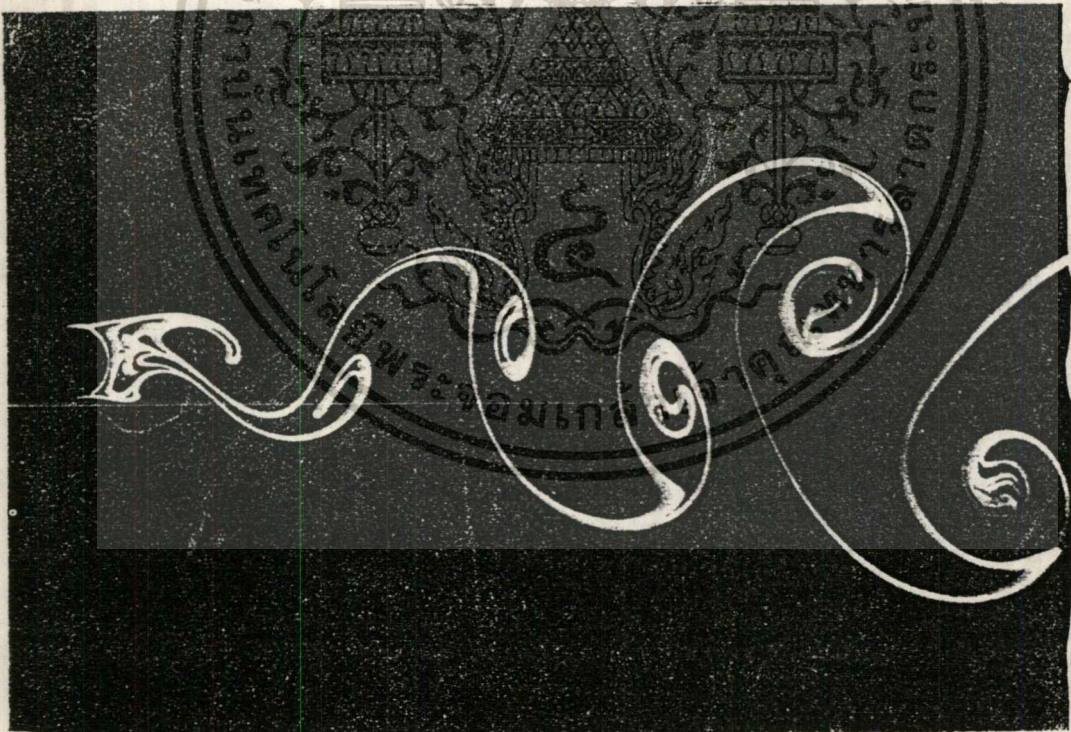
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4 สรุปผลปรากฏการณ์ต่างๆที่พบจากการบันทึกภาพ

1. เมื่อค่าเรย์โนลด์สนับเบอร์น้อยกว่า 1 จะไม่เกิดการไหลแยก เส้นสายธารการไหลจะไม่มีควมสมมาตรกัน และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าวิกฤต ($Re_{CRITICAL}$) จะเกิดปรากฏการณ์การไหลหมุนวนขึ้น ความยาวของการไหลหมุนวนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วง $6 < Re < 40$ การไหลหมุนวนที่เกิดขึ้นของแบบจำลองรูปทรงกระบอกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ความยาวของการไหลหมุนวนจะมีขนาดเท่ากับความกว้างของการไหลหมุนวน

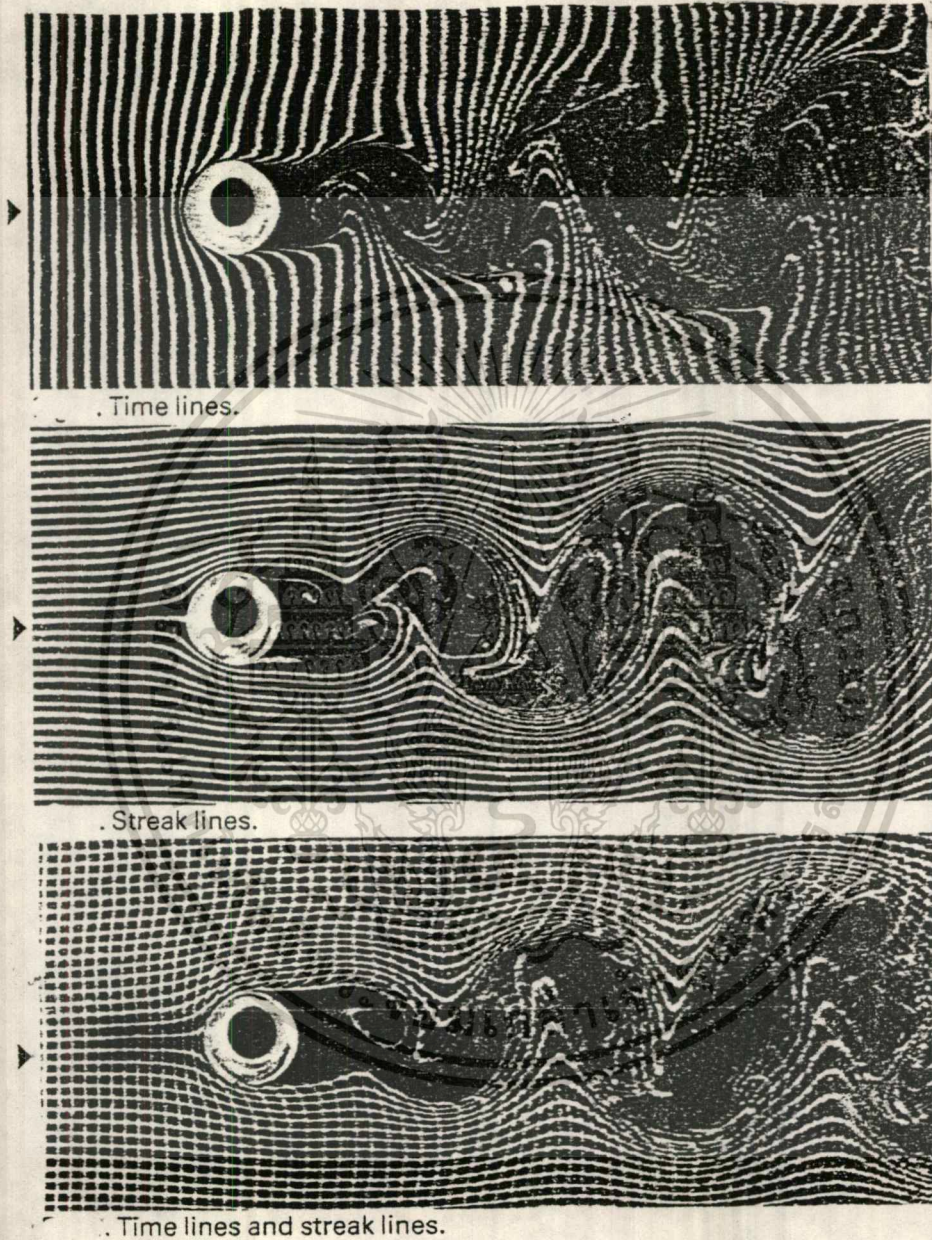
2. ปรากฏการณ์คาร์มานวอเท็กซ์สตรีท (Karman vortex street)

จากภาพด้านล่างจะสังเกตเห็นว่า ของไหลเกิดการเคลื่อนที่ไปด้านบนและด้านล่างของแบบจำลอง เกิดเป็นเส้นคู่กันและวกกลับขยายตัวออกไปเรื่อยๆ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์คาร์มาน-วอเท็กซ์สตรีท ปรากฏการณ์นี้จะมีขนาดความยาวคลื่นเท่ากับความกว้างของคลื่น และจะเกิดได้ในช่วง $Re_D > 40$ เมื่อ Re_D มีค่าเพิ่มมากขึ้น และจะทำให้สามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์นี้ได้ง่าย ซึ่งตรงกับผลที่คาดเอาไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 8.8 a ภาพแสดงปรากฏการณ์คาร์มานวอเท็กซ์สตรีทที่เกิดหลังทรงกระบอกกลมซึ่งมีค่า $Re = 140$ (โดยมีน้ำเป็นสารทำงานไหลด้วยความเร็ว 1.5 เซนติเมตรต่อวินาที ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากท่านใดต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



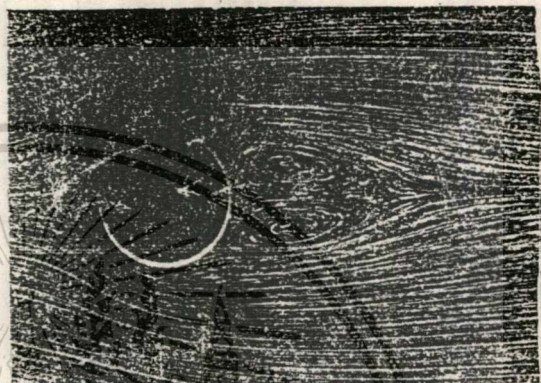
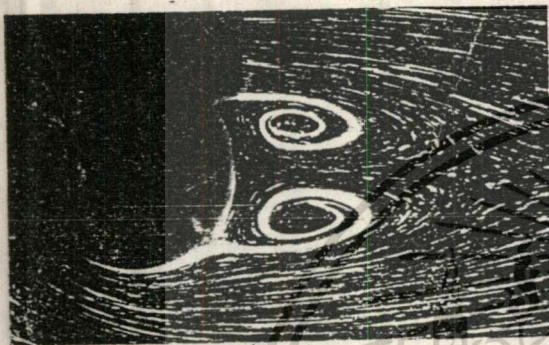
รูปที่ 8.8 b ภาพแสดงปรากฏการณ์คาร์มานวอเท็กซ์สตรีทที่เกิดขึ้นหลังทรงกระบอกกลมซึ่งมีค่า

$Re = 170$ (โดยวิธีไฮโดรเจนบับเบิล ซึ่งมีน้ำเป็นสารทำงานไหลด้วยความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 2.6 เซนติเมตรต่อวินาที , เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกระบอกกลม = 8 มิลลิเมตร)

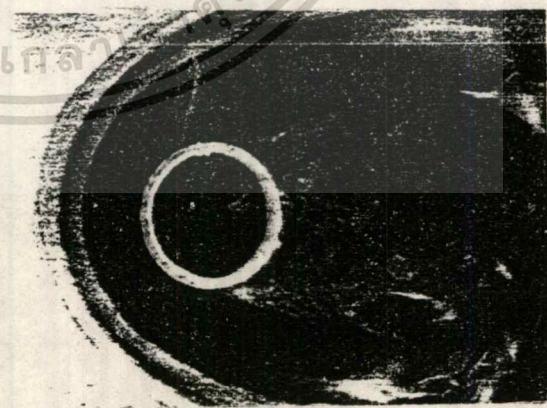
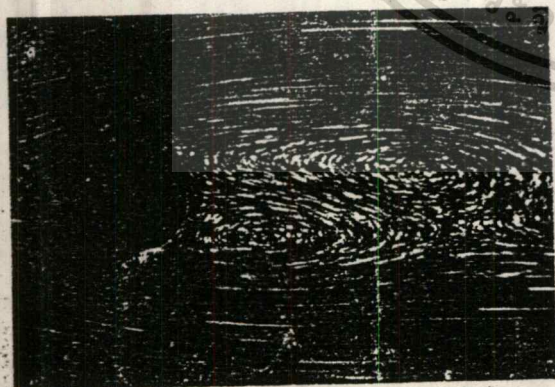
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้คัดลอกและต้องจ่ายงบเงาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่ามาก ๆ จะสังเกตเห็นว่าเกิดการไหลหมุนวนขึ้นที่ด้านหลังของทรงกระบอก ต่อไปนี้เป็นภาพการไหลหมุนวนแบบต่าง ๆ



รูปที่ 8.9 a ภาพการไหลผ่านทรงกระบอก
ที่ค่า $Re = 19$

รูปที่ 8.9 b ภาพการไหลผ่านทรงกระบอก
ที่ค่า $Re = 26$



รูปที่ 8.9 c ภาพการไหลผ่านทรงกระบอก

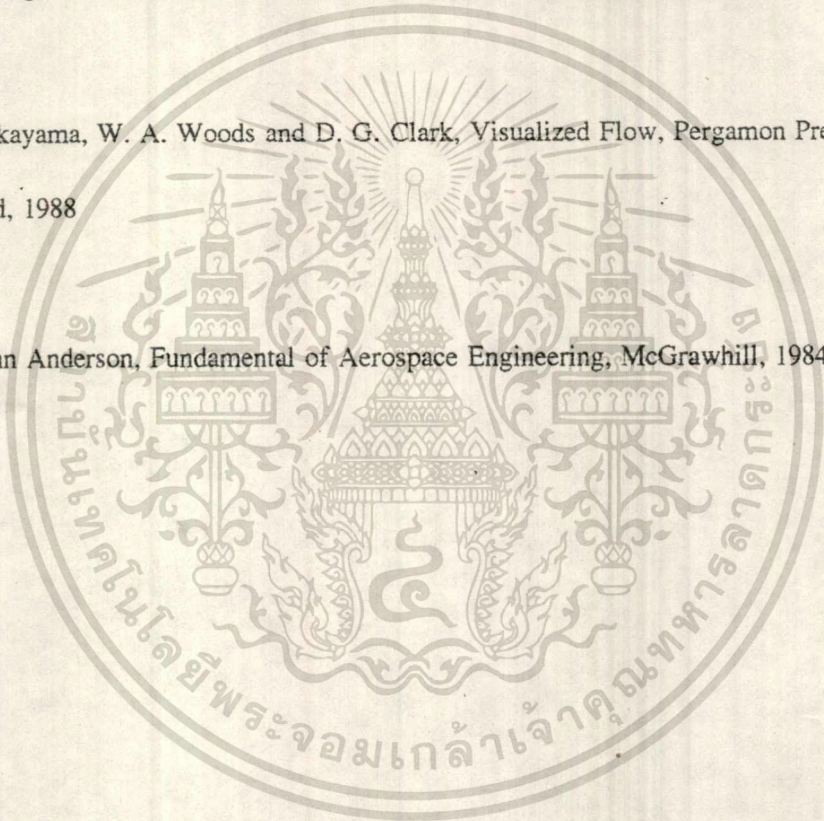
รูปที่ 8.9 d ภาพการเกิดคอลลาปส์วอร์เท็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ที่ค่า $Re = 2.9 \times 10^3$ ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Robert W. Fox and Alan T. McDonald, Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley and Sons, New York, 1985.
2. Wolfgang Merzkirch, Flow Visualization, Academic Press, London, 1987
3. Y. Nakayama, W. A. Woods and D. G. Clark, Visualized Flow, Pergamon Press, Oxford, 1988
4. Y. John Anderson, Fundamental of Aerospace Engineering, McGrawhill, 1984



กิติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ สุทธิพงศ์ ศรีกรรรมณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และคณะอาจารย์ใน
ภาควิชาเครื่องกลทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลาให้ความรู้คำแนะนำและตรวจสอบ ปรินิพนธ์
ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณท่านผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือ และแนะนำตลอดจน
เป็นกำลังใจในการจัดทำปรินิพนธ์ฉบับนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table Specific Gravities of Several Common Manometer Liquids at 20 C (Data from [1, 2, 3].)

Fluid	Specific Gravity ^a
E. V. Hill blue oil	0.797
Meriam red oil	0.827
Benzene	0.879
Dibutyl phthalate	1.04
Monochloronaphthalene	1.20
Carbon tetrachloride	1.595
Bromoethylbenzene (Meriam blue)	1.75
Tetrabromoethane	2.95
Mercury	13.55

^a Specific gravity, $SG \equiv \rho/\rho_{H_2O}$ (at 4 C); ρ_{H_2O} (at 4 C) = 1000 kg/m³ (1.94 slug/ft³).

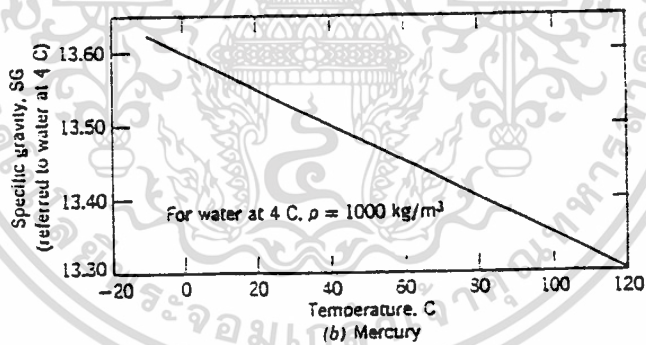
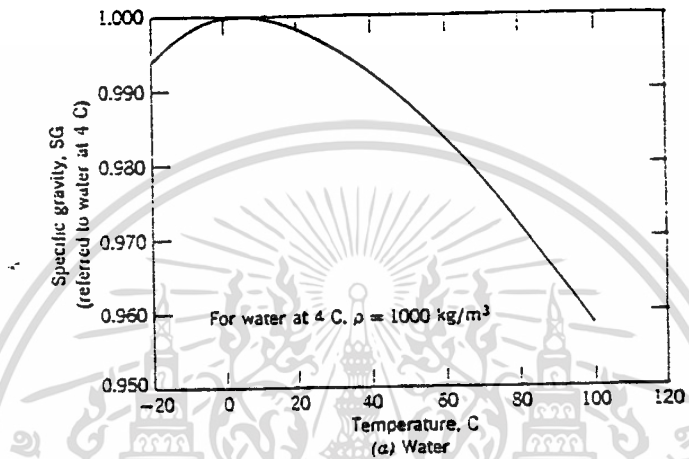
Table Physical Properties of Common Liquids at 20 C (Data from [1, 4, 5].)

Liquid	Isentropic Bulk Modulus ^a (GN/m ²)	Specific Gravity (-)
Benzene	1.48	0.879
Carbon tetrachloride	1.36	1.595
Castor oil	2.11	0.969
Gasoline	—	0.72
Glycerin	4.59	1.26
Heptane	0.886	0.684
Kerosine	1.43	0.82
Lubricating oil	1.44	0.88
Mercury	28.5	13.55
Octane	0.963	0.702
Seawater ^b	2.42	1.025
Water	2.24	0.998

^a Calculated from speed of sound: 1 GN/m² = 10⁹ N/m² (1 N/m² = 1.45 × 10⁻⁴ lbf/in.²).

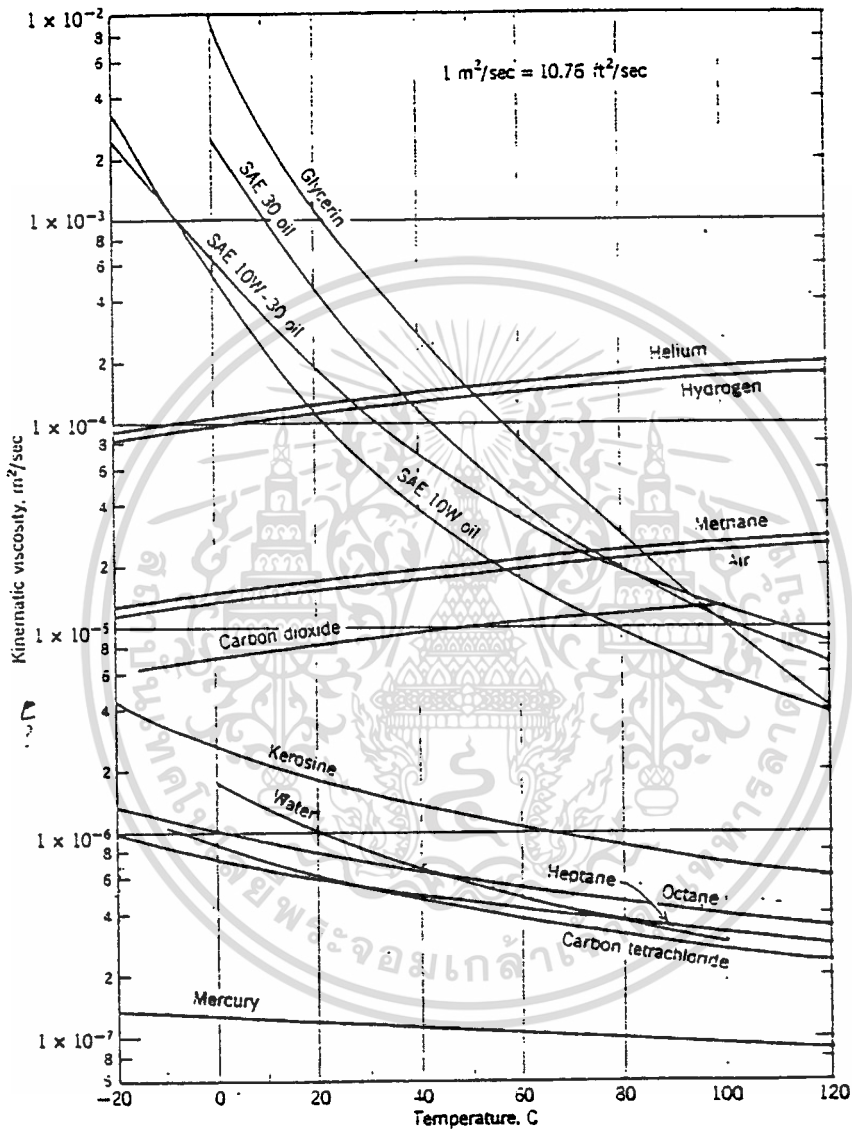
^b Dynamic viscosity of seawater at 20 C is $\mu = 1.08 \times 10^{-3}$ N · sec/m².

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



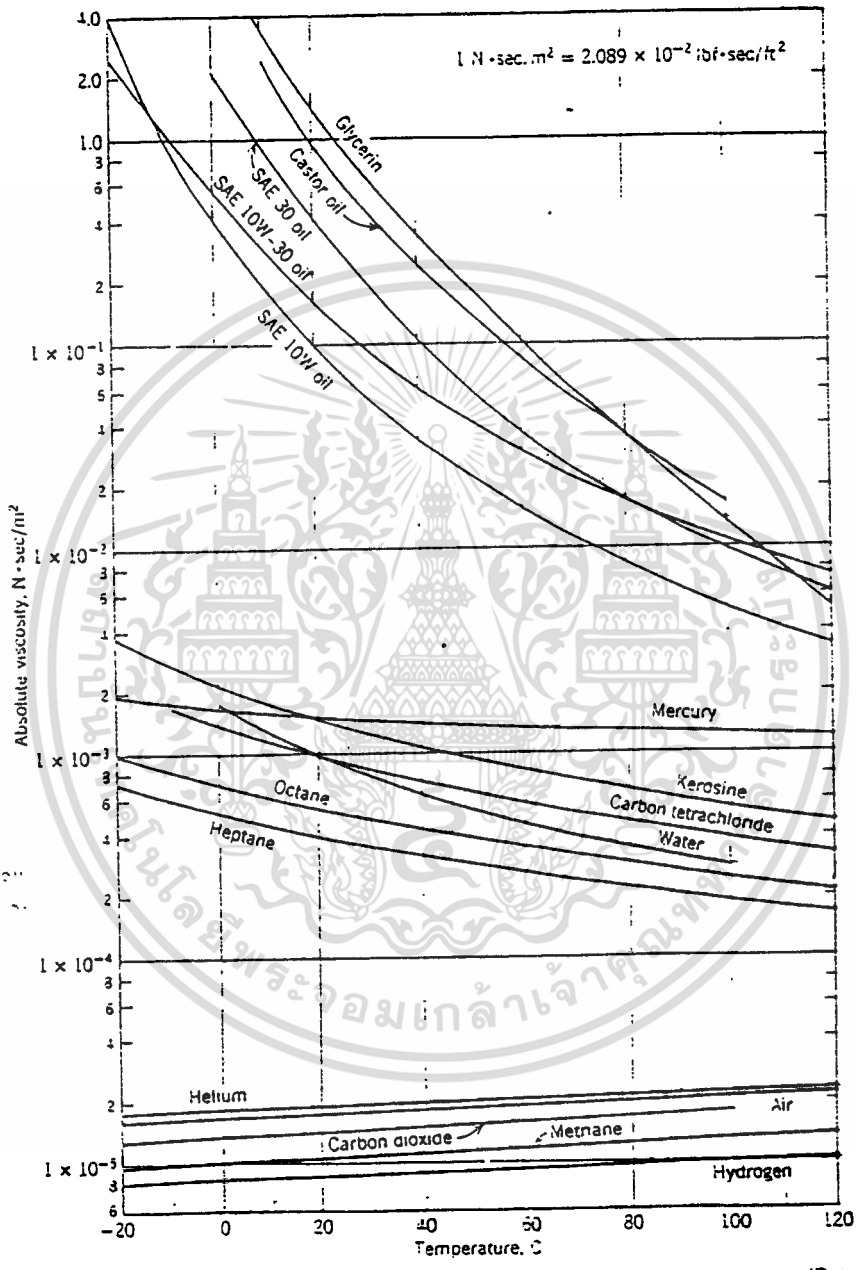
Specific gravity of water and mercury as functions of temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Kinematic viscosity of common fluids (at atmospheric pressure) as a function of temperature. (Data from [1], [5], and [9].)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Dynamic (absolute) viscosity of common fluids as a function of temperature. (Data from [1], [5], and [9].)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table Allowable Viscosity Ranges for SAE Lubricant Classifications (Data from [11].)

Lubricant Type	SAE Viscosity Number	Viscosity Range (centistokes) ^a			
		At 0 F		At 210 F	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Crankcase	5 W		1,300	3.9	
	10 W	1,300	2,600	3.9	
	20 W	2,600	10,500	3.9	
	20			5.7	9.6
	30			9.6	12.9
	40			12.9	16.8
	50			16.8	22.7
Transmission and axle	75		15,000		
	80	15,000	100,000		
	90			75	120
	140			120	200
	250			200	
Automatic transmission fluid	Type A	39 ^b	43 ^b	7	8.5

^a 1 centistoke = 1 cSt = 10^{-6} m²/sec (= 1.08×10^{-3} ft²/sec).

^b At 100 F.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table Properties of the U.S. Standard Atmosphere (Data from [8].)

Geometric Altitude (meters)	Temperature (K)	p/p_0 (—)	ρ/ρ_0 (—)
-500	291.4	1.061	1.049
0	288.2	1.000 ^a	1.000 ^b
500	284.9	0.9421	0.9529
1,000	281.7	0.8870	0.9075
1,500	278.4	0.8345	0.8638
2,000	275.2	0.7846	0.8217
2,500	271.9	0.7372	0.7812
3,000	268.7	0.6920	0.7423
3,500	265.4	0.6492	0.7048
4,000	262.2	0.6085	0.6689
4,500	258.9	0.5700	0.6343
5,000	255.7	0.5334	0.6012
6,000	249.2	0.4660	0.5389
7,000	242.7	0.4057	0.4817
8,000	236.2	0.3519	0.4292
9,000	229.7	0.3040	0.3813
10,000	223.3	0.2615	0.3376
11,000	216.8	0.2240	0.2978
12,000	216.7	0.1915	0.2546
13,000	216.7	0.1636	0.2176
14,000	216.7	0.1399	0.1860
15,000	216.7	0.1195	0.1590
16,000	216.7	0.1022	0.1359
17,000	216.7	0.08734	0.1162
18,000	216.7	0.07466	0.09930
19,000	216.7	0.06383	0.08489
20,000	216.7	0.05457	0.07258
22,000	218.6	0.03995	0.05266
24,000	220.6	0.02933	0.03832
26,000	222.5	0.02160	0.02797
28,000	224.5	0.01595	0.02047
30,000	226.5	0.01181	0.01503
40,000	250.4	0.002834	0.003262
50,000	270.7	0.0007874	0.0008383
60,000	255.8	0.0002217	0.0002497
70,000	219.7	0.00005448	0.00007146
80,000	180.7	0.00001023	0.00001632
90,000	180.7	0.000001622	0.000002588

^a $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ abs} (= 14.696 \text{ psia})$.

^b $\rho_0 = 1.2250 \text{ kg/m}^3 (= 0.002377 \text{ slug/ft}^3)$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table Thermodynamic Properties of Common Gases at STP* (Data from [8, 13, 14].)

Gas	Chemical Symbol	Molecular Mass, M_m	R^b $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$	c_p $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$	c_v $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$	$k = \frac{c_p}{c_v}$ (—)	R^b $\left(\frac{\text{ft} \cdot \text{lb}_f}{\text{lbm} \cdot \text{R}}\right)$	c_p $\left(\frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot \text{R}}\right)$	c_v $\left(\frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot \text{R}}\right)$
Air	—	28.98	286.9	1,004	717.4	1.40	53.33	0.2399	0.1713
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	188.9	840.4	651.4	1.29	35.11	0.2007	0.1556
Carbon monoxide	CO	28.01	296.8	1,039	742.1	1.40	55.17	0.2481	0.1772
Helium	He	4.003	2,077	5,225	3,147	1.66	386.1	1.248	0.7517
Hydrogen	H ₂	2.016	4,124	14,180	10,060	1.41	766.5	3.388	2.402
Methane	CH ₄	16.04	518.3	2,190	1,672	1.31	96.32	0.5231	0.3993
Nitrogen	N ₂	28.01	296.8	1,039	742.0	1.40	55.16	0.2481	0.1772
Oxygen	O ₂	32.00	259.8	909.4	649.6	1.40	48.29	0.2172	0.1551
Steam†	H ₂ O	18.02	461.4	~2,000	~1,540	~1.30	85.78	~0.478	~0.368

* STP = standard temperature and pressure, $T = 15 \text{ C (59 F)}$ and $p = 101.325 \text{ kPa abs (14.696 psia)}$.

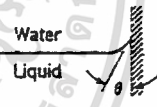
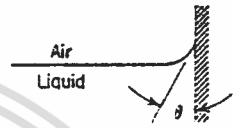
^b $k = R_u/M_m$; $R_u = 8.314 \text{ J/kgmol} \cdot \text{K (1545.3 ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lbmol} \cdot \text{R)}$; $1 \text{ Btu} = 778.2 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$.

† Water vapor behaves as an ideal gas when superheated by 55 C (100 F) or more.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

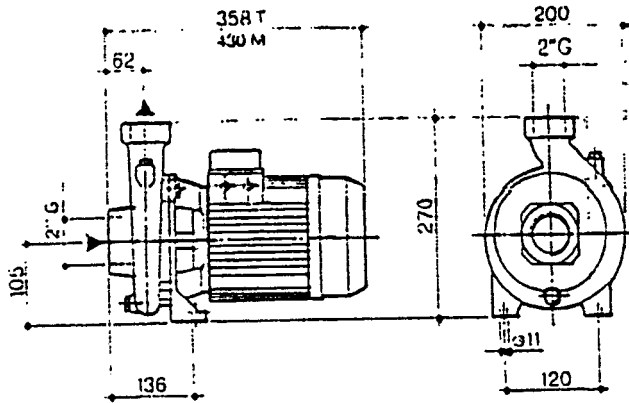
Table Surface Tension of Common Liquids at 20 C (Data from [1, 4-7].)

Liquid	Surface Tension, σ (mN/m) ^a	Contact Angle, θ (degrees)
(a) In contact with air		
Benzene	28.9	
Carbon tetrachloride	27.0	
Glycerin	63.0	
Hexane	18.4	
Kerosine	26.8	
Lube oil	25-35	
Mercury	484	140
Methanol	22.6	
Octane	21.8	
Water	72.8	~0
(b) In contact with water		
Benzene	35.0	
Carbon tetrachloride	45.0	
Hexane	51.1	
Mercury	375	140
Methanol	22.7	
Octane	50.8	



^a 1 mN/m = 10⁻³ N/m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DIMENSIONI E DATI NON IMPEGNANO
DIMENSIONS AND OTHER DATA ARE NOT BINDING

TIPO POMPA PUMP TYPE	POTENZA MOTOR SIZE		ALIMENTAZIONE VOLTAGE	A	CONDENSATORE CAPACITOR		PESO WEIGHT
	CV HP	KW			µF	Vc	
K 14/400 M	2,5	1,93	Monofase 220 V 1-Phase 240 V	9,7 8,9	40	450	25
K 14/400 T			Trifase 220/380 V 3-Phase 240/415 V	7,6-4,4 6,96-4	—	—	21,2

PORTATA - DELIVERY Q = m ³ /h										
0	6	12	15	18	21	24	27	30	33	36
PORTATA - DELIVERY Q = litri/min litres-min										
0	100	200	250	300	350	400	450	500	550	600
PREVALENZA MANOMETRICA TOTALE - TOTAL MANOMETRIC LIFTS = m										
18,5	19	18,5	18	17,5	16,5	15,5	14	13	12	10,5

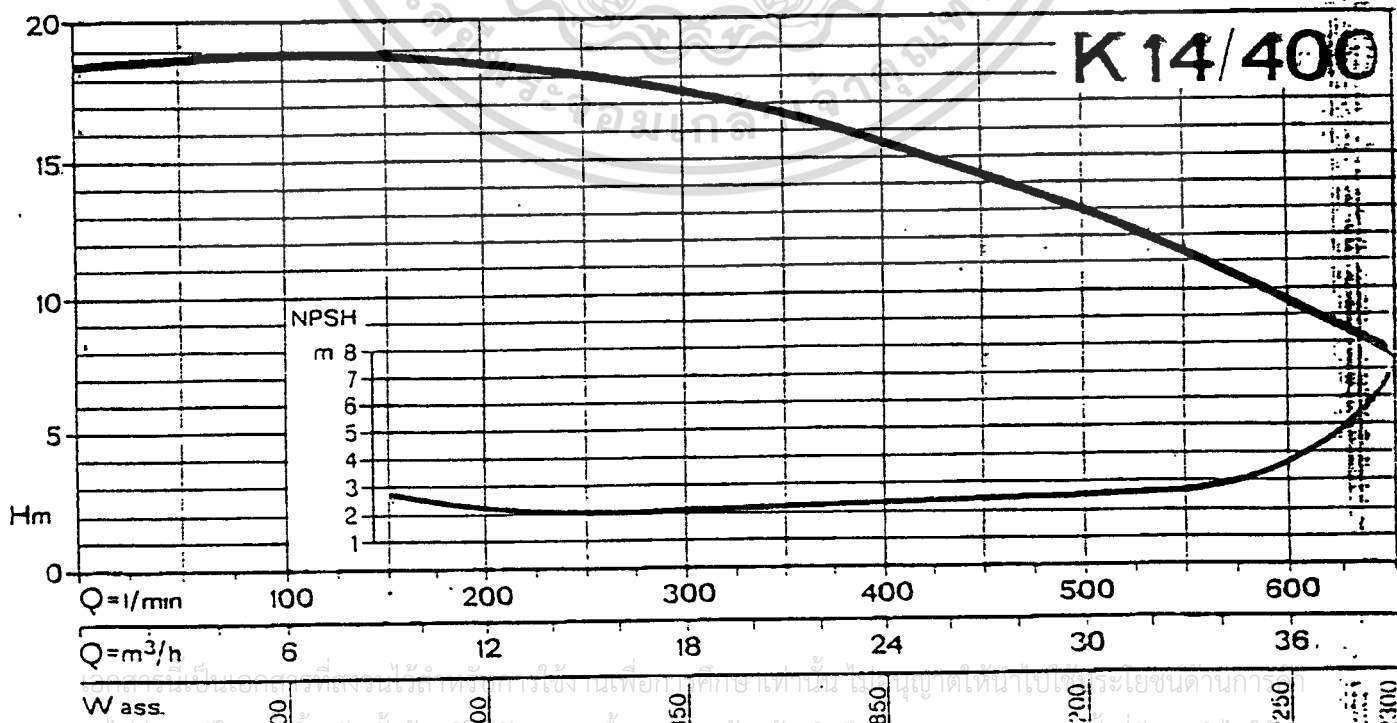
Q = Portata, acqua con peso specifico 1000 Kg/m³
H = Prevalenza manometrica totale in metri C.A.

Q = Delivery, water with specific gravity 1000 Kg/m³
H = Total manometric lifts in metres

DESCRIZIONE: - corpo, supporto pompa e girante in ghisa - albero in acciaio inox - tenuta meccanica in ceramica-carbone - cuscinetti a sfere selezionati - motore chiuso, ventilato esterno, protezione IP44, avvolgimento in classe F - co-priventola in acciaio stampato.
Pressione massima di esercizio 6 bar
Temperatura massima dell'acqua 80 °C

DESCRIPTION: - body, support and impeller in cast iron - shaft in chrome stainless steel - high quality mechanical seal - rotor on amply dimensioned ball bearings - enclosure externally ventilated motor, IP44 protection, fan cover in pressed sheet steel - windings in class F.
Max working pressure 6 bar
Max water temperature 80 °C

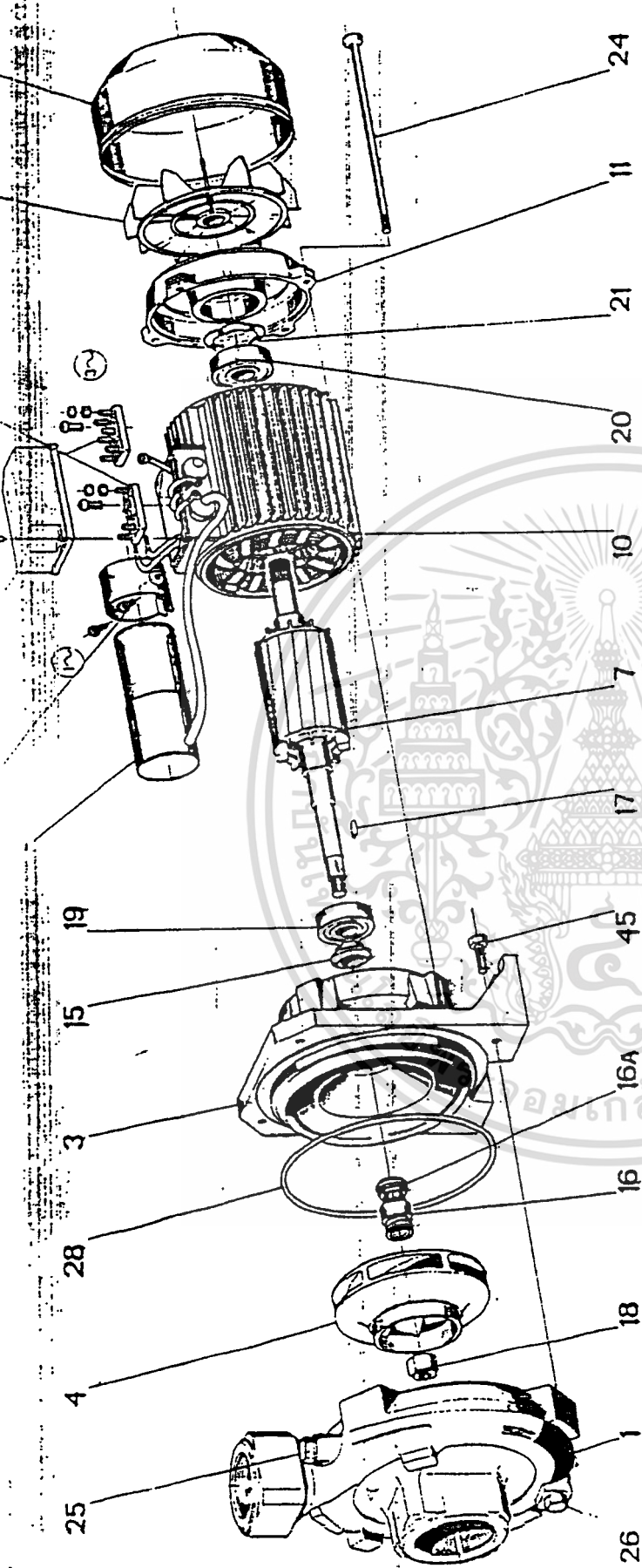
n = 2900 1/min



K 14/400

W ass. 1300 1600 1850 2850 2200 2300

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่พิมพ์นี้การนำไปใช้



- 20 Ball bearing
- 21 Spring washer
- 22 Terminal block
- 23 Capacitor
- 24 Tie bolt
- 25 Filling plug
- 26 Drain plug
- 28 "O" Ring
- 45 Screw
- 52 Screw

- 1 Pump body
- 3 Support
- 4 Impeller
- 7 Motor shaft
- 10 Motor body
- 11 Motor end cover
- 12 Fan
- 13 Fan cover
- 14 Terminal cover
- 15 Splash guard
- 16-16A Mechanical seal
- 17 Shaft key
- 18 Self locking nut
- 19 Ball bearing

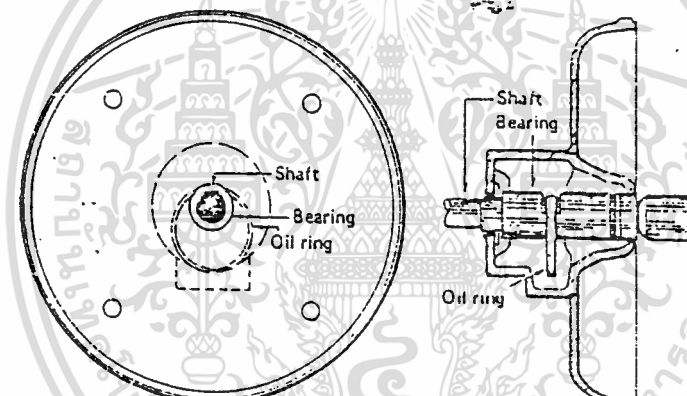
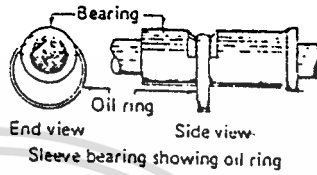
- 20 Cuscinetto
- 21 Anello compensatore
- 22 Morselliera
- 23 Condensatore
- 24 Tirante
- 25 Tappo di carico
- 26 Tappo di scarico
- 28 Guarnizione OR
- 45 Vite
- 52 Vite

- 1 Corpo pompa
- 3 Supporto
- 4 Girante
- 7 Albero con rotore
- 10 Cassa motore con statore
- 11 Coprichio motore
- 12 Ventola
- 13 Coprimentola
- 14 Coprimorselliera
- 15 Paraspruzzi
- 16-16A Tenula meccanica
- 17 Linguetta
- 18 Dado blocc. girante
- 19 Cuscinetto

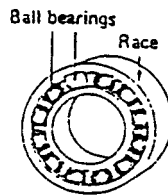
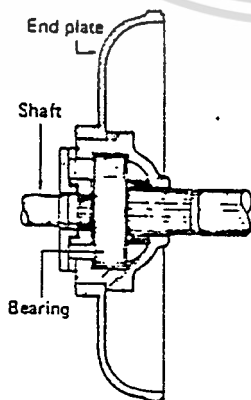
LEGENDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง
 เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีารนำไปใช้

Construction of sleeve bearing and oil ring.



A sleeve bearing assembled on an end plate.



The ball bearing at right mounted in the end plates as shown.