

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบการขนย้ายฟิล์มบางที่มีลักษณะยืดหยุ่น

Flexible Web Handling System



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบการขนย้ายพีดัมบางที่มีลักษณะยืดหยุ่น

Flexible Web Handling System

ผู้จัดทำ

1. นายทรงกฤษ คงประเสริฐ รหัสประจำตัว 48015375
2. นายณัฐพงศ์ ศรีสง่า รหัสประจำตัว 48015416
3. นายพงษ์พันธ์ นาคศิริ รหัสประจำตัว 48015426



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการขนย้ายฟิล์มบางที่มีลักษณะยึดหยุ่น

ทรงกฤษ กงประเสริฐ รหัสประจำตัว 48015375
 ณัฐพงศ์ ศรีสง่า รหัสประจำตัว 48015416
 พงษ์พันธ์ นาคศิริ รหัสประจำตัว 48015426
 รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ในโครงการนี้รูปแบบเริ่มแรกของระบบการขนย้ายแผ่นฟิล์มบาง คือ สร้างเครื่องมือสำหรับวัดค่าความหนาของฟิล์มอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มบางและลูกกลิ้ง การทดลองเป็นการปฏิบัติเพื่อวัดค่าความหนาของฟิล์มอากาศ ของการรวมกันของกระดาษและฟอลซ์ สำหรับ 6 เซนติเมตร, 8 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร , และ 12 เซนติเมตร ตามลำดับ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วของฟิล์มบาง เช่น เซอร์วิค ระยะห่างชนิดเหนียวน้ำกระแสไฟฟ้าใช้สำหรับวัดค่าความหนาของฟิล์มอากาศ การเทียบมาตรฐานและระบบการวัดของความหนาของฟิล์มอากาศจะใช้เซ็นเซอร์วัดระยะห่างทำให้ถูกต้องแม่นยำสำหรับ หนึ่งในปริมาณเล็กๆของความหนาของฟิล์มอากาศ ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง ที่แต่ละการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ ผลการทดลองแสดงความหนาของฟิล์มอากาศที่เพิ่มขึ้น มีความสำคัญอย่างยิ่งกับการเพิ่มขึ้นของความเร็วของแผ่นฟิล์มบาง และความหนาของอากาศที่เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของความกว้างของแผ่นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flexible Web Handling System

Songgit Kongpraserd 48015375

Nattapong Sresagra 48015416

Pongpan Naksiri 48015426

Assoc.Prof.Dr.mongkol mongkolwongroj

Advisor

ABSTRACT

This project, a prototype of the web transportation system is constructed to be able to measure the air film thickness between the web and the roller. The experiments are conducted to measure the air film thickness of combined paper and foil web for 8 cm, 10 cm, and 12 cm respectively under varying web velocity. The inductive type gap sensor is used to measure the film thickness. Calibration and measurement of the film thickness using gap sensor were done precisely for a very small value of air film thickness. Tests were done ten times at each operating condition for obtaining the accurate results. The experimental results show that air film thickness increase significantly with the increase in web velocity and the air film thickness increase with the increase of the web width.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีโดยมี ร.ศ. คร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาได้ให้คำแนะนำ สั่งสอน และเสนอแนะแนวทางแก้ไขตลอดเวลาในการทำวิจัย ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตา กรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ผู้จัดทำมีวันนี้ คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง เป็นผู้ที่ทำให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังคอยให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ประ โยชน์ทั้งหลายอันพึงมี พึงได้แก่บุคคลหนึ่ง บุคคลใดที่ได้จากการอ่านปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอขอบคุณความคิดทั้งหลายทั้งปวงให้กับคณะบุคคลที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้น

ทรงกฤษ ทงประเสริฐ
ฉัฐพงศ์ ศรีสง่า
พงษ์พันธ์ นาคศิริ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญ(ต่อ)	V
สารบัญภาพ	VI
สารบัญภาพ(ต่อ)	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ขั้นตอนของการทำงาน	1
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	3
2.1 คำนิยามของการไหล	3
2.2 สมมุติฐานและขอบเขตคุณสมบัติของของไหล	4
2.3 การสัมผัสแบบเส้น (Line Contact)	8
2.4 สมการเรโนลด์	8
2.5 ทฤษฎีพื้นฐาน	14
2.6 การสัมผัสแบบเส้นเมื่อทรงกระบอกไม่เสียดรูป	15
2.7 ค่าความหนืดไม่คงที่	16
2.8 ทรงกระบอกที่สัมผัสมีการบิดหมุนและค่าความหนืดไม่คงที่	16
2.9 น้ำมันหล่อลื่น	17
2.10 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น	17
2.11 การคำนวณ	18
2.12 การประยุกต์วิธีเชิงตัวเลข	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13 ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนในการวัด	23
2.14 การเกิดฟิล์มบาง	27
2.15 Gap Sensor	28
2.16 สมการที่ใช้ในการหาค่าระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มบาง กับลูกกลิ้ง	29
2.17 การออกแบบและรายละเอียดแบบ	30
บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	35
3.1 ชุดทดลองระบบขนถ่ายฟิล์มบางที่มีลักษณะยืดหยุ่น	35
3.2 จากภาพจะเห็นเครื่องอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	36
3.3 Sensor head (AEC PU 05)	37
3.4 Gap Sensor	39
3.5 รูปมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ	40
3.6 เครื่องวัดความเร็วรอบ	41
บทที่ 4 วิธีการทดลอง	43
4.1 ตัดขนาดของแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์ตามขนาดที่จะทดสอบและแปะกระดาษกาวอลูมิเนียม	43
4.2 การคาร์บริเบทเซ็นเซอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก multimeter	44
4.3 ทำการทดลองและเก็บค่าของสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์	46
4.4 การคำนวณหาค่าคงที่ของ ϵ , λ , U ที่จำเป็นในการทดลอง	47
บทที่ 5 ผลการทดลอง	48
5.1 ผลที่ได้จากการทดลองเป็นกราฟแรงดันไฟฟ้า (Volt) กับความเร็วของ Web (m/s)	48
5.2 เมื่อนำค่าที่ได้มาเทียบกับการคาร์บริเบทเซ็นเซอร์ก็จะได้ความหนาฟิล์มดังนี้	51
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	56
ข้อเสนอแนะ	56
ภาคผนวก	57
บรรณานุกรม	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนรูปของอนุภาคของไหล	6
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนอัตราความเครียดเฉือน	7
2.3 แสดงรูปทรงกระบอกสัณหีตแบบไม่เสียดรูป	8
2.4 แสดงรูปทรงกระบอกสัณหีตแบบไม่เสียดรูปแบบเส้น	15
2.5 แสดงการแบ่งกริดบนพื้นผิวของการสัณหีต	20
2.6 ตัวอย่างของระบบขนย้ายด้วยฟิล์มบาง(เครื่องผลิตกระดาษ)	27
2.7 การเกิดฟิล์มอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง	27
2.8 Gap-Sensor รุ่น AEC-5505	28
2.8 ข้อมูลจำเพาะของ Gap-Sensor รุ่น AEC-5505	28
2.10 การทำงานของ Gap-Sensor รุ่น AEC-5505	28
2.11 กราฟแสดงโมเดลการแพร่กระจายอากาศสำหรับ Web ที่มีการซึมผ่านและไม่ซึมผ่าน	29
2.12 แสดงชุดทดลองอย่างง่าย	30
2.13 แสดงแบบตัวแผลงชุดทดลอง	30
2.14 แสดงการเจาะรูชิ้นเนื้อ	31
2.15 แสดงแบบของเพลลาขับ	31
2.16 แสดงแบบตัวช่วยประกอบตัวแผ่นใหญ่	32
2.17 แสดงแบบที่ใช้เป็นลูกกลิ้งตัวเล็ก	32
2.18 แสดงแบบตัวเพลลาแกนกลางลูกกลิ้ง	33
2.19 แสดงแบบลูกกลิ้งตัวถ่วงน้ำหนัก	33
2.20 แสดงแบบของชุดทดลอง	34
2.21 แสดงแบบที่มองจากด้านบน	34
3.22 แบบชุดทดลอง	35
3.23 แสดงภาพจำลองขนาดทำการทดลอง	35
3.24 Multimeter (รับค่าจาก converter)	36
3.25 Power supply (เล็ขงมอเคอร์)	36
3.26 Power Supply	37
3.27 Sensor head	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.28 แสดงข้อมูลจำเพาะของ Sensor head	38
3.29 แสดงแบบ Sensor head	38
3.30 Gap Sensor ที่ใช้ในการทดสอบ	39
3.31 แสดงการติดตั้งหัวเซ็นเซอร์	39
3.32 แสดงการติดตั้งมอเตอร์	40
3.33 เครื่องวัดรอบด้วยแสงคิจิตอล	41
3.34 แสดงข้อมูลจำเพาะของ เครื่องวัดความเร็วรอบ	41
3.35 แสดงแบบทางค้ำข้างเพื่อให้เห็นในการคิดเซ็นเซอร์	42
4.36 แสดงแผ่นกระดาษปะด้วยเทปกาอูมินิก 6 cm, 8 cm, 10 cm และ 12 cm	43
4.37 แสดงการติดตั้งเซ็นเซอร์และการปรับแต่งเซ็นเซอร์	44
4.38 แสดงการเปลี่ยนระยะห่างและจุดผลการปรับแต่งค่า	44
4.39 กราฟแสดงการปรับแต่งค่าจากเซ็นเซอร์	45
4.40 แสดงการติดตั้งแผ่นกระดาษกับชุดทดสอบ	46
5.41 แสดงผลการทดลองที่ได้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันกับขนาดความกว้าง ของ Web	48
5.42 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.12$ m	49
5.43 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.10$ m	49
5.44 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.08$ m	50
5.45 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.06$ m	50
5.46 แสดงการเปรียบเทียบทดสอบแผ่น web 4 ขนาดความกว้าง	51
5.47 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.12 m	52
5.48 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.10 m	53
5.49 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.08 m	54
5.50 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.06 m	54
5.51 กราฟเปรียบเทียบการลอยตัวที่ได้จากการคำนวณเทียบกับการทดลอง	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหา

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมจำพวก กระดาษหนังสือพิมพ์, แผ่นฟิล์มดิครอนต์, หรือ แผ่นฟอลย์ การขนย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ระบบลูกกลิ้งลำเดียว ซึ่งการขนย้ายด้วยวิธีการนี้มีความสะดวกรวดเร็ว, ง่าย และ ประหยัด

การออกแบบระบบขนย้ายนั้นต้องคำนึงถึงความเร็วในการขนย้ายและการหมุนของลูกกลิ้ง ถ้า ลูกกลิ้งตัวขับเคลื่อนเร็วเกินไปจะทำให้เกิดการลื่นไถล สาเหตุของการลื่นไถลนั้นเกิดจากการแทรกตัวของอากาศบริเวณด้านในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นวัสดุบาง จึงกลายเป็นฟิล์มอากาศขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Soft Elastohydrodynamic Lubrication air film”

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทดสอบหาความหนาของฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นวัสดุบางที่ได้จากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแล้วนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งคำนวณจากสมการ เรย์โนลด์ส สังเกตผลที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีหรือไม่ และไม่ใกล้เคียงเพราะเหตุใด

1.3 ขั้นตอนของการทำงาน

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบหาความหนาของฟิล์มอากาศ
- 1.3.2 ทดสอบวัสดุที่ความกว้างและความเร็วที่ต่างกัน
- 1.3.3 บันทึกผลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทฤษฎี
- 1.3.4 สรุปผลที่ได้เมื่อเทียบกับทฤษฎีแล้วมีความแตกต่างกันอย่างไร

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาพฤติกรรมความหนาของอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง
- 1.4.2 สร้างชุดทดสอบระบบการขนย้ายฟิล์มบางที่มีลักษณะยึดหยุ่นเพื่อใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 นำแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆ มาทดสอบหาค่าความหนาของฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.4 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎี เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับพฤติกรรมของแผ่นฟิล์มบาง

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการเกิดความหนาของฟิล์มอากาศ และพัฒนาชุดทดสอบความหนาของฟิล์มอากาศต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 คำนิยามของการไหล

ของไหลคือสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องกันไป ภายใต้การกระทำของความเค้นเฉือนหนึ่งๆ ทั้งนี้ไม่ว่าความเค้นเฉือนนั้นจะมีค่าน้อยเท่าใดก็ตาม เมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นผิวหนึ่งๆ ก็คือแรงข้อยในแนวสัมผัสกับพื้น แรงเฉือนนี้หารด้วยพื้นที่ของผิวจะเป็นความเค้นเฉือนเฉลี่ยซึ่งกระทำทั่วพื้นผิวนั้น สำหรับความเค้นเฉือนที่จุดหนึ่งๆ คือค่าลิมิต (Limiting Value) ของแรงเฉือนต่อพื้นที่ผิวซึ่งขณะนั้นพื้นที่มีขนาดลดลงเป็นจุด

การไหลในเชิงกลศาสตร์ หมายถึง การเคลื่อนที่ของสสาร โดยไม่คำนึงถึงแรงกระทำอันเป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ในที่นี้ประกอบด้วย การเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) การเคลื่อนที่ของของไหลถูกเรียกกันโดยทั่วไปว่าการไหล (Flow)

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน และหลักการอนุรักษ์ของมวลสารร่วมกับกฎของอุณหพลศาสตร์ กฎความหนืดของนิวตันและหลักการเกี่ยวกับขอบเขตของของไหล ของไหลที่ถือว่าเป็นพวกอัดตัวไม่ได้นั้นได้แก่ของเหลวทุกชนิด สำหรับก๊าซถ้าหากความดันที่กระทำกับก๊าซนั้นมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความดันสัมบูรณ์แล้วก็อาจถือได้ว่าก๊าซนั้นเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาสถานะของของแข็งและของไหลในเชิงกลจากปฏิกิริยาพื้นฐานของสสารที่เกิดจากแรงต่างๆ เช่น แรงดึง (Tension) แรงอัด (Compression) และแรงเฉือน (Shear) จะพบว่าเมื่อของแข็งได้รับแรงเฉือนจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ส่วนของไหลจะไม่สามารถรับแรงเฉือนได้เลยไม่ว่าจะมีขนาดเท่าใดก็ตาม เพราะเมื่อได้รับแรงเฉือนแล้วของไหลจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างหรือเกิดการไหลทันที การที่กล่าวมาของไหลไม่สามารถรับแรงดึงได้นั้นในทางกายภาพของของไหลสามารถรับแรงดึงได้บ้างเล็กน้อย เพราะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล แต่มีค่าต่ำมากจึงถือเสมือนว่าของไหลไม่สามารถรับแรงดึงได้ ซึ่งเป็นสมมุติฐานของทางวิศวกรรมที่ใช้โดยทั่ว ๆ ไป

2.2 สมบัติฐานและขอบเขตคุณสมบัติของของไหล

ในเชิงวิชาการนั้นการกล่าวถึงการไหลที่ประกอบด้วยเงื่อนไขและคุณลักษณะในการพิจารณาการไหลในแต่ละกรณีนั้นมีความซับซ้อนและละเอียดอ่อนมาก ดังนั้นใจโครงการนี้จึงได้กำหนดขอบเขตสมบัติฐานของคุณสมบัติของของไหลดังต่อไปนี้

2.2.1 ของไหลจริง (Real Fluid or Practical Fluid)

ของไหลจริง (Real Fluid or Practical fluid) หมายถึงของไหลที่มีคุณสมบัติตามธรรมชาติและเกิดขึ้นจริงตามลักษณะการใช้งาน เช่น ความตึงผิวและความสามารถในการอัดตัวได้สำหรับของไหลจริงไม่ว่าจะเป็นของเหลวหรือก๊าซ ถ้าหากมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นแล้วก็ต้องมีแรงต้านแนวสัมผัสหรือแรงเฉือนเกิดขึ้นด้วยเนื่องจากแรงเหล่านี้จะมีทิศทางสวนทางกับทิศทางการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานจากของไหลขึ้นแรงเสียดทานนี้เกิดจากคุณสมบัติอย่างหนึ่งของของไหลที่เรียกว่าความหนืด

2.2.2 ความหนืด

ความหนืดของของไหลเป็นค่าความต้านทานต่อแรงเฉือน หรือเป็นค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปเชิงมุม และแรงเสียดทานในของไหลที่กำลังเคลื่อนที่อยู่เป็นผลมาจากแรงเกาะกันในระหว่างโมเลกุล และการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในระหว่างโมเลกุลของของไหลในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นนั้นความหนืดของของเหลวทุกชนิดจะลดน้อยลง ส่วนความหนืดของก๊าซทุกชนิดกลับเพิ่มขึ้น และให้ทำให้ของไหลที่ช้ากว่านั้นเคลื่อนที่ได้ช้าลง การแลกเปลี่ยนโมเลกุลเช่นนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้น ดังนั้นการเคลื่อนไหวของโมเลกุลก๊าซที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงๆ จึงเป็นสาเหตุทำให้ก๊าซมีความหนืดสูงขึ้น η ที่นี้ของไหลที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของไหลที่มีความหนืด

2.2.3. ของไหลที่กดอัดไม่ได้ (Incompressible Fluid)

ของไหลที่กดอัดไม่ได้ (Incompressible Fluid) หมายถึงของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมากเมื่อมีความดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถที่จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรได้หรือกล่าวได้ว่าของไหลที่กดอัดไม่ได้คือของไหลที่มีความหนาแน่นคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง

2.2.2 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) หมายถึงของไหลชนิดที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ในทิศทางหรือลักษณะที่แน่นอน มีการเคลื่อนที่ช้าลงและมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจากส่วนหนึ่งของของไหลไปยังส่วนอื่นๆ ลักษณะการไหลของของไหลทั่วไปเกือบ 95% จะเป็นการไหลแบบนี้ ตัวอย่างเช่นการไหลของน้ำตามแม่น้ำลำคลอง การไหลของอากาศในท่อลม เป็นต้น

2.2.3 การไหลแบบคงตัว (Steady Flow)

การไหลแบบคงตัว (Steady Flow) หมายถึง การไหลของของไหลชนิดที่ความเร็วของการไหล ณ จุดใดๆ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เช่นเมื่อคำนึงถึงการไหลของของไหลที่ผ่านจุด A ไม่ว่าจะเป็นเวลาใดของการไหลที่ผ่านจุด A นั้นจะมีความเร็วคงที่เสมอและเมื่อพิจารณาที่จุด B ความเร็วของการไหลของของไหลที่ผ่านจุด B ก็จะคงที่ด้วยแต่ความเร็วที่จุด A และจุด B ไม่จำเป็นต้องเท่ากันเนื่องจากเหตุผลที่ว่า ของไหลไม่สามารถที่จะขาดช่วงได้เพราะจะทำให้ความเร็วของของไหล ณ จุดนั้นๆ เปลี่ยนแปลงทฤษฎีที่ใช้กับการไหลคงตัวเป็นทฤษฎีเบื้องต้น และการใช้งานทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ จัดว่าเป็นการไหลของของไหลเป็นแบบคงตัว

2.2.4 การไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow)

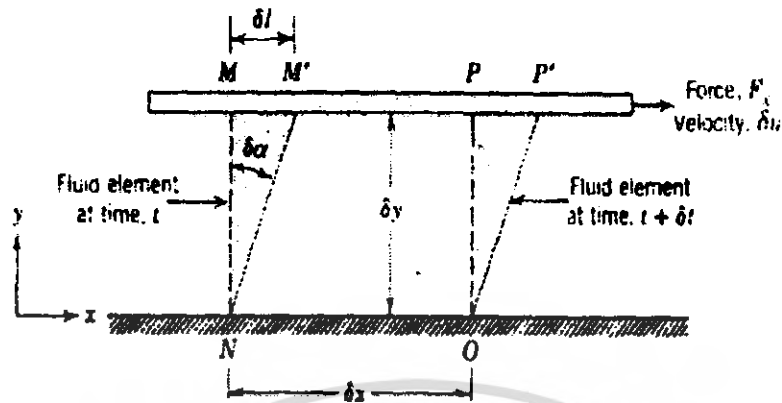
การไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow) หมายถึง การไหลที่มีความเร็ว u ทุกๆ จุดในสนามการไหลคงที่ทั้งขนาดและทิศทางที่เวลาหนึ่ง กล่าวคือ การไหลแบบสม่ำเสมอมีสภาพการไหลที่ไม่แปรเปลี่ยนตามระยะทาง

2.2.5 การไหลสองทิศทาง (Two Dimensional Flow)

การไหลสองทิศทาง (Two Dimensional Flow) หมายถึง การไหลชนิดที่สายธารการไหลเคลื่อนที่ไปบนระนาบเดียวกัน แต่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ตัวอย่างของการไหลสองทิศทาง เช่น การไหลของน้ำในเขื่อน หรือการไหลของอากาศปีกของเครื่องบิน เป็นต้นในการไหลสองทิศทางนี้ ความเร็ว ความดัน ฯลฯ เปลี่ยนแปลงไปตามจุดที่พิจารณา

2.2.6 การไหลแบบไม่มีการหมุนวน (Irrotational Flow)

การไหลแบบไม่มีการหมุนวน (Irrotational Flow) หมายถึง การเคลื่อนที่ของของไหลที่มีความเร็วเชิงมุมหมายความว่า ของไหลทั้งชิ้นเคลื่อนที่ย้ายตำแหน่งโดยไม่มีการหมุน



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนรูปของอนุภาคของไหล

จากรูปที่ 2.1 ของไหลอยู่ระหว่างแผ่นเรียบคู่ขนานซึ่งมีระยะห่างกันเล็กน้อย (Y) โดยแผ่นล่างอยู่กับที่และแผ่นบนเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉือน F พบว่าของไหลในบริเวณระหว่างแผ่นเรียบคู่นี้ถูกกระทำด้วยความเค้นเฉือน F/A โดยที่ A คือพื้นที่ของแผ่นบน เมื่อแรงเฉือน F กระทำต่อแผ่นเรียบบนให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง U จะทำให้ของไหลเปลี่ยนรูปร่างจากพื้นที่ $MNOP$ ไปสู่ตำแหน่งใหม่ในพื้นที่ $M'N'O'P'$ ไม่ว่าขนาดของแรงเฉือน F จะมีค่าน้อยเพียงใดก็ตาม

กำหนดให้ของไหลที่สัมผัสกับผิวของแผ่นเรียบมีความเร็วเท่ากับแผ่นเรียบนั้น (ไม่มีการเลื่อนไถลที่ผิวของแผ่นเรียบ) อนุภาคของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ขนานไปกับแผ่นเรียบจะมีความเร็ว u ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ค่าศูนย์ที่แผ่นเรียบล่างจะถึงที่แผ่นเรียบบน จากการทดลอง พบว่าความเค้นเฉือนของของไหลดังกล่าวแปรผันโดยตรงกับอัตราของความเครียดเฉือน (Rate of Shearing Strain) หรือจะกล่าวได้ว่าแรงเฉือน F นั้นแปรผันตรงกับ A และ U และแปรผกผันกับความหนา Y ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F = \mu \frac{AU}{Y} \quad (2.1)$$

โดยที่สมการ μ คือแฟกเตอร์สัดส่วน (Proportionality Factor) ดังนั้นความเค้นเฉือนคือ อัตราส่วน U/Y คือความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ของเส้น ab หรืออัตราของการเปลี่ยนรูปร่างเชิงมุมของของไหลซึ่ง

เราสามารถเขียนอยู่ในเทอมของ $\frac{du}{dy}$ แทน $\frac{U}{Y}$ ได้คือ

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

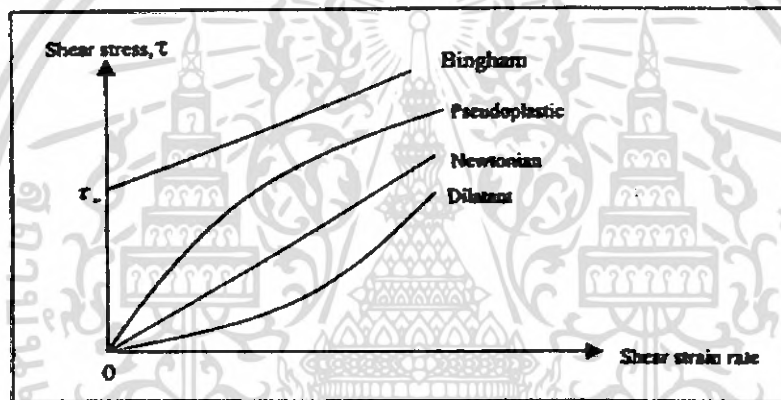
จากสมการที่ (2.2) เรียกว่ากฎของนิวตันสำหรับความหนืด (Newton's Law of Viscosity) ของไหลที่มีพฤติกรรมคั่งสมการที่ (2.2) เราเรียกของไหลแบบนี้ว่าของไหลแบบนิวตัน

โดยที่ τ คือค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress)

μ คือค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity)

$\frac{du}{dy}$ คืออัตราความเครียดเฉือน (Shear Strain Rate)

ดังนั้นจะเห็นว่าสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน (τ , Shear Stress) กับความเครียดเฉือน ($\frac{du}{dy}$, Shear Strain Rate) จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงคั่งแสดงใจรูปที่ 2-2

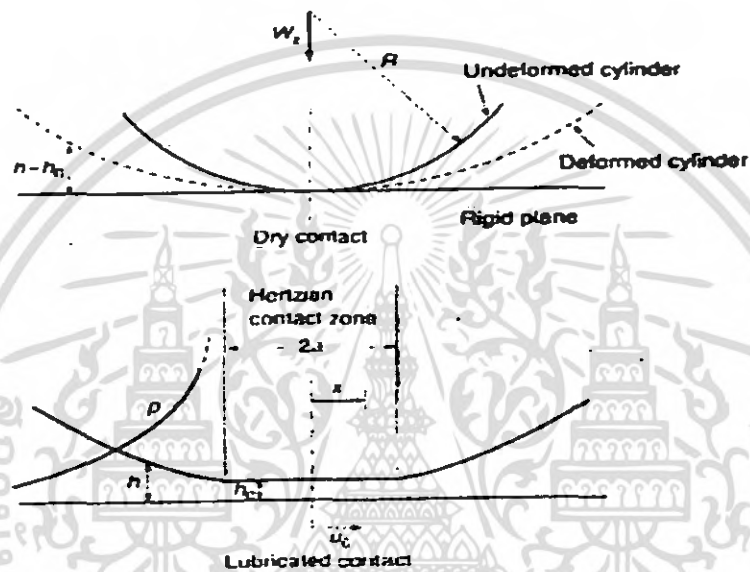


รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนอัตราความเครียดเฉือน

ของไหลที่มีพฤติกรรมไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.2) เราเรียกว่าของไหลอนินิวตัน (Non-Newtonian Fluid) จากรูปที่ 2-2 จะพบว่าของไหลนิวตันนั้นให้ความสัมพันธ์ระหว่าง τ และ $\frac{du}{dy}$ อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้น และของไหลอนินิวตัน ตัวอย่าง ของไหลที่เป็นของไหลแบบนิวตัน เช่น ก๊าซและของเหลวใส ในขณะที่เดียวกันสารไฮโดรคาร์บอนขบจำพวก Thick , Long-Chained Hydrocarbons อาจจัดว่าเป็นของไหลอนินิวตัน

2.3 การสัมผัสแบบเส้น (Line Contact)

เมื่อทรงกระบอกสัมผัส ไม่เสีขรูป (Rigid Cylinder Contact) ค่าความหนืดคงที่ (Isoviscous) ทรงกระบอกแข็งเคลื่อนที่บนผิวระนาบ ในทิศทางแกน X ภายใต้สภาวะคงที่โดยสมมติว่าทั้งทรงกระบอกและแผ่นเรียบมีความยาวมาก ดังนั้นการไหลของสารหล่อลื่น ไหลไปในทิศทางเดียวคือทิศทางตามแนวแกน X สารหล่อลื่นที่ใช้ปริมาตรคงที่ รูปที่ 2.3 จะเขียนสมการเรย์โนลด์อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 แสดงรูปทรงกระบอกสัมผัสแบบไม่เสีขรูป

2.4 สมการเรย์โนลด์

สมการอนุพันธ์ที่รวมการกระจายความดันในสารหล่อลื่นฟิล์มอากาศ คือ สมการเรย์โนลด์ สมการเรย์โนลด์ได้จากสมการนาเวียร์-สโตกส์และสมการความต่อเนื่องที่ประยุกต์จากหลักของกฎทรงมวล

สมมติฐานในการเขียนสมการเรย์โนลด์

1. การไหลในแนวแกนมีน้อยมาก เมื่อพิจารณาว่าโรลเลอร์มีความยาวมาก
2. ไม่คิดแรงภายนอกที่กระทำต่อสารหล่อลื่น เช่นแรงเนื่องจากน้ำหนักของสารหล่อลื่น
3. แรงดันที่เกิดขึ้นในของไหลหรือสารหล่อลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแกนความหนาของของไหล ซึ่งหมายความว่าฟิล์มของสารหล่อลื่นนั้นบางมาก
4. ไม่เกิดการลื่นไถลระหว่างผิวโรลเลอร์กับผิวของสารหล่อลื่น ดังนั้นจะพิจารณาว่าความเร็วของสารหล่อลื่นมีค่าเท่ากับความเร็วของโรลเลอร์ที่หมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สารหล่อลื่นมีคุณสมบัติเป็นแบบนิวตันเนียน (Newtonian fluid)
6. ไม่คิดแรงเฉื่อยของสารหล่อลื่นเนื่องจากสารหล่อลื่นบางมาก
7. ความหนืดของสารหล่อลื่นมีค่าไม่คงที่ และไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ แต่เปลี่ยนแปลงตามความดัน
8. ความหนาแน่นของสารหล่อลื่นไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงตามความดัน

จากการวิเคราะห์ลำดับของขนาดในสมการนาเวียร์-สโตกส์ ไม่พิจารณาเทอมของ h_0/l_0 หรือ h_0/b_0 และเหลือ order 1

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

เงื่อนไขที่สภาวะคงตัว ความดันเป็นฟังก์ชันของ x และ y เท่านั้น อินทิเกรตสมการ (2.3) และ (2.4) ให้ผลทั่วไปสำหรับการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{z}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \tilde{A} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{z}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} + \tilde{C} \quad (2.6)$$

ซึ่ง \tilde{A} และ \tilde{C} เป็นค่าคงที่การจากอินทิเกรต

ความหนืดของสารหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงตรงข้ามกับฟิล์มบาง (ทิศทาง z) เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งสูงขึ้นในบางปัญหาของแบร์ริง
อินทิเกรตสมการ (3.5) และสมการ (3.6) ได้ส่วนประกอบความเร็วเป็น

$$u = \frac{z^2}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \tilde{A} \frac{z}{\eta} + \tilde{B} \quad (2.7)$$

$$v = \frac{z^2}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial y} + \tilde{C} \frac{z}{\eta} + \tilde{D} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าพื้นผิวของแข็งของไหลไม่มีการเลื่อนไหล เงื่อนไขของความเร็วที่ขอบเป็น

$$1. \quad z = 0, u = u_b, v = v_b$$

$$2. \quad z = h, u = u_a, v = v_a$$

a และ b เป็นพื้นผิวบน (ส่วนโค้ง) และพื้นผิวล่าง (ระนาบ) ตามลำดับ ดังนั้น u_b , v_b และ w_b เป็นความเร็วที่พื้นผิวบนในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ และ u_a , v_a และ w_a เป็นความเร็วที่พื้นผิวในทิศทางเช่นเดียวกัน

เงื่อนไขที่ขอบประยุกต์กับสมการ (2.7) และ (2.8) การเปลี่ยนแปลงความเร็วและส่วนประกอบความเร็ว มีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \left(\frac{2z-h}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{u_b - u_a}{h} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \left(\frac{2z-h}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{v_b - v_a}{h} \quad (2.10)$$

$$u = -z \left(\frac{h-z}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial x} + u_b \frac{h-z}{h} + u_a \frac{z}{h} \quad (2.11)$$

$$v = -z \left(\frac{h-z}{2\eta} \right) \frac{\partial p}{\partial y} + v_b \frac{h-z}{h} + v_a \frac{z}{h} \quad (2.12)$$

ค่าความเค้นเฉือนของความหนืดกระทำกับของแข็งได้แก่

$$\tau_{zx} = \eta \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.13)$$

$$\tau_{zy} = \eta \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.14)$$

ขนาดของ $\partial w/\partial x$ และ $\partial w/\partial y$ พิจารณาให้เล็กมาก เมื่อเทียบกับ $\partial u/\partial z$ และ $\partial v/\partial z$ ดังนั้นสมการ (3.13) และ (3.14) ลดรูปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{zx} = \eta \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.15)$$

$$\tau_{zy} = \eta \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.16)$$

และความเค้นเฉือนความหนืดที่กระทำผิวของแข็งจากสมการ (2.9) และ (2.10) สามารถลดรูปได้ดังนี้

$$(\tau_{zx})_{z=0} = \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\eta(u_b - u_a)}{h} \quad (2.17)$$

$$(-\tau_{zx})_{z=h} = -\left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=h} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\eta(u_b - u_a)}{h} \quad (2.18)$$

$$(\tau_{zy})_{z=0} = \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=0} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\eta(v_b - v_a)}{h} \quad (2.19)$$

$$(-\tau_{zy})_{z=h} = -\left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=h} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\eta(v_b - v_a)}{h} \quad (2.20)$$

เครื่องหมายลบของความเค้นเฉือนความหนืดแสดงว่าอยู่ตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ อัตราการไหลของปริมาตรต่อหน่วยความกว้างในทิศทาง x และ y

$$q'_x = \int_0^h u dz \quad (2.21)$$

$$q'_y = \int_0^h v dz \quad (2.22)$$

แทนสมการ (2.11) และ (2.12) ในสมการ (2.21) และ (2.22) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q'_x = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_z + u_b}{2} h \quad (2.23)$$

$$q'_y = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{v_z + v_b}{2} h \quad (2.24)$$

สมการความต่อเนื่องในรูปอินทิเกรต

$$\int_0^h \left[\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \right] dz = 0 \quad (2.25)$$

กฎของการอินทิเกรต

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x} [f(x, y, z)] dz = -f(x, y, z) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_0^h f(x, y, z) dz \right] \quad (2.26)$$

สมมติให้ ρ เป็นความหนาแน่นกระทำเฉลี่ยเหนือฟิล์ม เหนือของ u ในสมการความต่อเนื่องรูปอินทิเกรตได้

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) dz = -(\rho u)_{z=h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^h \rho u dz \right) = -\rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \int_0^h u dz \right) \quad (2.27)$$

เช่นกันสำหรับเทอม v

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) dz = -\rho v_a \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \int_0^h v dz \right) \quad (2.28)$$

อินทิเกรตเทอมของ w จะได้

$$\int_0^h \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) dz = \rho (w_a - w_b) \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอินทิเกรตสมการความต่อเนื่องจะได้

$$h \frac{\partial p}{\partial t} - \rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \int_0^h u dz \right) - \rho v_a \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \int_0^h v dz \right) + \rho (w_a - w_b) = 0 \quad (2.30)$$

อินทิเกรตสมการความต่อเนื่องจะได้อัตราการไหลของปริมาตรต่อหน่วยความกว้าง (q'_x และ q'_y)

ดั่งสมการ (3.23) และ (3.24) ได้สมการเรย์โนลด์รูปทั่วไป

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h (u_a + u_b)}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho h (v_a + v_b)}{2} \right] + \rho (w_a - w_b) - \rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} - \rho v_a \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.31)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวราบ $w_a = u_a \frac{\partial h}{\partial x} + v_a \frac{\partial h}{\partial y}$ และ $w_b = 0$ สมการเรย์โนลด์ในสมการ (3.31) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial}{\partial y} \right) = 12\tilde{u} \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 12\tilde{v} \frac{\partial(\rho h)}{\partial y} \quad (2.32)$$

$$\tilde{u} = \frac{u_a + u_b}{2} = \text{constant} \quad \tilde{v} = \frac{v_a + v_b}{2} = \text{constant}$$

สมการดังกล่าวใช้กับสารหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ และสารหล่อลื่นแลอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์คุณสมบัติของของไหลจะไม่เปลี่ยนแปลงผ่านแบบริงอย่างเห็นได้ชัด เพราะฉะนั้นอาจพิจารณาให้เป็นค่าคงที่เช่นเดียวกันสำหรับสารหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ การเคลื่อนที่แบบลูกกลิ้งจะให้ \tilde{v} เป็นศูนย์ดังนั้นค่าที่สอดคล้องกับสมการเรย์โนลด์คือ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\tilde{u} \eta_0 \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (2.32) ไม่เพียงใช้กันคุณสมบัติของของไหลที่เปลี่ยนแปลงในทิศทาง x และ y เท่านั้น แต่ยังใช้กับผิวเบร้งที่มีความขาวอนันต์ในทิศทาง y การร้าวด้านข้างหรือการไหลในทิศทาง y สัมพันธ์กับเทอมที่สองในสมการ (2.32) และ(2.33) ถ้าความดันในชั้นสารหล่อลื่นเป็นฟังก์ชันกับ x และ y ปัญหาในสมการ (2.32) จะไม่พบในการวิเคราะห์บ้อยนัก

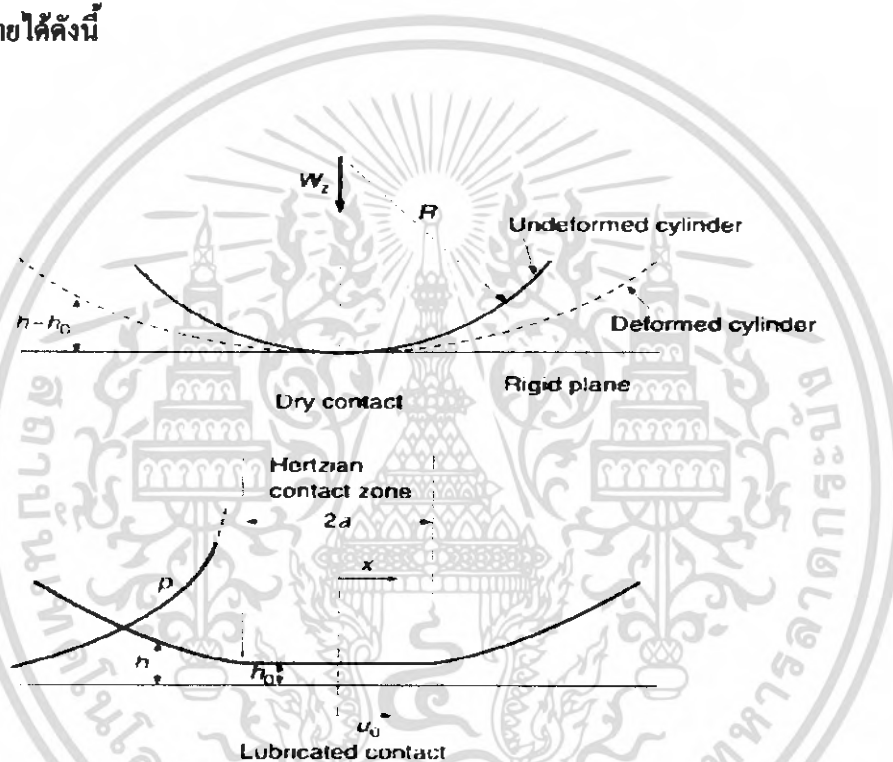
2.5 ทฤษฎีพื้นฐาน (Fundamental equations)

ในการหล่อลื่นแบบอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ ซึ่งจะพิจารณาถึงลักษณะของรูปร่างของของแข็งที่มีการเสีรูปร่างแบบยืดหยุ่น ซึ่งเป็นผลมาจากการหล่อลื่นแบบอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ ซึ่งการหล่อลื่นแบบอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์มีความสำคัญมากในการสัมผัสที่มีไหลคามากๆ เช่น การสัมผัสแบบจุดของบอลเบร้ง การสัมผัสแบบเส้นของโรลเลอร์เบร้ง การสัมผัสแบบจุดและเส้นของฟันเกียร์ คังรูปที่ 1 และ ในการสัมผัสที่มีไหลคามากๆ ความดันสูงจะทำให้ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นและการเสีรูปร่างแบบยืดหยุ่นของส่วนที่สัมผัสกับการเปลี่ยนแปลงความสมมาตรของผิวที่สัมผัสแบบเซอร์เซียน ในส่วนของโรลเลอร์เบร้ง และของเกียร์จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ถึง 3 Gpa. ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ความดันนี้จะมีค่าที่สูงมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของของแข็งในส่วนที่เกิดการสัมผัสกัน การเสีรูปร่างแบบยืดหยุ่นของผิวโลหะจะเป็นไปตามขนาดของความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด

ในการหล่อลื่นอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ เราจะใช้สมการเรย์โนลด์์ประยุกต์, สมการแสดงการเสีรูปร่าง และสมการความสัมพันธ์ของค่าความหนืดแรงดัน อัตราแรงเฉือนและผลจากความร้อนก็มีความสำคัญมากเช่นกันในกรณีที่มีไหลคามากๆ ซึ่งในปัจจุบันก็มีการพัฒนาการวิเคราะห์ขึ้นมามาก ทำให้ทราบถึงการกระจายแรงดันและความหนาของฟิล์ม จากการศึกษาที่ผ่านมาเช่น กรูบิน (Grubin; 1949) ได้ศึกษาถึงการพัฒนาวีธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการเสีรูปร่างแบบยืดหยุ่นและคุณสมบัติของค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องมาจากแรงดันของสารหล่อลื่น ในปัญหาการหล่อลื่นแบบอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ เขาได้ให้ลักษณะความหนาของฟิล์มและการกระจายของแรงดันในการสัมผัสแบบเส้น เขาได้อธิบายถึงความหนาของฟิล์มที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฮโดรไดนามิกส์ ในปี คศ.1959 คอร์ดันและฮิกกินสันได้พัฒนาขบวนการความสัมพันธ์ในการแทนค่าซ้ำๆ ในการแก้ปัญห และได้พัฒนาสูตรสำหรับความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด และยังพบว่าไหลคามีผลน้อยแต่ค่าความเร็วมีผลต่อลักษณะของฟิล์มมากกว่า ลาเตอร์ และเซง ได้พัฒนาต่อจากกรูบินในการนำมาใช้กับการสัมผัสแบบวงรี

และการสัมผัสแบบเซอร์เชียน ต่อมาในปี ค.ศ.1970 แฮมรอก และ คอร์สัน ได้พัฒนาวิธีทางเชิงตัวเลข ในการแก้ปัญหาแบบอีลาสโตโรไดนามิกส์ของโรลเลอร์เบริง

2.6 การสัมผัสแบบเส้น (Line Contact) เมื่อทรงกระบอกสัมผัส ไม่เสีรูป (Rigid Cylinder Contact)
 ค่าความหนืดคงที่ (Isoviscous) พิจารณาว่าความกว้างมาก ทรงกระบอกแข็งเคลื่อนที่บนผิว ราบนาบ ในทิศทางแกน X ภายใต้สภาวะคงที่ สารหล่อลื่นที่ใช้ปริมาตรคงที่ รูปที่ 2.4 จะเขียนสมการ เรย์-โนคส์อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.4 แสดงรูปทรงกระบอกสัมผัสแบบ ไม่เสีรูปแบบเส้น

สมการเรย์โนคส์ที่ใช้

$$\frac{dP}{dX} = 12\eta u_0 \left(\frac{h-h_m}{h^3} \right) \quad (2.34)$$

กรณีที่ ทรงกระบอกเป็นวัตถุแข็งเกร็งจะให้ความหนาของฟิล์มน้อยที่สุดเท่ากับ h_0 , ซึ่งเขียนได้ ในรูปของสมการพาราโบลิก ดังนี้

$$h \approx h_0 + \frac{x^2}{2r} \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการ 2 ลงในสมการ 1 โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขต $P = 0$ ที่ $x = \pm\infty$ ซึ่งจะแก้สมการได้ (Dowson and Higginson, 1966 ; Williams, 1994)

$$P_{\max} \approx 2.15\eta_0 \bar{u}(R/h_0^3)^{1/2} \quad (2.36)$$

2.7 ค่าความหนืดไม่คงที่ (Variable Viscosity)

ค่าความหนืด η_0 ในสมการเรย์โนลด์ เป็นฟังก์ชันของแรงดันซึ่งจะให้

$$\eta = \eta_0 \exp(\xi P) \quad (2.37)$$

เมื่อ ξ คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด - แรงดัน และ η_0 เป็นค่าความหนืดสัมบูรณ์ที่แรงดันบรรยากาศ ซึ่งค่าที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

$$P = -\frac{1}{\xi} \ln(1 - \xi Pr) \quad (2.38)$$

เมื่อแทนค่าสมการ 2.38 ลงในสมการ 2.34 จะได้

$$\frac{dPr}{dX} = 12\eta_0 \bar{u} \left(\frac{h-h_m}{h^3} \right) \quad (2.39)$$

จะเห็นว่าสมการเรย์โนลด์ (2.39) จะเหมือนกับสมการที่ (2.34) เมื่อค่าความหนืดคงที่ เมื่อทำการแก้สมการ จะได้แรงดันสูงสุดเมื่อค่าความหนืดเปลี่ยนแปลง

$$Pr_{\max} \approx 2.15\eta_0 \bar{u}(R/h_0^3)^{1/2} \quad (2.40)$$

และค่าความหนาของฟิล์มที่น้อยที่สุดเมื่อค่าแรงดันสูงสุด

$$h_0 = 1.66(\alpha\eta_0 \bar{u})^{2/3} R^{1/3} \quad (2.41)$$

2.8 ทรงกระบอกที่สัมผัสมีการยืดหยุ่นและค่าความหนืดไม่คงที่ (Elastic Cylinder Contact and Variable Viscosity)

ในการสัมผัสลักษณะนี้ ส่วนที่ยืดหยุ่นจะเสีรูปร่าง ยกเว้นกรณีที่โหลดน้อยๆ การเสีรูปร่างที่น้อยจะมีผลมาจากแรงดันไฮโดรไดนามิกส์ ปัญหาการหล่อลื่นแบบอิลาสโตรไฮโดรไดนามิกส์จะแก้โดยสมการเรย์โนลด์ และสมการยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาว่าทรงกระบอกยืดหยุ่นยาวมากหมุนอยู่บนระนาบดังรูป 2 จะ

เห็นว่าทรงกระบอกจะแบนราบตรงบริเวณที่สัมผัสกับระนาบบนช่วงของการสัมผัสแบบเฮอริเซียน (Hertzian contact) และตามระดับของช่วงนอกของทรงกระบอก ซึ่งช่วงที่มีการสัมผัสจนเสีรูปร่างราบจะมีความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด h_0 และค่าแรงดันบริเวณนั้นก็สูงและกระจายตัวใกล้กับช่วงของเฮอริเซียน ดังนั้นความดันสูงสุดของสารหล่อลื่นในการสัมผัสจะถึงที่สุดลงเท่าการสัมผัสแบบแห้ง ในการคำนวณหาแรงดัน ซึ่งจะเกิดสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่สัมผัสเป็นแบบเฮอริเซียน ค่า $h-h_0$ จะมีค่าน้อยมากๆ หรืออาจเท่ากับศูนย์ ดังนั้นค่าความหนาฟิล์มจะคงที่บนช่วงที่ค่าแรงดันสูง จะหาได้ดังนี้

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2r} + w \quad (2.42)$$

เมื่อ w คือค่าที่รวมการเสีรูปร่างของทั้งสองส่วน (Dawson and Higginson, 1996)

$$w = -\frac{1}{\pi E^*} \int_{x_{min}}^{x_{end}} P(s) \ln(x-s)^2 ds \quad (2.43)$$

และ

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2.44)$$

และสมการแสดงความหนาแน่นของสารหล่อลื่น

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1.7 \times 10^{-9} p} \quad (2.45)$$

2.9 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oils)

น้ำมันหล่อลื่นคือสารหล่อลื่นที่เป็นของไหล ซึ่งจะทำหน้าที่ในการลดแรงเสียดทานระหว่างผิวที่มีการสัมผัสกัน ในน้ำมันหล่อลื่นจะประกอบด้วย น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและสารเพิ่มคุณภาพ ซึ่งนอกจากน้ำมันหล่อลื่นจะมีบทบาทสำคัญในการลดแรงเสียดทานแล้วยังช่วยลดความสึกหรอของชิ้นส่วนที่สัมผัสกันอีกด้วย

2.10 คุณสมบัติของสารหล่อลื่น (Lubricant Properties)

ค่าความหนืด (Viscosity)

ค่าความหนืดจะหมายถึงความใส หรือความเข้มข้นของสารหล่อลื่น โดยจะวัดที่อุณหภูมิใด อุณหภูมิหนึ่งสารหล่อลื่นที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่าย และชั้นฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นบาง ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดสูงจะไหลได้ยาก โดยให้สารหล่อลื่นที่มีชั้นฟิล์มหนากว่ามีความหนืดต่ำ หน่วยวัดจะมีหลายระบบ ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามสภาวะอุณหภูมิที่ทำการวัด ดังแสดงในตาราง ตาราง แสดงหน่วยวัดความหนืดของระบบต่างๆ

ค่าความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity)

ประเทศหรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ในการวัด
1. ระบบสากล (เมตริก)	Centistoke (cSt.)	40°C. และ 100°C.
2. สหรัฐอเมริกา	Saybolt Universal Second	100°C. และ 210°C.
3. เยอรมัน	(SSU)	20°C, 50°C และ 100°C.
4. สหราชอาณาจักร	Engler (°E) Redwood No.1 (RW1)	70°F. , 100°F และ 200°F

ค่าความหนืดสัมบูรณ์จะเป็นการกำหนดความหนืดของสารหล่อลื่นเมื่อทำการวัดที่ความดันเป็นศูนย์ และที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ที่คงที่ ซึ่งหน่วยความหนืดมี 3 ระบบที่แตกต่างกันคือ

ระบบเอสไอ (SI) : Ns/m^2 หรืออาจเขียนได้อีกแบบ Pa.s

ระบบซีจีเอส(cgs) : dyn.s/cm^2 หรือเรียกว่า พอยซ์ เมื่อ $1 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ P}$

ระบบอังกฤษ : lb.f.s/in^2

ในการแปลงหน่วยจะแสดงดังตาราง

แปลงจาก	ไปยัง			
	cP	Kgf.s/m ²	N.s/ m ²	lb.f.s/ in ²
	คูณด้วย			
CP	1	1.02×10^{-4}	10^{-3}	1.45×10^{-7}
Kgf.s/m ²	9.807×10^3	1	9.807	1.422×10^{-3}
N.s/ m ²	10^{-3}	1.02×10^{-1}	1	1.45×10^{-4}
lb.f.s/ in ²	6.9×10^2	7.03×10^2	6.9×10^3	1

2.11 การคำนวณ

สมการเรย์โนลด์ เป็นสมการหลักในการหล่อลื่นที่ใช้ในการอธิบายการเกิดแรงดันของของไหล ในขณะที่ของไหลไหล เป็นแผ่นฟิล์มบางโดยที่ฟิล์มของไหลนี้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กตามทิศทางของไหล ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดแรงดันขึ้นในของไหล จากในกรณีนี้ได้ประยุกต์สมการเรย์โนลด์กับการหล่อลื่นแบบฮิดราโตรีไฮโดรไดนามิกส์ จะได้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\bar{u} \left(\frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \right) + 12\bar{v} \left(\frac{\partial(\rho h)}{\partial y} \right) \quad (1.46)$$

ดังนั้นจากข้อสมมุติจะทำให้ได้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12\bar{u} \left(\frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \right) \quad (2.47)$$

ทำการอินทิเกรตจะได้

$$\therefore \frac{\partial p}{\partial x} = 12\bar{u} \eta \left(\frac{\rho h - \rho_m h_m}{\rho h^3} \right) \quad (2.48)$$

เมื่อกำตัวแปรต่างๆ ดังนี้

U คือค่าความเร็วแบบไร้หน่วย $\frac{\eta_0 \bar{u}}{E' R}$

W คือค่าโหลดแบบไร้หน่วย $\frac{W_z}{E' R}$

G คือค่าวัสดุแบบไร้หน่วย $\alpha E'$

ทำสมการ (2.48) ให้เป็นตัวแปรแบบไร้หน่วย เมื่อ

$$p = p_H P_r$$

$$\rho = \rho_0 \bar{\rho}$$

$$\eta = \eta_0 \bar{\eta}$$

$$x = R_x \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^{1/2} X_r$$

$$h = \frac{8R_x W'}{\pi} H_r$$

$$p_H = E' \left(\frac{W'}{2\pi} \right)^{1/2}$$

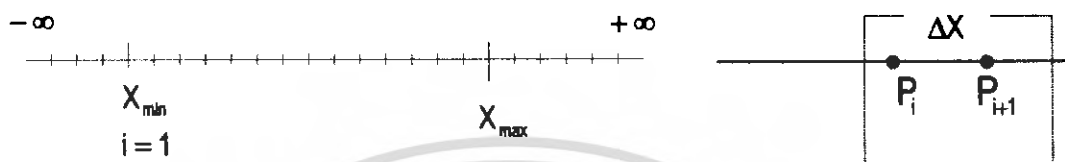
จะได้สมการเรย์โนลด์ประยุกต์แบบไร้หน่วย ดังนี้

$$\frac{p_H dP_r}{R_x \left(\frac{8W'}{\pi} \right)^{1/2} dX_r} = 12 \left(\frac{U E' R_x}{\eta_0} \right) (\eta_0 \bar{\eta}_i) \left(\frac{\rho_0 \bar{\rho}_i \left(\frac{8R_x W'}{\pi} \right) H_{r,i} - \rho_0 \bar{\rho}_m \left(\frac{8R_x W'}{\pi} \right) H_{r,m}}{\rho_0 \bar{\rho}_i \left(\left(\frac{8R_x W'}{\pi} \right) H_{r,i} \right)^3} \right)$$

$$\frac{dP_r}{dX_r} = \left(\frac{3U\pi^2}{4(W')^2} \right) \eta_i \left(\frac{\bar{\rho}_i H_{r,i} - \bar{\rho}_m H_{r,m}}{\bar{\rho}_i H_{r,i}^3} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \left(\frac{dP_r}{dX_r} \right)_i = \bar{K} \eta_i \left(\frac{\bar{\rho}_i H_{r,j} - \bar{\rho}_m H_{r,m}}{\rho_i H_{r,j}^3} \right), \quad \bar{K} = \frac{3U\pi^2}{4(W')^2} \quad (2.49)$$



รูปที่ 2.5 แสดงการแบ่งกริดบนพื้นผิวของการสัมผัส

2.12 การประยุกต์วิธีเชิงตัวเลข

จากรูปที่ 2 แสดงการแบ่งกริดของการสัมผัสซึ่งจะใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference scheme) โดยใช้ Forward difference approximation คำนวณในรูปที่ 2 เราสามารถเขียนรูปแบบของความดันที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta X} \quad (2.50)$$

ในสมการเรย์โนลด์ประยุกต์เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงตัวเลขได้ โดยในเอกสารนี้ จะพิจารณาเลือกใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เพื่อแก้สมการหาค่าการกระจายแรงดันของฟิล์มน้ำมันที่เกิดจากการสัมผัส ได้ดังนี้

ทำการจัดรูปสมการ (16) ใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{f}_i &= H_{r,j}^3 \left(\frac{dP_r}{dX_r} \right)_i - \bar{K} \eta_i \left(H_{r,j} - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \right) \\ &= H_{r,j}^3 \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\Delta X} \right) - \bar{K} \eta_i \left(H_{r,j} - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \right) \\ &= H_{r,j}^3 (P_{i+1} - P_i) - \bar{K} \Delta \eta_i \left(H_{r,j} - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \right) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore \bar{f}_i = H_{r,j}^3 (P_{i+1} - P_i) - \bar{K} \Delta \eta_i \left(H_{r,j} - \frac{\rho_m H_m}{\rho_i} \right) = 0 \quad (2.51)$$

สมการความหนาพิถัมที่รวมผลจากการเสีขรูปแบบยี่หุ่่น

$$H_{r,j} = H_{r,0} + \frac{X_i^2}{2} - \frac{\Delta X}{2\pi} \sum_{j=1}^N P_j \ln \left(\frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \right) \quad (2.52)$$

สมการความหนืดที่มีผลเปลี่ยนแปลงตามแรงคั้น ค้งนี้

$$\bar{\eta}_i = \exp \left\{ \ln(\eta_0) + 9.67 \left[-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,j})^{1.1} \right] \right\} \quad (2.53)$$

สมการความหนาแน่นที่มีผลเปลี่ยนแปลงตามแรงคั้น ค้งนี้

$$\bar{\rho}_i = 1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,j}}{1 + 1.7 \times 10^{-9} \rho_H P_{r,j}} \quad (2.54)$$

สมการแสดงการบาลานซ์ไหลค

$$\int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} P_r dX = \frac{\pi}{2} \quad (2.55)$$

จากสมการนิวตัน – ราฟสัน จะเห็นว่าแต่ละโนคที่พิจารณจะมีรูปแบบค้งนี้

$$\left[\frac{\partial f_i}{\partial \rho_m H_m} \right]^0 [\Delta(\rho_m H_m)]^0 + \sum_{j=2}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial P_{r,j}} \right) (\Delta P_{r,j})^0 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial H_{r,0}} \right) (\Delta H_{r,0})^0 = -f_i^0 \quad (2.56)$$

ค่าค้งที่ในการบาลานซ์ไหลคแบบไร้หน่วย จะหาได้ค้งนี้

$$\begin{aligned} \int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} (\Delta P_r)^0 dX &= \frac{\pi}{2} - \int_{X_{r,min}}^{X_{r,end}} (P_r)^0 dX_r \\ &= \frac{\pi}{2} - \sum_{j=2}^N C_j (\Delta P_{r,j})^0 \end{aligned} \quad (2.57)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.51) , (2.52) , (2.53) , (2.54) และ (2.55) ก็จะสามารรถแก้สมการหาตัวแปรที่ไม่ทราบได้คือ

$$\rho_m H_{r,m} , H_0 , P_{r,j}$$

นำตัวแปรต่างๆ มาแทนในสมการของเรย์โนลด์และแก้สมการด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ดังนี้

$$\begin{aligned} (\rho_m H_{r,m})^n &= (\rho_m H_{r,m})^0 + [\Delta(\rho_m H_{r,m})]^n \\ P_{r,j}^n &= P_{r,j}^0 + (\Delta P_{r,j})^n \\ H_{r,0}^n &= H_{r,0}^0 + (\Delta H_{r,0})^n \end{aligned} \quad (2.58)$$

จัดรูปแบบเมทริกได้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_1}{\partial H_{r,0}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_2}{\partial H_{r,0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial \rho_m H_{r,m}} & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,2}} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial P_{r,N}} & \frac{\partial f_N}{\partial H_{r,0}} \\ 0 & C_1 & \dots & C_N & 0 \end{bmatrix}^0 \begin{Bmatrix} \Delta(\rho_m H_{r,m})^n \\ \Delta(P_{r,2}) \\ \vdots \\ \Delta(P_{r,N}) \\ \Delta(H_{r,0}) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -f_1 \\ -f_2 \\ \vdots \\ -f_N \\ \Delta W' \end{Bmatrix}^0 \quad (2.59)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial f_i}{\partial H_0} = 3H_{r,i}^2 (P_{i+1} - P_i) - \Delta X K \eta_i \quad (2.60)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial (\rho_m H_{r,m})} = \frac{\Delta X K}{\rho_i} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial P_j} &= H_{r,i}^3 (\delta(i+1,j) - \delta(i,j)) + (P_{i+1} - P_i) (3H_{r,i}^2) \left(\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} \right) - \Delta X K \left[\eta_i \left(\frac{\partial H_{r,i}}{\partial P_j} \right) + H_{r,i} \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} \right) \right. \\ &\quad \left. - \eta_i \left[\frac{\rho_i \Delta \rho_m H_{r,m} - \rho_m H_{r,m} \frac{\partial \rho_i}{\partial P_j}}{\rho_i^2} \right] - \frac{\rho_m H_{r,m}}{\rho_i} \frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} \right] \end{aligned} \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\frac{\partial H_i}{\partial P_j}$, $\frac{\partial \eta_i}{\partial P_j}$, $\frac{\partial p_i}{\partial P_j}$ จะหาได้ดังนี้

$$\frac{\partial H_{r,j}}{\partial P_j} = -\frac{\Delta X}{2\pi} \ln \left\{ \left| \frac{X_{i+1} + X_i}{2} - X_j \right| \left| \frac{X_{i-1} + X_i}{2} - X_j \right| \right\} \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial P_j} = \exp \left\{ \left[\ln \eta_0 + 9.67 \right] \left[-1 + (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,j})^{z_1} \right] \right\} \left[\ln \eta_0 + 9.67 \right] (z_1) (1 + 5.1 \times 10^{-9} p_H P_{r,j})^{z_1 - 1} (5.1 \times 10^{-9} p_H) \delta(i, j) \quad (2.64)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial P_j} = \frac{0.6 \times 10^{-9} p_H \delta(i, j)}{(1 + 1.7 \times 10^{-9} p_H P_{r,j})^2} \quad (2.65)$$

สมการแสดงการสมมุติแรงค้ำเริ่มต้นในการคำนวณ จะให้มีการกระจายแรงค้ำแบบเฮิร์ท ดังนี้

$$P_{r,j} = \sqrt{1 - X^2} \quad (2.66)$$

2.13 ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนในการวัด

การวัดหมายถึง การที่ผู้วัดนำเอาปริมาณฟิสิกส์ที่กำลังพิจารณาไปเปรียบเทียบกับปริมาณมาตรฐานด้วยเครื่องวัดชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งผลการวัดจะเป็นจำนวนเท่าของปริมาณมาตรฐานนั้น ผลการวัดประกอบด้วยตัวเลขจำนวนเท่า และหน่วยซึ่งบอกว่าผู้วัดได้เปรียบเทียบกับปริมาณมาตรฐานใด เช่น วัดความยาวได้ 3.62 เมตร หมายความว่า ความยาวที่วัดได้เป็น 3.62 เท่าของความยาว 1 เมตร มาตรฐานความแตกต่างระหว่างผลการวัดกับค่าจริงของปริมาณนั้น เป็นความคลาดเคลื่อน (Errors) ของการวัด ซึ่งผลการวัดโคมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมาก เรียกว่า ผลการวัดนั้นมีความแม่นยำ (Accuracy) สูง นอกจากนี้ในการวัดปริมาณหนึ่ง ๆ อาจจะทำการวัดหลายครั้ง ผลการวัดแต่ละครั้งก็ไม่จำเป็นจะต้องเท่ากันเสมอไป อย่างไรก็ตาม ถ้าผลของการวัดหลาย ๆ ครั้งนั้น ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก เรียกว่า ผลการวัดนั้นมีความเที่ยงตรง (Precision) สูง เครื่องมือวัดที่ดีมีคุณภาพสูง จะให้ผลการวัดที่มีความเที่ยงตรง เช่น เวอร์เนียคาลิเปอร์ กับไม้บรรทัด โดยที่เวอร์เนียคาลิเปอร์จะวัดได้ละเอียดกว่า และมีค่าละเอียดที่สุด (Least Count) ที่อ่านได้ถึง ทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ของเซนติเมตร (0.01 ซม.) ในขณะที่ไม้บรรทัดมีค่าละเอียดที่สุด เพียงทศนิยมตำแหน่งแรกของเซนติเมตร (0.1 ซม.) เท่านั้น ดังนั้น ผลการวัดด้วยเวอร์เนียหลาย ๆ ครั้ง จึงมีความแตกต่างกันไม่มากนัก นั่นคือ มีความเที่ยงตรงมากกว่า

ผลการวัดด้วยไม้มบรรทัด อย่างไรก็ตาม เวอร์เนอร์คาลิปเปอร์ที่ชำรุดก็จะให้ผลการวัดที่ไม่มีความแม่นยำและไม่มีความเที่ยงตรงได้ เพราะผลการวัดจะผิดไปจากค่าจริงมาก และอาจจะไม่แน่นอนด้วย สำหรับในทางปฏิบัติ เครื่องมือที่มีคุณภาพที่ดี ซึ่งให้ผลการวัดที่มีความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูง มักจะมีราคาแพง มีการใช้งานที่ยุ่ยยากและมีข้อจำกัดมาก การทดลองบางอย่างไม่จำเป็นต้องใช้ผลการวัดที่ถูกต้องนัก ก็ให้ผลการทดลองที่เชื่อถือได้ ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องวัดที่ดีเยี่ยม จึงไม่ใช่ความจำเป็นเสมอไป นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของผลการวัด ยังขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้วัดเอง และลักษณะธรรมชาติของปริมาณที่วัดนั้นด้วยการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมระหว่างทำการวัดก็มีผลต่อความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับผลการวัด ตลอดจนผลของการทดลองแบ่งได้เป็น 2 ชนิด แต่ละชนิดเกิดจากสาเหตุที่แตกต่างกันและมีวิธีการจัดการต่างกัน คือ

1) ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทุกครั้งที่ทำการวัด หรือการทดลองเกิดขึ้นจากเงื่อนไขต่าง ๆ ที่แปรเปลี่ยนไปอย่างควบคุมไม่ได้ ซึ่งเกิดขึ้นได้กับผู้วัด เครื่องวัด และปริมาณที่วัด ตลอดจนเงื่อนไขต่าง ๆ ของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในการวัดด้วยไม้มบรรทัดผู้วัดต้องประมาณว่าที่อยู่ระหว่างช่องสเกล 0.1 ซม. หรือการอ่านเข็มที่กำลังสั่งอยู่ตลอดเวลาบนหน้าปัดมิเตอร์ เป็นต้น อาศัยพื้นฐานทางสถิติ พอจะบอกได้ว่าความคลาดเคลื่อนแบบนี้ มีโอกาสเกิดขึ้นไป ทางบวกเท่า ๆ กับทางลบ การแก้ไขความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มนี้ จึงทำได้ด้วยการเฉลี่ยผลการวัดจำนวนมากครั้ง สำหรับผลการวัดที่มีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มเพียงอย่างเดียว ถือว่าค่าจริงเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลการวัดจำนวนอนันต์ครั้ง

2) ความคลาดเคลื่อนแบบเป็นระบบ (Systematic Error) เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับการวัด และการทดลองที่ใช้วิธีการที่ผิด ความบกพร่องของเครื่องมือวัด หรือการใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ไม่สมบูรณ์พอ ความคลาดเคลื่อนแบบนี้ จะมีขนาดและทิศทางคงที่ หรือมีเงื่อนไขที่แน่นอนอย่างใดอย่างหนึ่ง จึงไม่สามารถกำจัดความคลาดเคลื่อนแบบนี้ ด้วยการเฉลี่ยเช่นเดียวกับแบบแรก ซึ่งความคลาดเคลื่อนแบบนี้ค่อนข้างสำคัญ เพราะถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อนของการทำการทดลอง ผู้ทดลองต้องหาสาเหตุและแก้ไขไปที่ละอย่าง ตัวอย่างเช่น ไมโครมิเตอร์เครื่องหนึ่ง ไม่ได้ชี้ที่ขีดศูนย์ขณะที่ปลายทั้งสองข้างแตะกันพอดี ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนขีดศูนย์ (Zero Error) ผลการวัดด้วยไมโครมิเตอร์อันนี้ จะมากไปหรือน้อยไปเท่ากับความคลาดเคลื่อนขีดศูนย์นี้ทุก

ครั้ง ผลการวัดที่อ่านได้ จึงต้องนำค่าความคลาดเคลื่อนชนิดสุญญัตลบออก หรือบวกเพิ่มเข้าไป เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

2.13.1 ช่วงความคลาดเคลื่อน และการประมาณค่าความคลาดเคลื่อน

ในการวัดหาค่าปริมาณหนึ่ง อาจทำได้โดยใช้เครื่องวัด หรือใช้วิธีการวัดที่แตกต่างกัน แต่ผลการวัดที่ได้ก็คือ ตัวเลขที่ไม่จำเป็นต้องเท่ากันเสมอไป เพราะตัวเลขที่ได้จากการวัดครั้งหนึ่ง จะรวมความคลาดเคลื่อนหรือความไม่แน่นอนอยู่ระดับหนึ่งเสมอ การบอกค่าตัวเลขของผลการวัดออกมาเพียงอย่างเดียว จึงไม่ทำให้น่าใจได้ว่า ผลการวัดถูกหรือผิด หรือเชื่อถือได้เพียงไร ดังนั้นการแสดงผลการวัดจึงนิยมเขียนบอกมาเป็น $x \pm \Delta x$ เมื่อ x เป็นค่าจริงหรือค่าที่ควรจะเป็นของปริมาณนั้น (ค่าเฉลี่ยของผลการวัดหลาย ๆ ครั้ง) และ $\pm \Delta x$

เป็นช่วงของปริมาณความคลาดเคลื่อนของผลการวัดที่เรียกว่า ช่วงความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะต้องกว้างพอที่จะทำให้ผลการวัดส่วนใหญ่ตกลงภายในช่วงนี้ แต่ไม่กว้างเกินไปจนผลการวัดขาดความน่าเชื่อถือ ซึ่งพิจารณาได้จากทางสถิติ ในทางปฏิบัติ การประมาณช่วงความคลาดเคลื่อน หาได้จากการกระจายของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ย ข้อมูลที่กระจายมาก Δx ก็จะมีค่ามาก ข้อมูลที่กระจายน้อย Δx ก็จะมีค่าน้อย การกระจายข้อมูลดูได้จากค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยของข้อมูลชุดนั้น เช่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย จึงอยากจะเสนอให้ใช้ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย เป็นช่วงความคลาดเคลื่อน เพราะหาได้ง่ายกว่า และน่าเชื่อถือพอสมควร ตัวอย่างเช่น ผลการวัดความยาว 4 ครั้ง ในหน่วยเมตรได้เป็น 7.65, 7.61, 7.66 และ 7.68 ค่าเฉลี่ยหาได้เท่ากับ 7.65 และค่าเบี่ยงเบน (ไม่คิดเครื่องหมาย) เป็น 0.00, 0.04, 0.01 และ 0.03 ดังนั้น ค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยจะเป็น 0.02 นำค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยไปบวกและลบกับค่าเฉลี่ย จะได้ค่าวัด 7.65 ± 0.02 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 7.63 ถึง 7.67 ในบางครั้ง เพื่อให้มีความมั่นใจมากขึ้น อาจจะใช้สองเท่าของค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเป็นช่วงค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะได้ค่าวัดเป็น 7.65 ± 0.04

ในบางกรณีที่มีการวัดไม่อาจทำซ้ำได้หลายครั้ง จึงไม่อาจหาค่าเฉลี่ยได้ เช่น การวัดที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขเฉพาะ และปริมาณวัดที่ขึ้นอยู่กับเวลา เป็นการวัดที่ทำได้เพียงครั้งเดียว ดังนั้น ช่วงความคลาดเคลื่อน อาจประมาณได้จากค่าเฉลี่ยที่สุด (Least Count) ของเครื่องมือวัด โดยคิดเท่ากับ หรือครึ่งหนึ่งของค่าละเอียดที่สุดก็ได้ ตัวอย่างเช่น เวอร์เนียสคาลิปเปอร์ ที่มีค่าละเอียดที่สุด 0.01 ซม. วัดความยาวเพียงครั้งเดียวได้ค่าการวัดเป็น 3.18 ± 0.01 ซม. หรือไม้บรรทัดซึ่งมีค่าละเอียดที่สุด 0.1 ซม. วัดความยาวเพียงครั้งเดียว ได้ค่าการวัด 2.80 ± 0.05 ซม. ช่วงความคลาดเคลื่อนบางครั้งนิยมเขียนในรูปแบบของ

สัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ ที่เราเรียกว่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อน ($\frac{\Delta x}{x}$) หรือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

$$\left[\left(\frac{\Delta x}{x} \right) (100) \right] \text{ ซึ่งตามปกติแล้ว } \frac{\Delta x}{x} \ll 1$$

โดยทั่วไปแล้ว ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดมักจะเกิดขึ้นเสมอ แม้ว่าผู้วัดจะอ่านอย่างละมัดระวังแล้วก็ตาม ผู้สร้างเครื่องวัดจึงต้องรับประกันความถูกต้อง ของเครื่องวัดแต่ละชิ้นไว้ด้วย ตัวอย่างเช่น รับประกันความแม่นยำถึง 5% หมายความว่า ผลการวัดที่ใช้เครื่องวัดอันนี้คลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% หรือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ความคลาดเคลื่อนเช่นนี้ถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อนแบบเป็นระบบ (Systematic Error) และสามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องมือเสียก่อน แต่บางครั้งความคลาดเคลื่อนที่วุ่นวาย อาจถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มได้ กรณีที่นำเครื่องวัดชนิดเดียวกันหลายๆ เครื่องไปวัด และหาค่าเฉลี่ย

หนึ่งสภาพแวดล้อมต่างๆ ก็เป็นเงื่อนไขอีกอันหนึ่ง ที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขณะทำการวัดหรือทดลองได้ การประมาณค่าความคลาดเคลื่อน Δx จึงต้องคำนึงถึงขนาดของการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขเหล่านั้นด้วย ซึ่งอาจจะหาได้จากการแปรเงื่อนไขเหล่านั้นไปที่ละอย่าง และสังเกตว่ามีผลกระทบกระเทือนต่อผลการวัดอย่างไร ตัวอย่างเช่น นาฬิกาจับเวลาที่มีความคลาดเคลื่อนไปเกิน 1% ภายในช่วงอุณหภูมิ 15°C ถึง 50°C เป็นต้น

2.13.2 ความคลาดเคลื่อนของการวัดต่อผลการคำนวณ

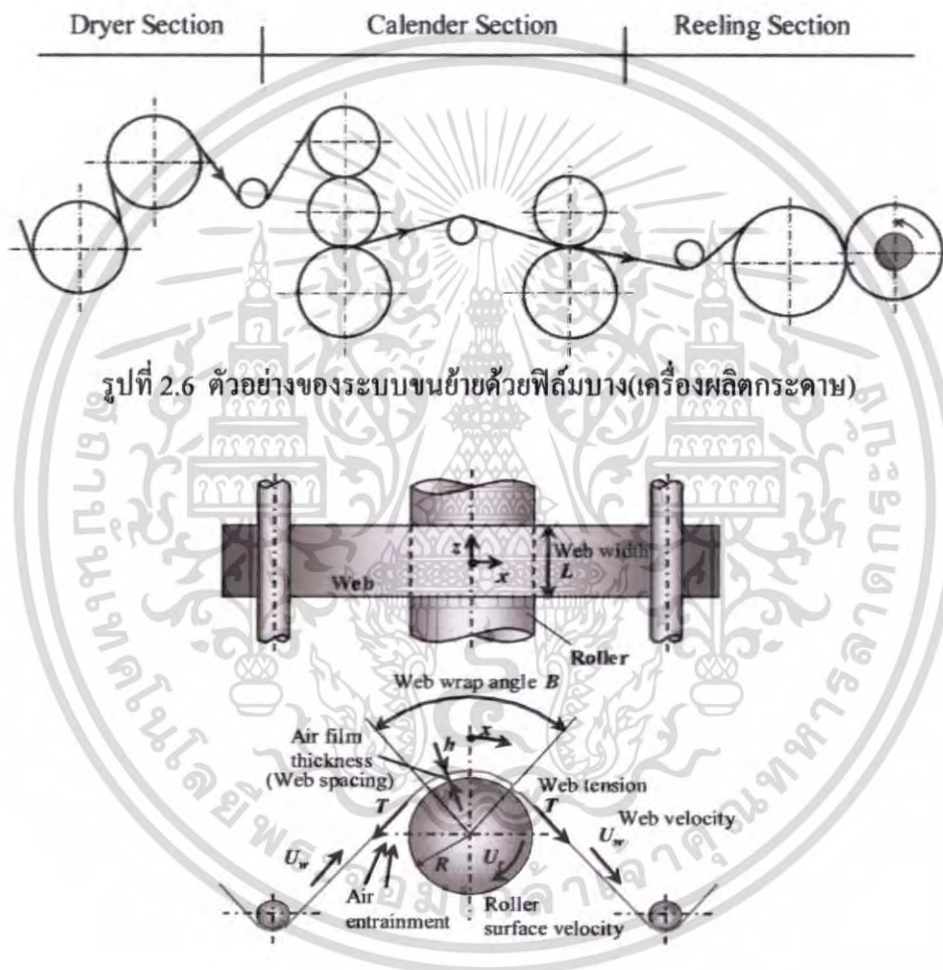
กรณีที่ผลการทดลองที่ต้องการ ไม่สามารถหาได้จากการวัดโดยตรง แต่หาได้จากการวัดปริมาณอื่นหลายปริมาณและนำมาคำนวณเช่น การหาค่าความหนาแน่นของวัตถุ หาได้จากการวัดมวล และวัดปริมาตรของวัตถุ ความคลาดเคลื่อนของแต่ละปริมาณวัดจึงไปมีผลต่อผลการคำนวณสุดท้ายให้มีความคลาดเคลื่อนไปด้วยขนาดหนึ่ง ซึ่งขึ้นกับขนาดความคลาดเคลื่อนของผลการวัดและความสัมพันธ์กันของปริมาณเหล่านั้น

2.14 การเกิดฟิล์มบาง

วัสดุที่มีความบางและสามารถโค้งงอได้อย่างเช่น กระดาษ สิ่งทอ ฟิล์มพลาสติก และแผ่นอลูมิเนียมบาง บางครั้งเราเรียกสิ่งพวกนี้ว่า “Web” ระบบการขนส่ง Web ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญของงานอุตสาหกรรม ในการเคลื่อนย้ายแผ่น Web โดยการหมุนของลูกกลิ้งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ก็เกิดการแทรกตัวของอากาศระหว่างผิวสัมผัสของลูกกลิ้งกับ Web ซึ่งจะเรียกการหล่อลื่นแบบนี้ ว่า Soft

Elastohydrodynamic Lubrication air film ถ้าความหนาแน่นของฟิล์มอากาศมีขนาดใหญ่และหนายกว่าผิวหน้าของความสูงของแผ่น web และลูกกลิ้ง ก็จะทำให้เกิดความฝืดและสูญเสียความสมดุล

ในบางกรณีลูกกลิ้งจะไม่สามารถขับเคลื่อนได้เนื่องจากกำลังดึงไม่เพียงพอ จึงทำให้ความเร็วลดลง ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่าง web และลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการคาดการณ์ว่า ความหนาแน่นของฟิล์มอากาศมีความเหมาะสมในการใช้หรือไม่

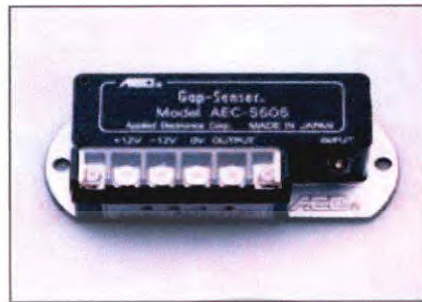


รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของระบบขนย้ายด้วยฟิล์มบาง(เครื่องผลิตกระดาษ)

รูปที่ 2.7 การเกิดฟิล์มอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

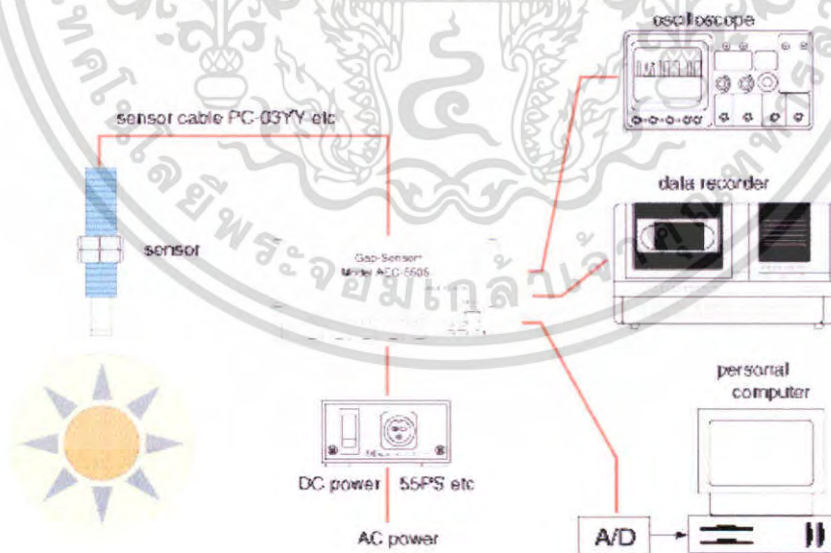
2.15 Gap Sensor



รูปที่ 2.8 Gap-Sensor รุ่น AEC-5505

model	Converter: AEC-55 (symbolize sensor diameter)
output voltage	See each sensor section.
frequency characteristics	DC to 20kHz-2dB
resolution	See each sensor section.
temperature range	-10°C to 55°C
Thermal characteristic	0.1%/°C of drift between -10°C and 55°C
power supply	DC ±11V to DC ±17V, ±40mA max

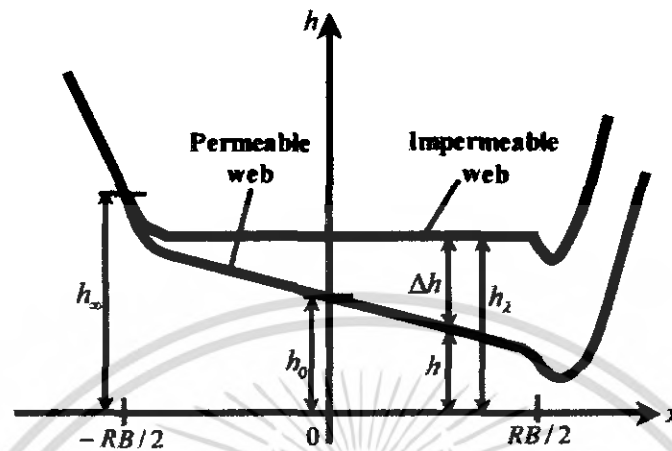
ตารางที่ 2.9 ข้อมูลจำเพาะของ Gap-Sensor รุ่น AEC-5505



รูปที่ 2.10 การทำงานของ Gap-Sensor รุ่น AEC-5505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16 สมการที่ใช้ในการหาค่าระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มบาง กับลูกกลิ้ง



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงโมเดลการแพร่กระจายอากาศสำหรับ Web ที่มีการซึมผ่านและไม่ซึมผ่าน
(ตามเอกสารอ้างอิง [4])

โดยกำหนด $x = 0$

สมการที่ใช้ในการคำนวณ
$$\bar{h}_0 \equiv \frac{h_0}{R\epsilon^{2/3}} = 0.589 - \frac{1.614}{\lambda} + \frac{1.764}{\lambda^2}$$

โดยที่ $\lambda = \frac{L}{2R\epsilon^{1/3}}$ และ $\epsilon = \frac{6\eta U}{T}$

เมื่อ $\eta = \text{air viscosity} = 1.86 \times 10^{-5} \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$

โดยกำหนด $x \neq 0$

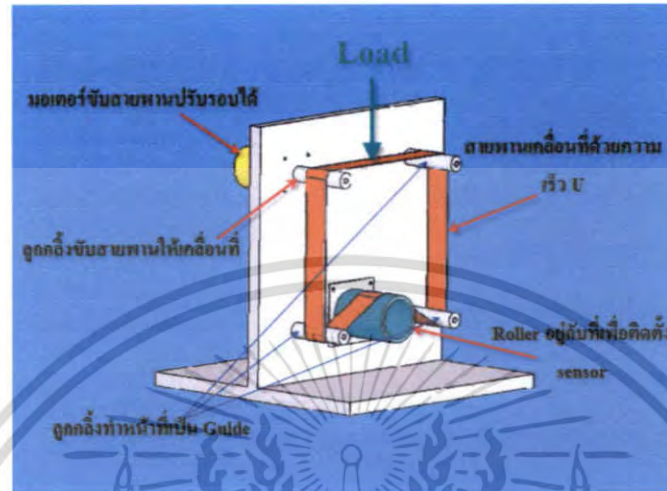
สมการที่ใช้ในการคำนวณ
$$h(x) = R\epsilon^{2/3} \{0.589 + f(\lambda)g(x)\}$$

และ $f(\lambda) = -1.614/\lambda + 1.764/\lambda^2$

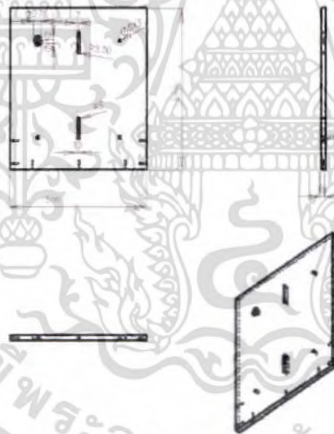
โดยที่
$$g(x) = \begin{cases} (1+2x/RB)(1-0.9) & (-RB/2 \leq x \leq -0.9RB/2) \\ 1 & (-0.9RB/2 \leq x \leq RB/2) \end{cases}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17 การออกแบบและรายละเอียดแบบ

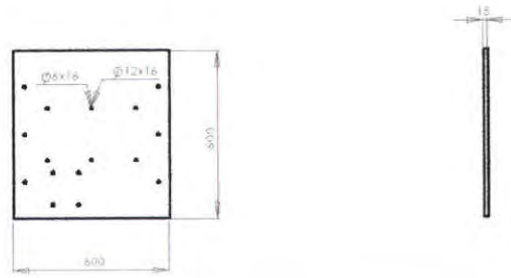


รูปที่ 2.12 แสดงชุดทดลองอย่างง่าย



รูปที่ 2.13 แสดงแบบตัวแวงชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

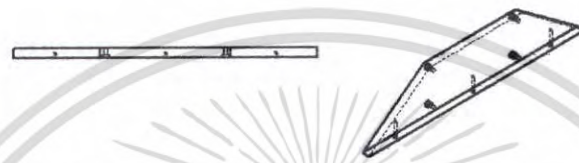
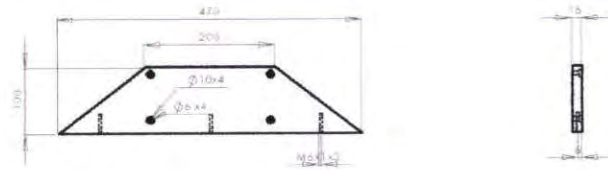


รูปที่ 2.14 แสดงการเจาะรูชนิดนอต

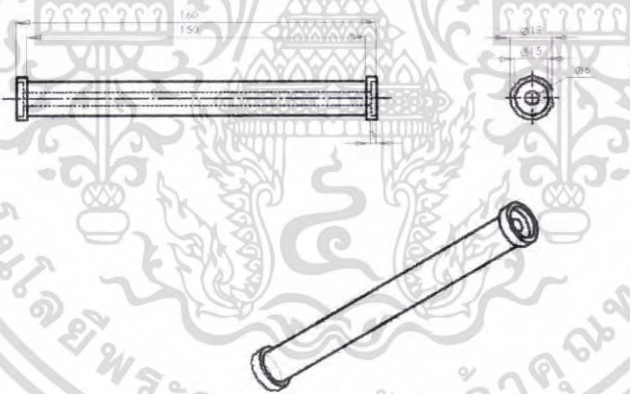


รูปที่ 2.15 แสดงแบบของเพลลาจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงแบบตัวช่วยประกอบตัวแผ่นใหญ่



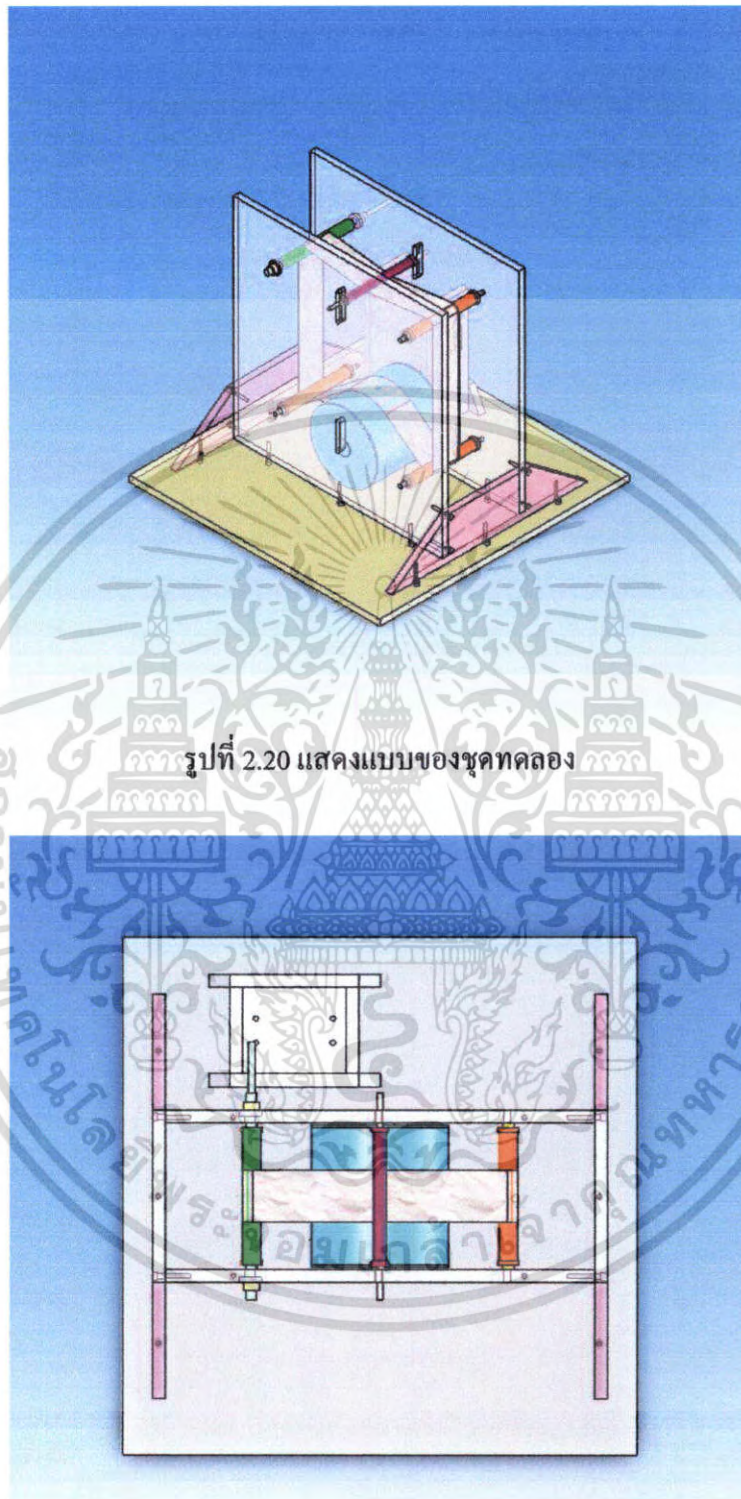
รูปที่ 2.17 แสดงแบบที่ใช้เป็นลูกกลิ้งตัวเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงแบบลูกกลิ้งตัวถ่วงน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงแบบของชุดทดลอง

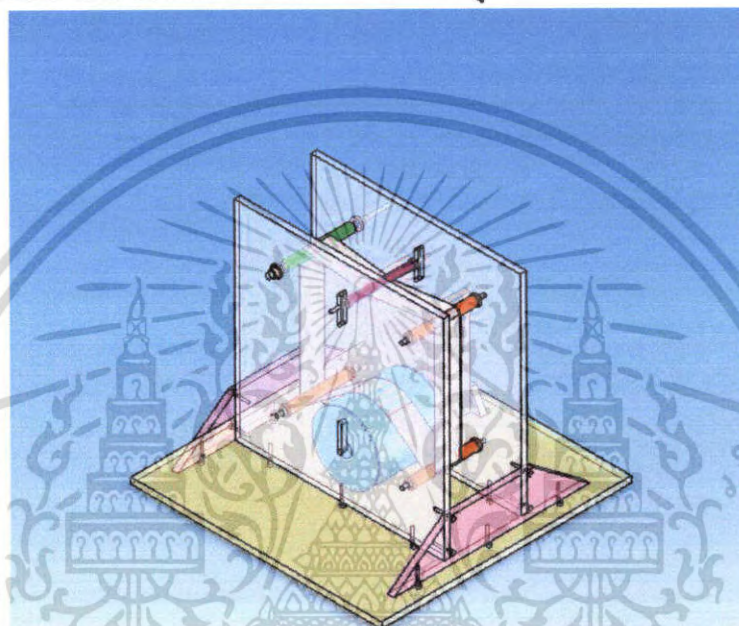
รูปที่ 2.21 แสดงแบบที่มองจากด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

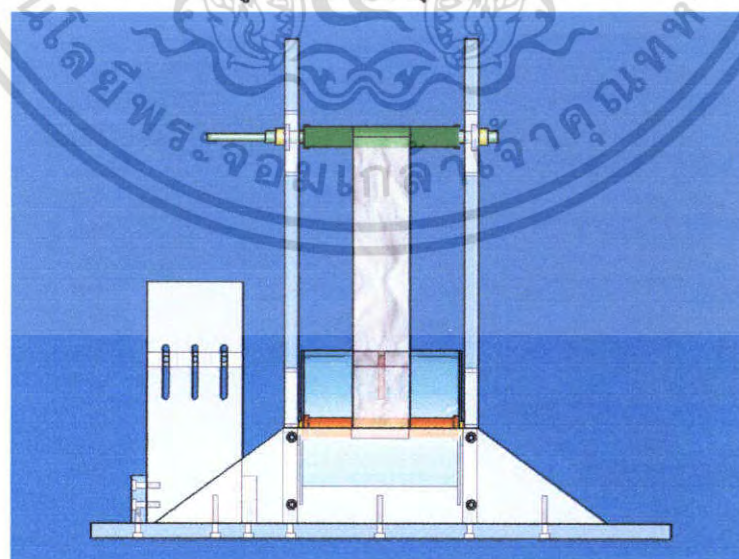
บทที่ 3

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1 ชุดทดลองระบบขนถ่ายฟิล์มบางที่มีลักษณะยืดหยุ่น



รูปที่ 3.22 แบบชุดทดลอง



รูปที่ 3.23 แสดงภาพจำลองขนาดทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 จากภาพจะเห็นเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 multimeter ที่ต่อรับสัญญาณจาก Gap Sensor ค่าที่อ่านได้ เป็น โวลต์ (V)



รูปที่ 3.24 Multimeter (รับค่าจาก converter)

3.1.2 Power supply ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟกระแสตรง ให้กับมอเตอร์ที่ใช้ใน โดยจะมี โวลต์ เกจเป็นตัวควบคุมในการจ่ายกระแส เพื่อเปลี่ยนรอบในการทดลอง



รูปที่ 3.25 Power supply (เลี้ยงมอเตอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 Power Supply (จ่ายให้ converter) คือเครื่องแปลงไฟฟ้าจากไฟ 240 V กระแสสลับ เป็น + -12V



รูปที่ 3.26 Power Supply

3.3 Sensor head (AEC PU 05)

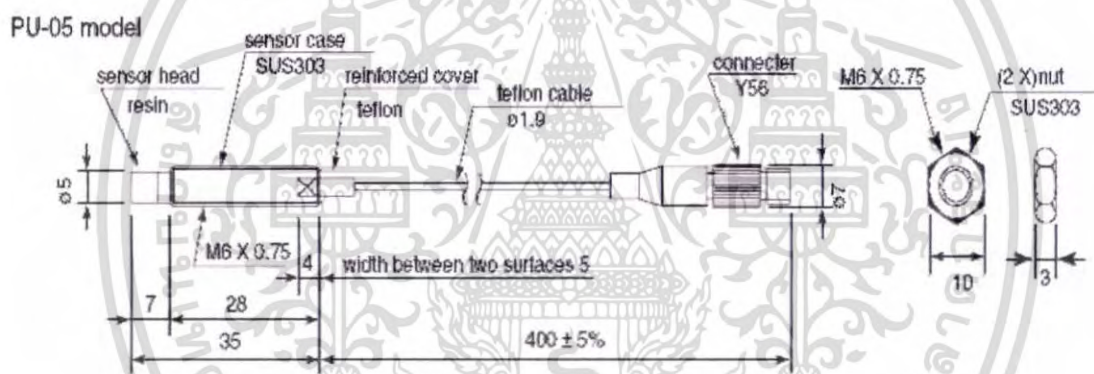


รูปที่ 3.27 Sensor head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

model	Sensor : PU-05		
measuring range (iron)	0 to 2mm ($\alpha 0 : 0.05\text{mm}$)		
output voltage	$\approx 5V (0.2\text{mm}^{\vee})$		
adopted converters	<u>5505</u>	<u>55MS-M</u>	<u>5505HF</u>
resolution	0.3 μm	0.8 μm	0.8 μm
linearity	$\approx 0.5\%$ FS (measuring distance of 0.2 to 1.8mm) 3% FS (other measuring distance)		
temperature range	-20°C to 180°C		
thermal characteristics	$\approx 0.8\mu\text{m}^{\circ}\text{C}$ of drift between -20°C and 80°C $\approx 1\mu\text{m}^{\circ}\text{C}$ of drift between 80°C and		

รูปที่ 3.28 แสดงข้อมูลจำเพาะของ Sensor head

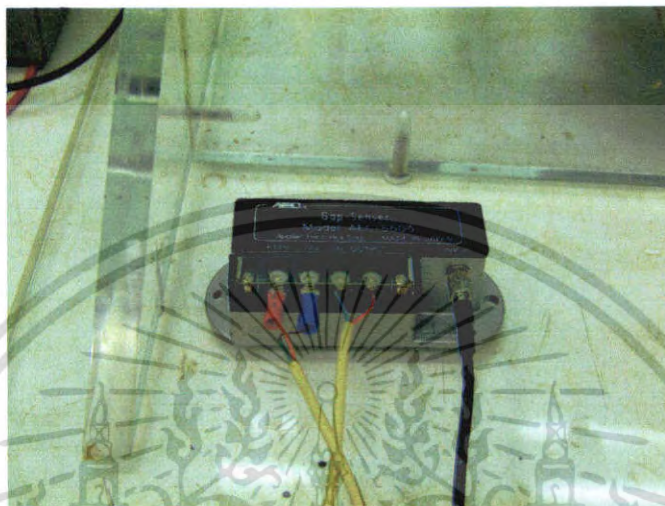


รูปที่ 3.29 แสดงแบบ Sensor head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

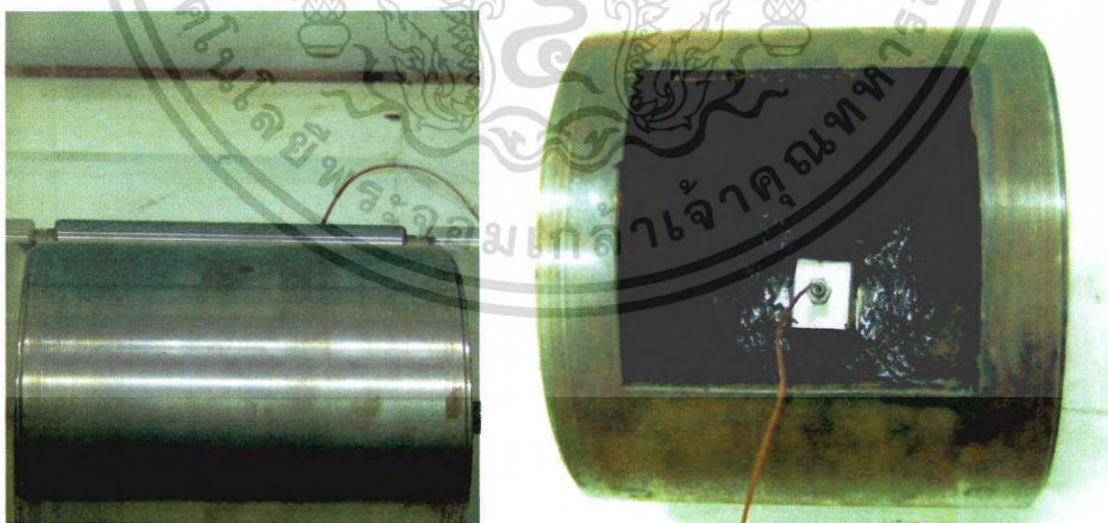
3.4 Gap Sensor

ทำหน้าที่วัดระยะห่างที่เกิดขึ้นจากการทดลองระหว่างแผ่น web กับ ลูกกลิ้ง



รูปที่ 3.30 Gap Sensor ที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.1 การติดตั้งหัวเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ติดตั้งที่ลูกกลิ้งใหญ่ ดังจะเห็นได้จากภาพที่ (3.31) ซึ่งการติดตั้งจะทำการติดตั้งในแนว 90 องศากับชุดทดลอง

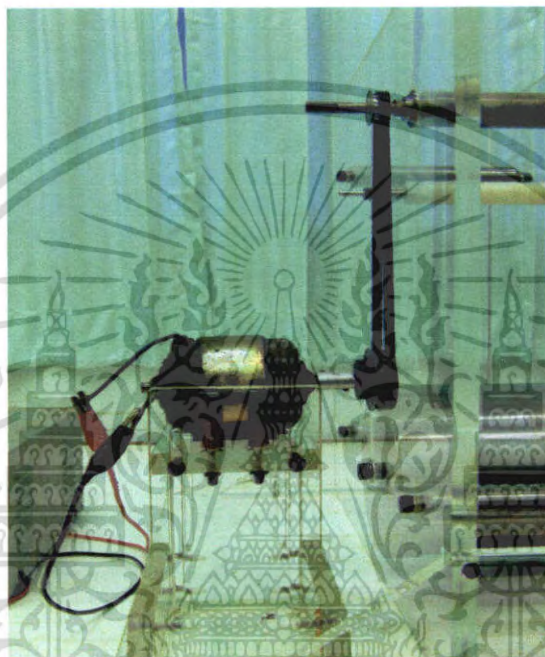


รูปที่ 3.31 แสดงการติดตั้งหัวเซ็นเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 รูปมอเตอร์ที่ใช้ทดสอบ

ดัดแปลงมาจากมอเตอร์แอร์รถยนต์

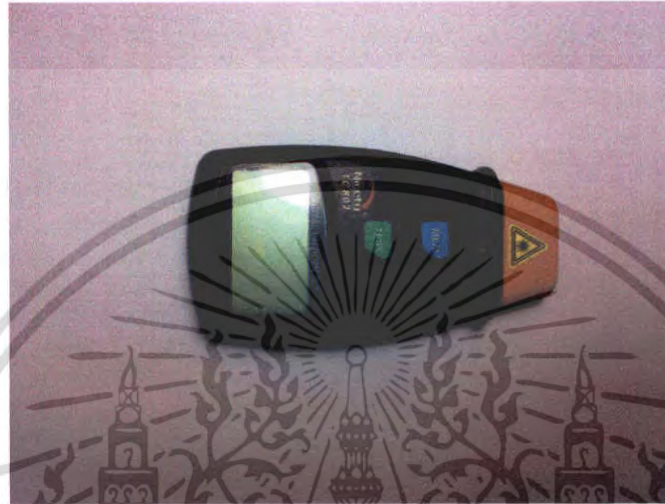


รูป 3.32 แสดงการติดตั้งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 เครื่องวัดความเร็วรอบ

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วรอบของเพลาคับ โดยในที่นี้ใช้วัดความเร็วรอบแบบใช้แสงแสดงผลแบบดิจิทัล มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที (RPM) ซึ่งเครื่องนี้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องได้รับการการันตีอย่างสม่ำเสมอ

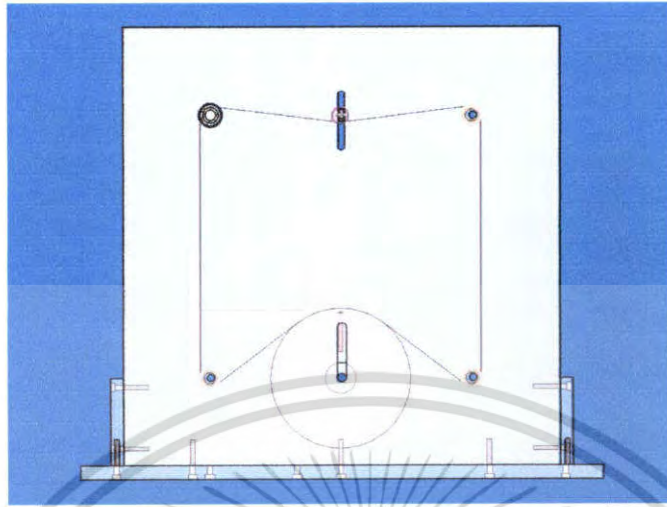


รูปที่ 3.33 เครื่องวัดรอบด้วยแสงดิจิทัล

Function	Range	Accuracy
Measuring range	2.5RPM ~99,999RPM	$\pm(0.05\% + 1)$
Resolution	0.1RPM (2.5~999.9RPM) 1RPM (1000RPM Above)	
Sampling Time	0.8 Sec	
Detecting Distance	50mm~200mm (LED Lamp-house)	
Time Base	6MHz	
LCD Display	•	
Low Battery Display	•	
Memory	Last value,Max. Value,Min.value	
Power Source	3x1.5V (UM-3)	

รูปที่ 3.34 แสดงข้อมูลจำเพาะของ เครื่องวัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.35 แสดงแบบทางด้านข้างเพื่อให้เห็นในการติดเซ็นเซอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง

ประกอบด้วย ขั้นตอนหลักคือ

- ตัดขนาดของแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์ตามขนาดที่จะทดสอบและแปะกระดาษกาวอลูมิเนียม
- ทำการ คาริเบท เซ็นเซอร์ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก multimeter
- ทำการทดลองและเก็บค่าของสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์
- การคำนวณหาค่าคงที่ของ ϵ , μ , ρ ที่จำเป็นในการทดลอง

4.1 ตัดขนาดของแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์ตามขนาดที่จะทดสอบและแปะกระดาษกาวอลูมิเนียม

4.1.1 นำกระดาษหนังสือพิมพ์มาตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 12 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร , 8 เซนติเมตร , 6 เซนติเมตร โดยที่แต่ละแผ่นนั้นมีความยาว 135 เซนติเมตร

4.1.2 นำกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ตัดได้ขนาดเรียบร้อยแล้วมาติดด้วยกระดาษกาวอลูมิเนียม เพราะเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดนั้น ไม่สามารถวัดกระดาษหนังสือพิมพ์ได้



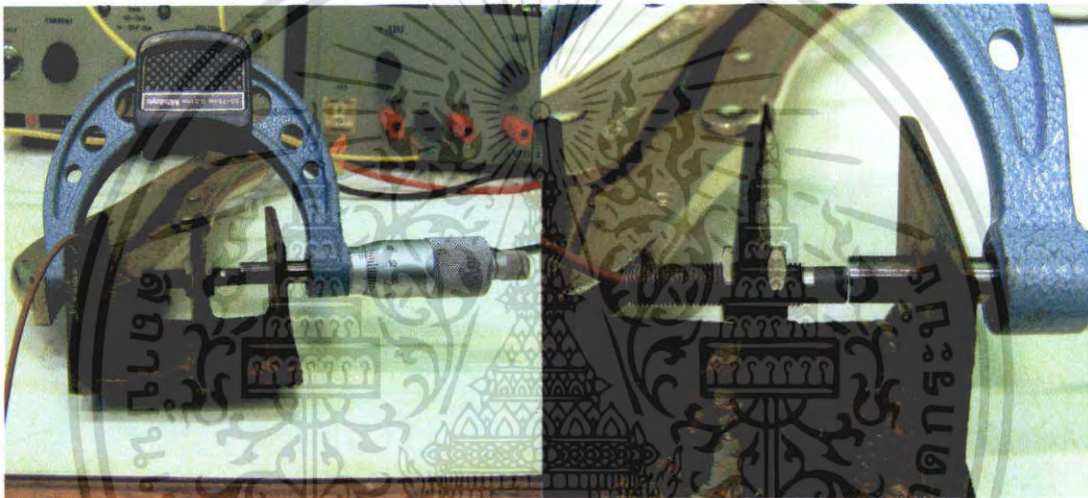
รูปที่ 4.36 แสดงแผ่นกระดาษแปะด้วยเทปกาวอลูมิเนียม 6 cm, 8 cm, 10 cm และ 12 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

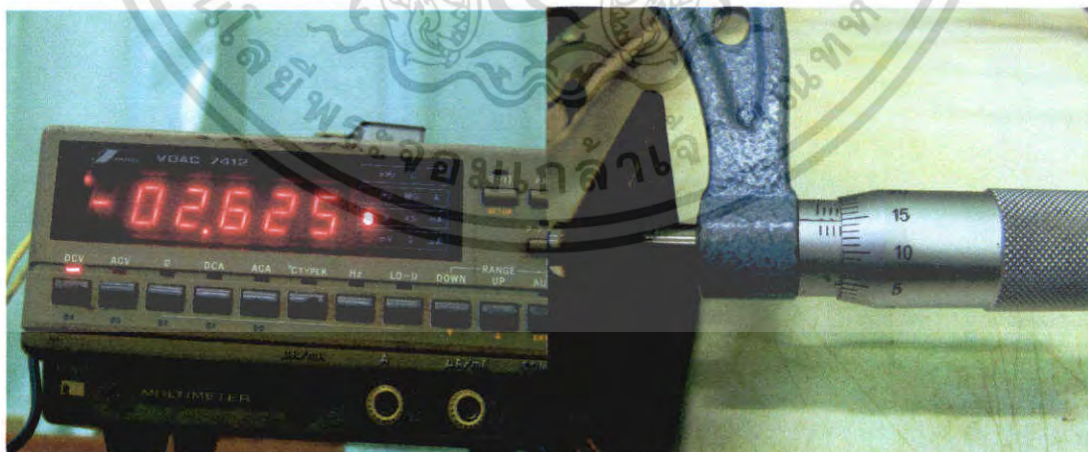
4.2 การคาร์บริเบทเซ็นเซอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก multimeter

วิธีการิเบทหัวเซ็นเซอร์

- 4.2.1. ติดตั้งหัวเซ็นเซอร์เข้ากับแท่นยึด
- 4.2.2. ติดตั้งไมโครมิเตอร์เข้ากับแท่นยึด
- 4.2.3. ปรับให้หัวของไมโครมิเตอร์ให้ชิดกับหัวของไมโครมิเตอร์ที่สุด
- 4.2.4. ปรับไมโครมิเตอร์ให้ห่างจากระยะหัวเซ็นเซอร์ที่ละ 0.01 mm. จนถึง 0.5 mm. และบันทึกค่า
- 4.2.5. นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระยะห่าง



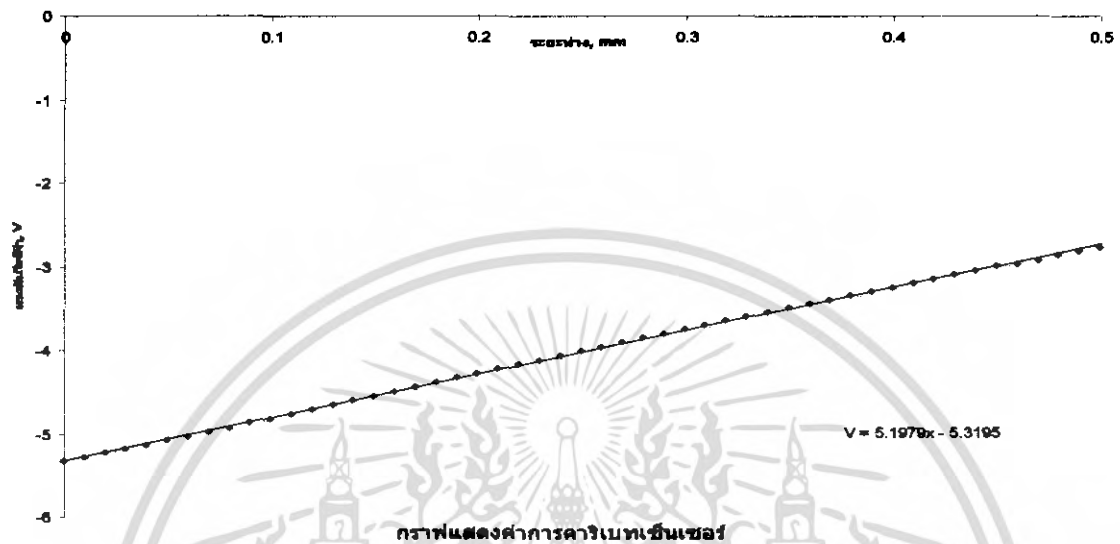
รูปที่ 4.37 แสดงการติดตั้งเซ็นเซอร์และการปรับแต่งเซ็นเซอร์



รูปที่ 4.38 แสดงการเปลี่ยนระยะห่างและจดผลการปรับแต่งค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองเราจะใช้กราฟหลัก ๆ ก็คือกราฟแสดงค่าการปรับแต่งค่าเซ็นเซอร์โดยจะใช้สมการความชันเส้นตรงที่หามาได้เป็นสมการเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงการปรับแต่งค่าจากเซ็นเซอร์

โดยความสัมพันธ์ของระยะห่างกับแรงดันไฟฟ้าจะได้

$$V = 5.1979X - 5.3195$$

ดังนั้นสามารถหาระยะห่างได้โดย

$$X = \frac{V + 5.3195}{5.1979}$$

ซึ่งค่า V นั้นได้จากการทดลองโดยตรงในการหาค่า h เรากำหนดให้ $X = h$ ดังนั้น เมื่อแทนค่า V ลงในสมการ จะได้ค่า h แล้วเรานำไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแผ่น Web กับ ความหนาของฟิล์มอากาศ

ตัวอย่างการคำนวณ

สมมติได้ค่าจากการทดลอง 2 จุด ($L=0.12\text{m}$, $R=0.08\text{m}$, $T=14\text{N/m}$)

จุดที่ 1 ความเร็ว 0 m/s ได้แรงดันเท่ากับ -4.94 Volt

จุดที่ 2 ความเร็ว 0.1 m/s ได้แรงดันเท่ากับ -4.91 Volt

ความสูงจุดที่ 1 ได้โดยใช้สมการ (16) ในการคำนวณจะได้ค่า $h = 0.07301\text{ mm}$ (I)

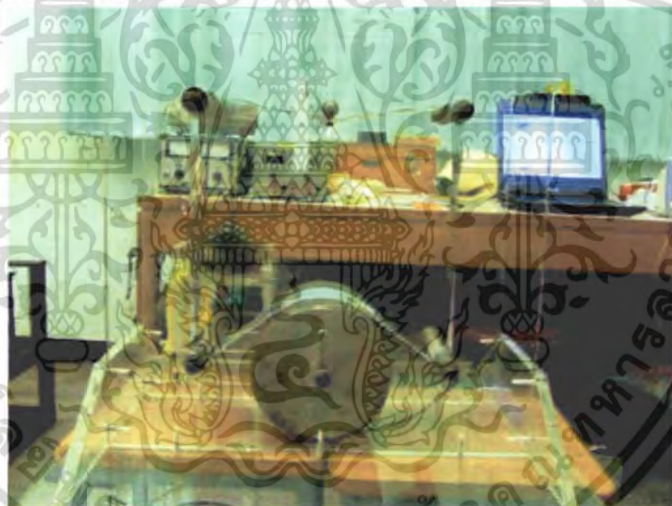
และ จุดที่ 2 ได้โดยใช้สมการ (16) ในการคำนวณจะได้ค่า $h = 0.07878\text{ mm}$ (II)

จากนั้นนำ (II) - (I) จะได้ค่า $h = 0.00577\text{ mm}$ หรือ $h = 5.77\text{ }\mu\text{m}$

นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ

4.3 ทำการทดลองและเก็บค่าของสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์

4.3.1 ทำการติดตั้งแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์เข้ากับเครื่องทดลอง



รูปที่ 4.40 แสดงการติดตั้งแผ่นกระดาษกับชุดทดสอบ

4.3.2 เริ่มทำการทดสอบ โดยที่เริ่มต้นด้วยการให้กระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์จนได้ความเร็วรอบที่ต้องการ เริ่มต้นด้วยความเร็วที่ 0 rpm เพิ่มขึ้นทีละ 500 rpm จนถึง 7500 rpm

4.3.3 ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้ แล้วนำไปคำนวณหาระยะการลอยตัวต่อไป

4.3.4 ทำการเปลี่ยนขนาดความกว้างของแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ทำกรทดลองแล้ว ทดสอบด้วยความเร็วรอบที่เหมือนกัน จนได้ผลการทดลองครบด้วยกันจำนวน 4 ความกว้าง

4.3.5 ทำการทดลอง จำนวน 10 แผ่นในทุกๆ ขนาดเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การคำนวณหาค่าคงที่ของ ε, λ, U ที่จำเป็นในการทดลอง

4.4.1 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองแล้วนำไปวาดกราฟ

4.4.2 นำผลที่ได้จากการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีมาวาดกราฟ

4.3.3 นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้

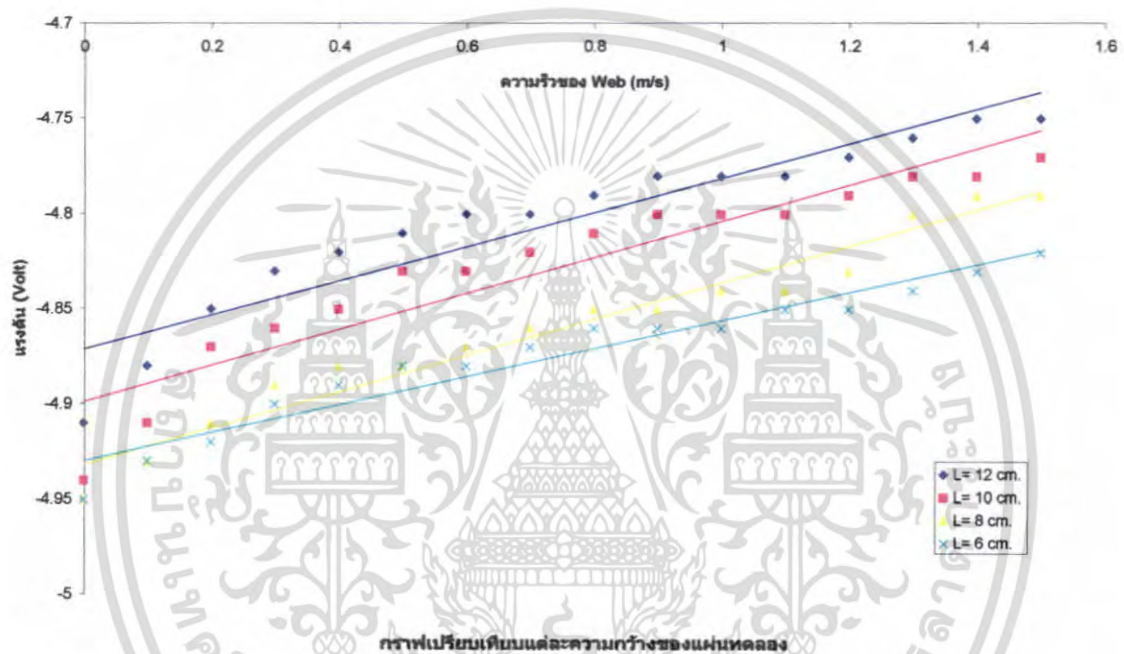


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

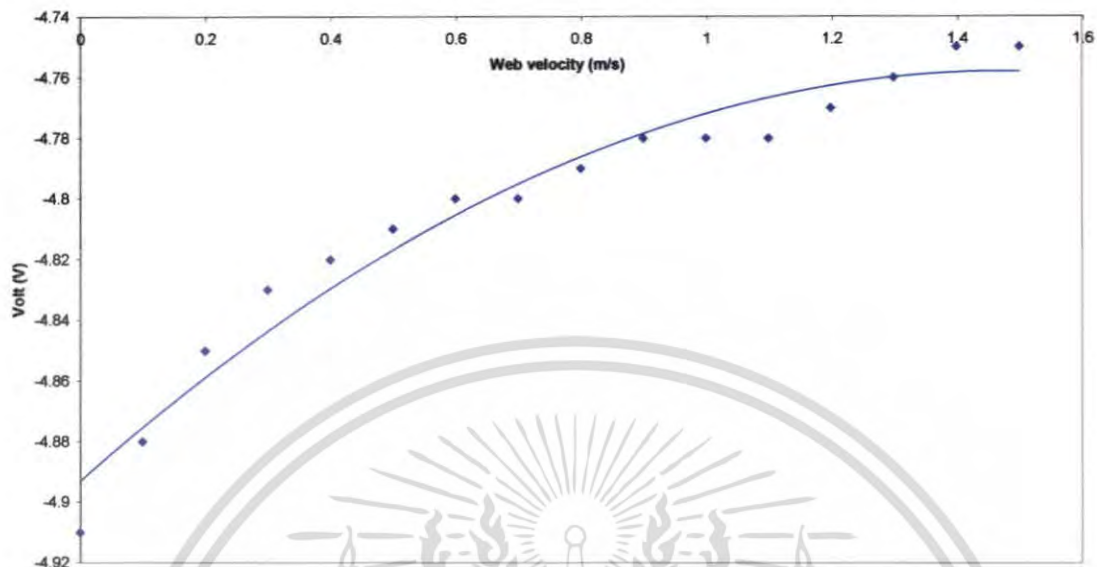
ผลการทดลอง

5.1 ผลที่ได้จากการทดลองเป็นกราฟแรงดันไฟฟ้า (Volt) กับความเร็วของ Web (m/s)



รูปที่ 5.41 แสดงผลการทดลองที่ได้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันกับขนาดความกว้างของ Web

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



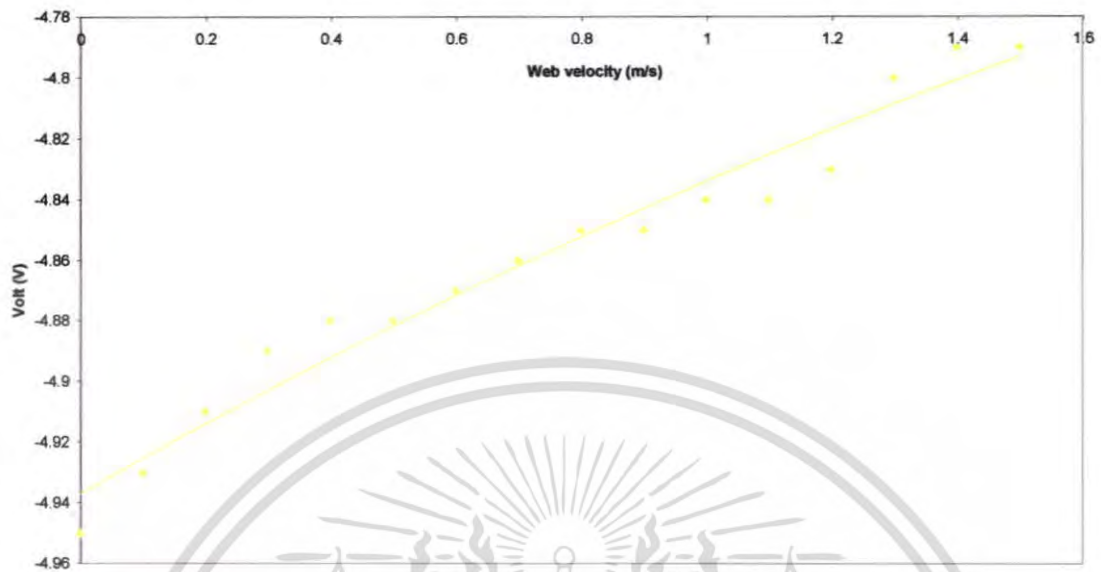
รูปที่ 5.42 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.12\text{ m}$



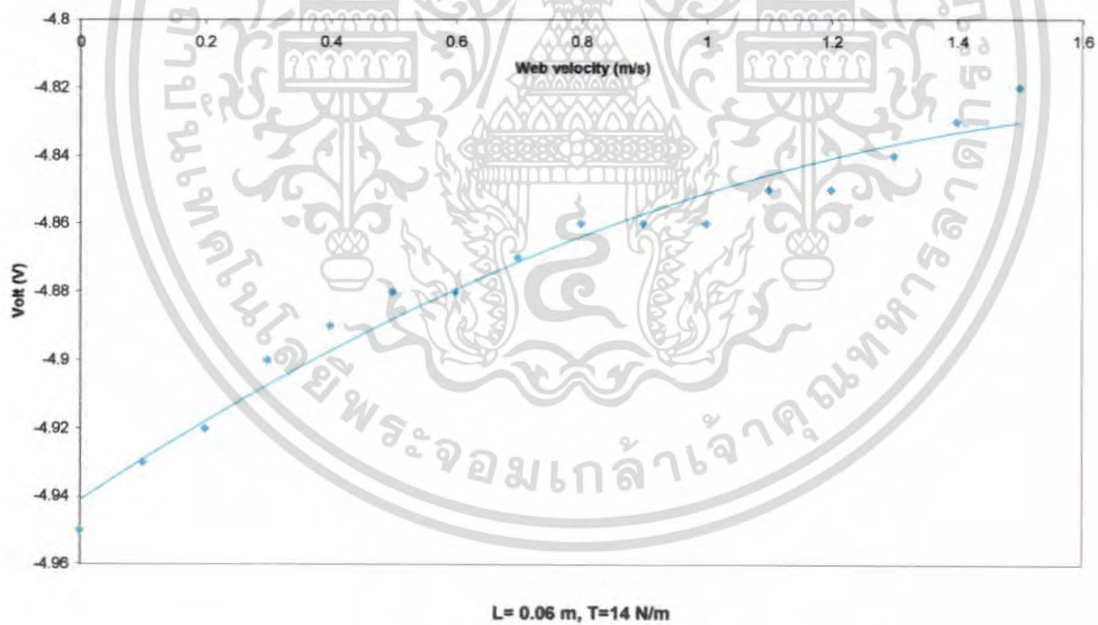
$L=0.10\text{ cm}, T=14\text{ N/m}$

รูปที่ 5.43 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.10\text{ m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



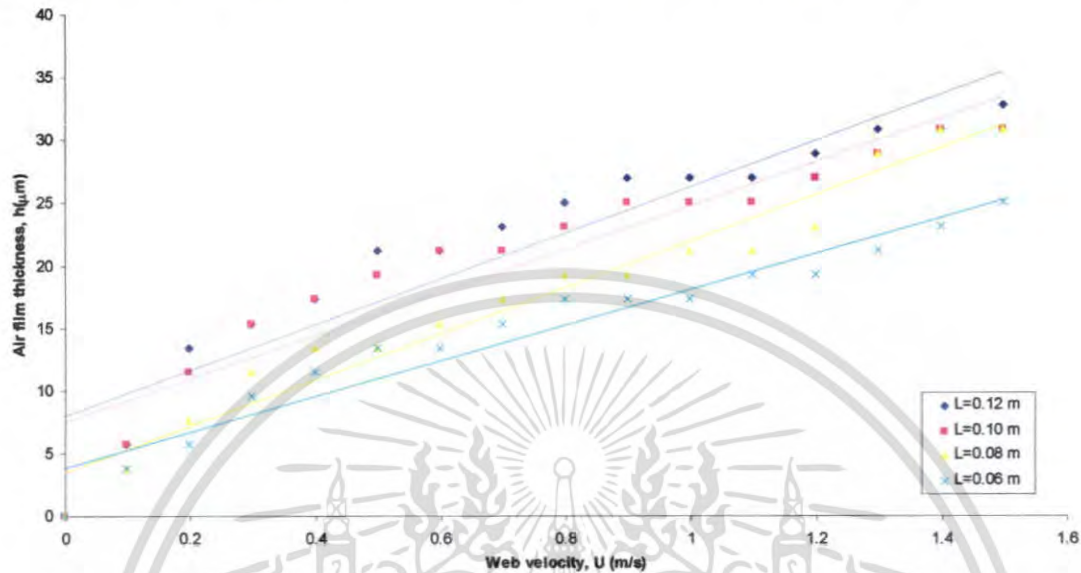
รูปที่ 5.44 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.08$ m



รูปที่ 5.45 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.06$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

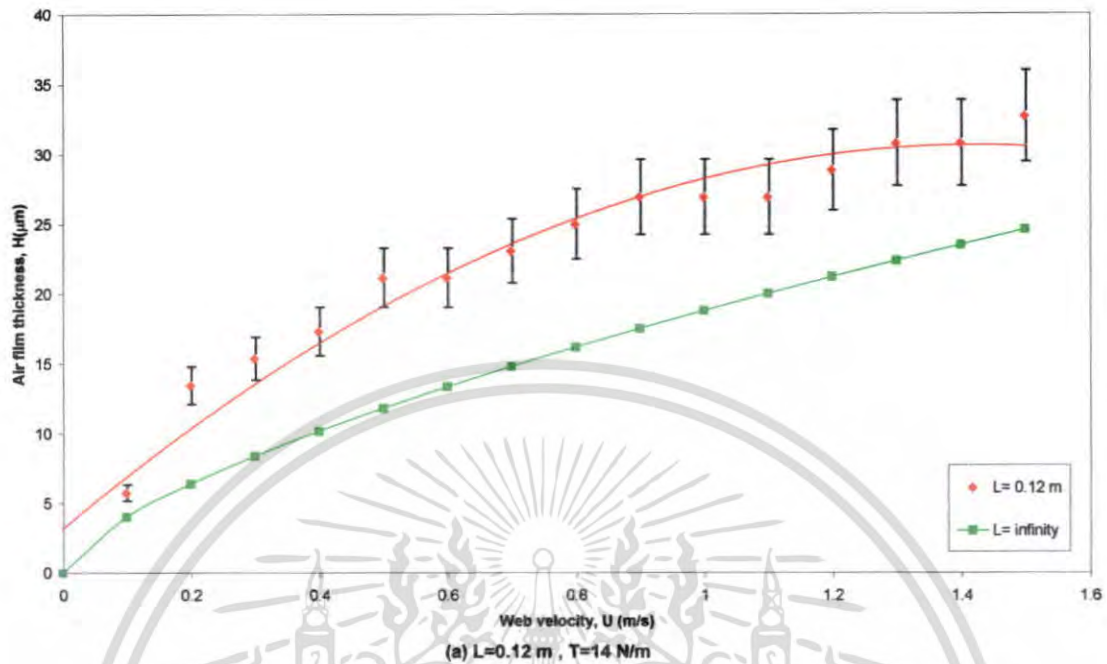
5.2 เมื่อนำค่าที่ได้มาเทียบกับการคาร์บริเบทชันเซอร์ก็จะได้ความหนาฟิล์มดังนี้



ตารางเปรียบเทียบแต่ละความกว้าง

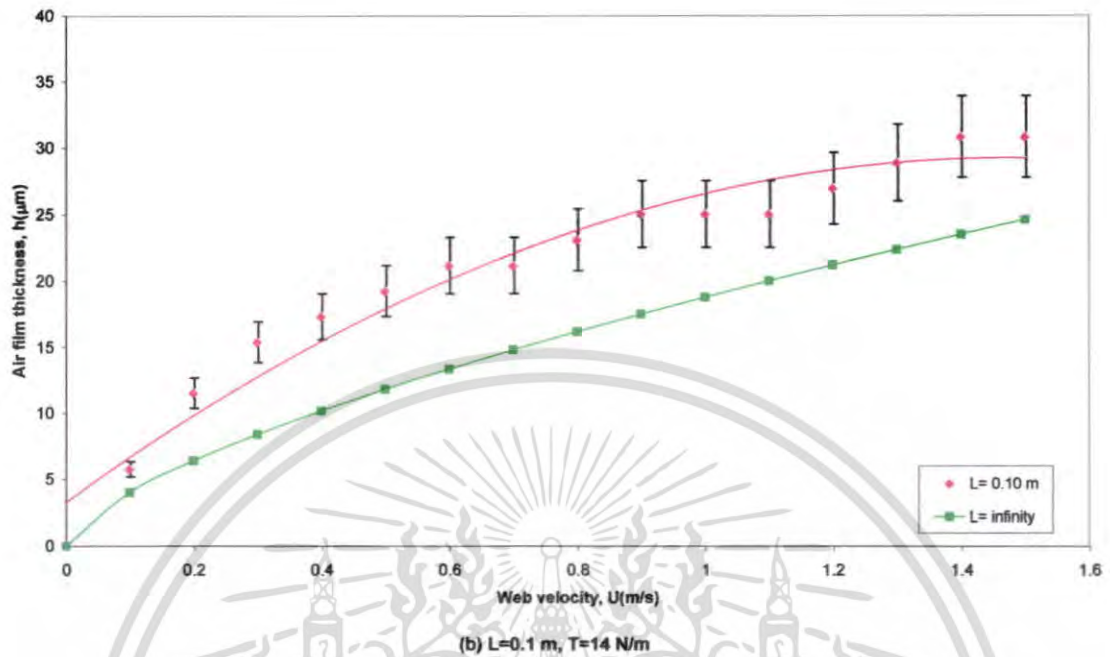
รูปที่ 5.46 แสดงการเปรียบเทียบทดสอบแผ่น web 4 ขนาดความกว้าง

จากตารางการเปรียบเทียบผลการทดลองของแต่ละความกว้างของแผ่นจะพบว่าที่ความเร็วเดียวกันเมื่อความกว้างของแผ่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้นตามด้วย ดังนั้นในแผ่นที่มีความกว้างมากจะเกิดการสิ้นเปลืองมากตามไปด้วย



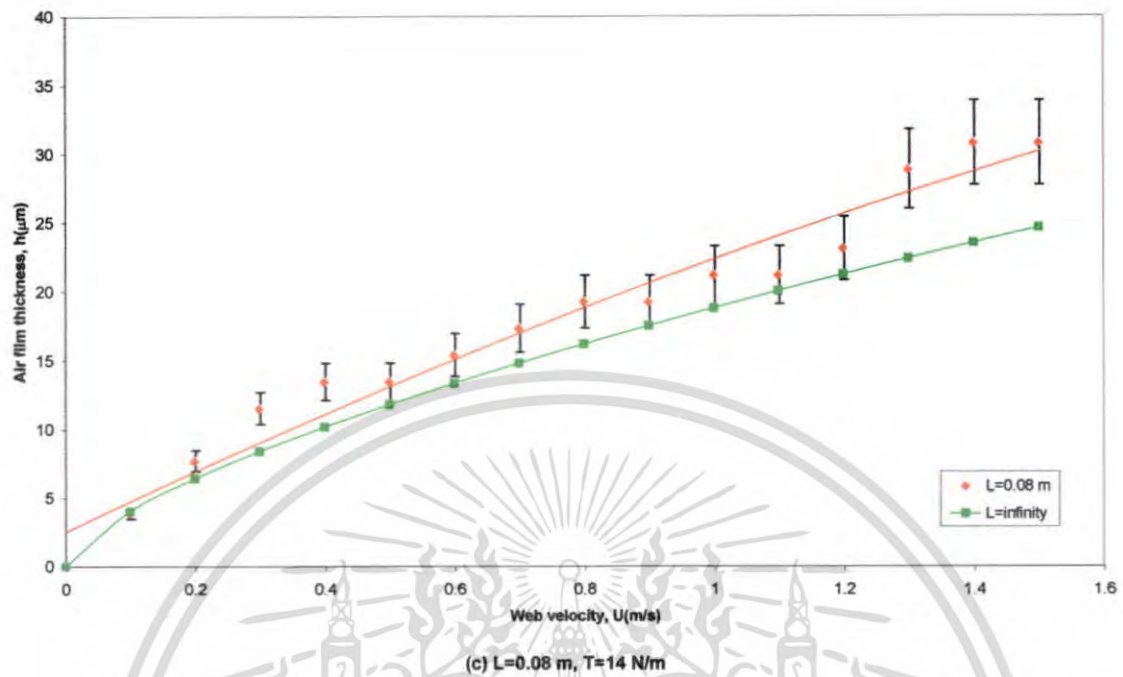
รูปที่ 5.47 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.12 m

เริ่มการทดลอง ใช้ขนาดความยาวของแผ่น web (L) เท่ากับ 0.12 m. เมื่อเพิ่มความเร็วของแผ่น web จาก 0 ถึง 0.2 m/s ความหนาของฟิล์มอากาศจะเกิดขึ้นมาก เพราะเมื่อแผ่น web เคลื่อนที่ จะนำพาอากาศรอบเข้าไปในระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่น web และเมื่อเพิ่มความเร็วจาก 0.2 m/s ถึง 0.4 m/s ความหนาของฟิล์มอากาศจะเพิ่มขึ้นที่ละน้อย และเมื่อเพิ่มความเร็วของแผ่น web มากขึ้น ความหนาของฟิล์มอากาศก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่จะเพิ่มอย่างคงที่จนจบการทดลอง

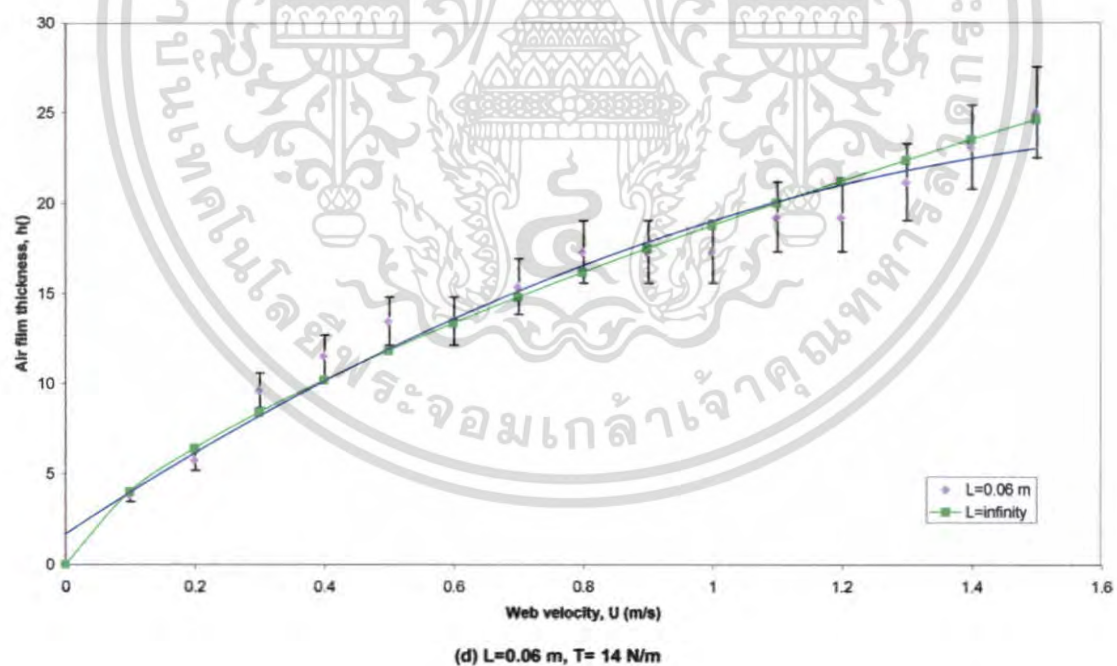


รูปที่ 5.48 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.10 m

เมื่อเปลี่ยนความยาวของแผ่น web เป็นขนาด 0.1 m. การเริ่มต้นของกราฟจะมีลักษณะเดิม แต่จะเกิดขึ้นช้ากว่ากราฟที่แล้ว และการเกิดความหนาของฟิล์มอากาศจะน้อยลง เพราะการพาอากาศรอบๆ ทำได้น้อยกว่าแผ่น web ที่มีขนาดใหญ่ และเมื่อเพิ่มความเร็วมากขึ้น ความหนาของฟิล์มอากาศก็จะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่



รูปที่ 5.49 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.08 m

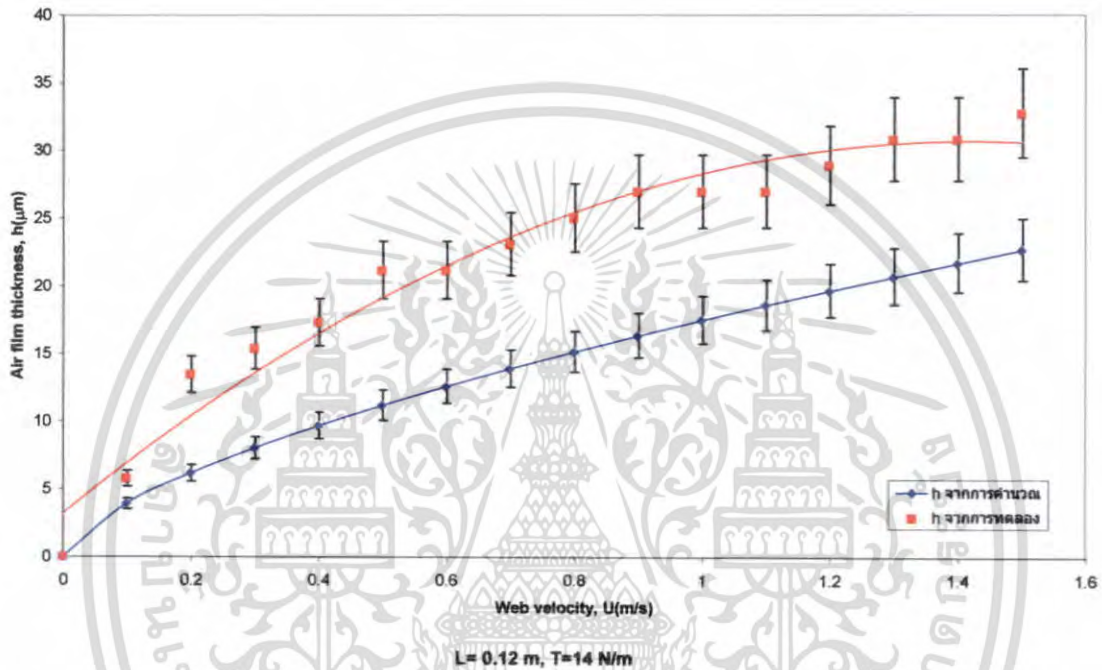


รูปที่ 5.50 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.06 m

และเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวของแผ่น web เป็นขนาด 0.08 m. และ 0.06 m. ความหนาของฟิล์มอากาศจะน้อยลงไปด้วย แต่ลักษณะกราฟยังคงเดิมไปจนจบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟทั้ง 4 กราฟที่แสดงมานั้น ยังแสดงถึงการเปรียบเทียบ โดยความยาวที่ใช้ในการทดลอง เทียบกับความยาวอนันต์ (เส้นสีชมพู) เพื่อดูค่าผิดพลาดที่เกิดจากการทดลองซึ่งเกิดจากอากาศที่ร่วนไหล ออกบริเวณด้านข้างของแผ่นถ้าความยาวของแผ่นเป็นอนันต์นั้นการร่วนไหลที่เกิดบริเวณขอบของ แผ่นกระดาษจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการซึมผ่านแผ่น



รูปที่ 5.51 กราฟเปรียบเทียบการลอยตัวที่ได้จากการคำนวณเทียบกับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

โครงการนี้ได้ออกแบบพัฒนาและทดสอบระบบขนถ่ายฟิล์มบาง และได้ศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของแผ่นฟิล์มบางสามารถสรุปได้ดังนี้

- 6.1 ความหนาของฟิล์มอากาศ ลอยด้วยแผ่นฟิล์ม เป็นพฤติกรรมสำคัญต่อระบบขนถ่ายฟิล์มบาง เนื่องจากมีค่าต่ำ จึงต้องทำการวัดอย่างละเอียด
- 6.2 ความหนาฟิล์มอากาศ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของ โรเตอร์
- 6.3 ความหนาของฟิล์มอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความกว้างของแผ่นฟิล์มบางมีความกว้างเพิ่มขึ้น
- 6.4 ความหนาของฟิล์ม ขยายลอยตัวจะมีค่าไม่เกิน 48 ไมครอน หากสูงเกินไปจะทำให้เกิดการลื่นไถล

ข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบชุดทดลองควรออกแบบให้ถูกกลิ้งหมุนและแผ่น Web อยู่กับที่จะคิดว่าเป็นแบบแผ่น Web เคลื่อนที่ และควรติดตั้งเซนเซอร์ไว้ด้านนอกลูกกลิ้งเนื่องจากเวลาวัดจะได้ค่าที่แน่นอน (เพราะวัดวัดอยู่นิ่ง) ซึ่งผลการทดลองที่ออกมาจะคล้ายกันแต่มีค่าผิดพลาดน้อยกว่ามาก

บรรณานุกรม

- [1] กฤษณะ มีมาก และ มงคล มงคลวงศ์โรจน์. 2550. “การหล่อลื่นแบบเทอร์โมอีลาสโตไฮโดรไดนามิกที่สัมผัสเป็นเส้นตรงในโรลเลอร์ที่เป็นวัสดุอ่อน” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] Bernard J. Hamrock , “Fundamentals of fluid film lubrication” , vol. 24, no.4, 1984, pp.275-287
- [3] H. Okamura , “A contribution to the numerical analysis of isothermal elastohydrodynamic lubrication” , Journal of Tribology, 1982 , pp.313-320
- [4] H.Hashimoto and M.Okajima “Theoretical and Experimental Investigations Into Spacing Characteristics Between Roller and Three Types of Web With Different Permeabilities, vol 128, 2006, pp.267-274

ภาคผนวก

ความเร็ว(m/s)	แรงดันไฟฟ้า (Volt)			
	แผ่นทดลองขนาด 12 cm.	แผ่นทดลองขนาด 10 cm.	แผ่นทดลองขนาด 8 cm.	แผ่นทดลองขนาด 6 cm.
0	-4.91	-4.94	-4.95	-4.95
0.1	-4.88	-4.91	-4.93	-4.93
0.2	-4.85	-4.87	-4.91	-4.92
0.3	-4.83	-4.86	-4.89	-4.9
0.4	-4.82	-4.85	-4.88	-4.89
0.5	-4.81	-4.83	-4.88	-4.88
0.6	-4.8	-4.83	-4.87	-4.88
0.7	-4.8	-4.82	-4.86	-4.87
0.8	-4.79	-4.81	-4.85	-4.86
0.9	-4.78	-4.8	-4.85	-4.86
1.0	-4.78	-4.8	-4.84	-4.86
1.1	-4.78	-4.8	-4.84	-4.85
1.2	-4.77	-4.79	-4.83	-4.85
1.3	-4.76	-4.78	-4.8	-4.84
1.4	-4.75	-4.78	-4.79	-4.83

ตาราง ผลการทดสอบที่ได้ที่ความเร็ว ความกว้าง Web และแรงดันที่ได้ จากการทดสอบ

ความเร็ว(m/s)	แรงดึง (N/m)	ความกว้างแผ่น 0.12 m			
		ϵ	λ	หากการทฤษฎี (μm)	หากการทดลอง (μm)
0	14	0	#DIV/0!	#DIV/0!	0
0.1	14	7.9714E-07	80.88771063	3.915622647	5.771561592
0.2	14	1.5943E-06	64.20061848	6.160769062	13.46697705
0.3	14	2.3914E-06	56.08440612	8.022743604	15.39083091
0.4	14	3.1886E-06	50.95606465	9.670721217	17.31468478
0.5	14	3.9857E-06	47.30342014	11.1748824	21.1623925
0.6	14	4.7829E-06	44.51422264	12.57292228	21.1623925
0.7	14	0.00000558	42.28469449	13.88804103	23.08624637
0.8	14	6.3771E-06	40.44385532	15.13579778	25.01010023
0.9	14	7.1743E-06	38.8867553	16.32726725	26.9339541
1	14	7.9714E-06	37.54474945	17.47068568	26.9339541
1.1	14	8.7686E-06	36.37069908	18.57238831	26.9339541
1.2	14	9.5657E-06	35.33096192	19.63738032	28.85780796
1.3	14	1.0363E-05	34.40076441	20.66970309	30.78166182
1.4	14	0.00001116	33.56138425	21.67267921	30.78166182
1.5	14	1.1957E-05	32.79835967	22.64908228	32.70551569

ตาราง การคำนวณหาค่าที่ใช้ต่างๆ ขนาดความกว้างของแผ่น Web คือ 0.12 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็ว (m/s)	แรงดึง (N/m)	ความกว้างหน้า 0.10 m			
		ϵ	λ	ห่างทฤษฎี(μm)	ห่างการทดลอง(μm)
0	14	0	#DIV/0!	#DIV/0!	0
0.1	14	7.97143E-07	67.40642553	3.888991318	5.999
0.2	14	1.59429E-06	53.5005154	6.10793054	11.998
0.3	14	2.39143E-06	46.7370051	7.943932102	15.997
0.4	14	3.18857E-06	42.46338721	9.566112928	17.997
0.5	14	3.98571E-06	39.41951678	11.04462207	19.997
0.6	14	4.78286E-06	37.09518553	12.41713441	21.996
0.7	14	0.00000558	35.2372454	13.70683571	21.996
0.8	14	6.37714E-06	33.70321276	14.9292743	23.996
0.9	14	7.17429E-06	32.40562942	16.09551639	25.996
1	14	7.97143E-06	31.2872912	17.21379135	25.996
1.1	14	8.76857E-06	30.3089159	18.2904287	25.996
1.2	14	9.56571E-06	29.44246827	19.33042881	27.996
1.3	14	1.03629E-05	28.66730367	20.3378289	29.995
1.4	14	0.00001116	27.96782021	21.31594797	31.995
1.5	14	1.19571E-05	27.33196639	22.26755644	31.995

ตาราง การคำนวณหาค่าที่ใช้ต่างๆ ขนาดความกว้างของแผ่น web คือ 0.10 m

ความเร็ว (m/s)	แรงดึง (N/m)	ความกว้างหน้า 0.08 m			
		ϵ	λ	ห่างทฤษฎี(μm)	ห่างการทดลอง(μm)
0	14	0	#DIV/0!	#DIV/0!	0
0.1	14	7.97143E-07	53.92514042	3.84932247	3.999
0.2	14	1.59429E-06	42.80041232	6.029373639	5.999
0.3	14	2.39143E-06	37.38960408	7.826918316	11.998
0.4	14	3.18857E-06	33.97070977	9.410966609	13.998
0.5	14	3.98571E-06	31.53561343	10.8516097	13.998
0.6	14	4.78286E-06	29.67614843	12.18648514	15.997
0.7	14	0.00000558	28.18979632	13.43875225	17.997
0.8	14	6.37714E-06	26.96257021	14.6239394	19.997
0.9	14	7.17429E-06	25.92450353	15.7530972	19.997
1	14	7.97143E-06	25.02983296	16.83444232	21.996
1.1	14	8.76857E-06	24.24713272	17.87429379	21.996
1.2	14	9.56571E-06	23.55397462	18.87764308	23.996
1.3	14	1.03629E-05	22.93384294	19.84851979	29.995
1.4	14	0.00001116	22.37425617	20.79023629	31.995

ตาราง การคำนวณหาค่าที่ใช้ต่างๆ ขนาดความกว้างของแผ่น Web คือ 0.08 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็ว (m/s)	แรงดึง (N/m)	ความกว้างแผ่น 0.06 m			
		ϵ	λ	ห่างทฤษฎี(μm)	ห่างการทดลอง(μm)
0	14	0	#DIV/0!	#DIV/0!	0
0.1	14	7.97143E-07	40.44385532	3.783949445	3.999
0.2	14	1.59429E-06	32.10030924	5.900314493	5.999
0.3	14	2.39143E-06	28.04220306	7.635104582	9.998
0.4	14	3.18857E-06	25.47803233	9.157099048	11.998
0.5	14	3.98571E-06	23.65171007	10.53626405	13.998
0.6	14	4.78286E-06	22.25711132	11.81015649	13.998
0.7	14	0.00000558	21.14234724	13.00187851	15.997
0.8	14	6.37714E-06	20.22192766	14.12691545	17.997
0.9	14	7.17429E-06	19.44337765	15.19628413	17.997
1	14	7.97143E-06	18.77237472	16.21817384	17.997
1.1	14	8.76857E-06	18.18534954	17.19888091	19.997
1.2	14	9.56571E-06	17.66548096	18.14337762	19.997
1.3	14	1.03629E-05	17.2003822	19.05567708	21.996
1.4	14	0.00001116	16.78069213	19.93907733	23.996

ตาราง การคำนวณหาค่าที่ใช้ต่างๆ ขนาดความกว้างของแผ่น web คือ 0.06 m

ความเร็ว (m/s)	แรงดึง (N/m)	ความกว้างแผ่น ∞		
		ϵ	λ	ห่าง $L = \infty$
0	14	0	#DIV/0!	#DIV/0!
0.1	14	7.97143E-07	6.74E+101	4.051004458
0.2	14	1.59429E-06	5.35E+101	6.430568737
0.3	14	2.39143E-06	4.67E+101	8.426428839
0.4	14	3.18857E-06	4.25E+101	10.20789158
0.5	14	3.98571E-06	3.94E+101	11.84520869
0.6	14	4.78286E-06	3.71E+101	13.376122
0.7	14	0.00000558	3.52E+101	14.82386374
0.8	14	6.37714E-06	3.37E+101	16.20401783
0.9	14	7.17429E-06	3.24E+101	17.52767831
1	14	7.97143E-06	3.13E+101	18.80309706
1.1	14	8.76857E-06	3.03E+101	20.03662228
1.2	14	9.56571E-06	2.94E+101	21.23327014
1.3	14	1.03629E-05	2.87E+101	22.39709141
1.4	14	0.00001116	2.8E+101	23.5314169
1.5	14	1.19571E-05	2.73E+101	24.6390274

ตาราง การคำนวณหาค่าที่ใช้ต่างๆ ขนาดความกว้างของแผ่น web คือ ∞

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



บทความประกอบวิชา 01054025 Project 2 ภาคเรียนที่ 2/2550 จันทร์ ที่ 17 มีนาคม 2551

ระบบการขนย้ายฟิล์มบางที่มีลักษณะยืดหยุ่น¹

ทรงกฤษ คงประเสริฐ², ณัฐพงศ์ ศรีสง่า², พงษ์พันธ์ นาคศิริ², มงคล มงคลวงค์โรจน์³

บทคัดย่อ

แผ่นฟิล์มบางคือวัสดุที่บางยืดหยุ่นได้ เช่น กระดาษ ฟอยล์ หรือ พลาสติกแผ่น ในระบบขนย้ายวัสดุฟิล์มบางซึ่งเป็นการทำให้แผ่นฟิล์มบางและลูกกลิ้งเคลื่อนที่แยกออกจากกันโดยพฤติกรรมของอากาศ คล้ายๆกับว่ามีวัตถุยืดหยุ่นเองได้ ความหนาของฟิล์มอากาศของวัตถุยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญที่สุดในระบบการขนย้ายแผ่นฟิล์มบาง ในโครงการนี้รูปแบบเริ่มแรกของระบบการขนย้ายแผ่นฟิล์มบาง คือ สร้างเครื่องมือสำหรับวัดค่าความหนาของฟิล์มอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มบางและลูกกลิ้ง การทดลองเป็นการปฏิบัติเพื่อวัดค่าความหนาของฟิล์มอากาศ ของการรวมกันของกระดาษและฟอยล์ สำหรับ 6 เซนติเมตร, 8 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร, และ 12 เซนติเมตร ตามลำดับ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วของฟิล์มบาง เซ็นเซอร์วัดระยะห่างชนิดเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าใช้สำหรับวัดค่าความหนาของฟิล์มอากาศ การเทียบมาตรฐานและระบบการวัดของความหนาของฟิล์มอากาศจะใช้เซ็นเซอร์วัดระยะห่างทำให้อุปกรณ์แม่นยำสำหรับหนึ่งปริมาตรเล็กๆของความหนาของฟิล์มอากาศ ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง ที่แต่ละการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ ผลการทดลองแสดงความหนาของฟิล์มอากาศที่เพิ่มขึ้น มีความสำคัญอย่างยิ่งกับการเพิ่มขึ้นของความเร็วของแผ่นฟิล์มบาง และความหนาของอากาศที่เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของความกว้างของแผ่นฟิล์มบาง

Abstract

Web is a thin flexible material such as paper foil or plastic sheets. In the web transportation system the moving web and roller are separated by the surrounding air that behaves like a self acting flexible bearing. The air film thickness of the flexible bearing is the most significant variable in web transport system. In this project, a prototype of the web transportation system is constructed to be able to measure the air film thickness between the web and the roller. The experiments are conducted to measure the air film thickness of combined paper and foil web for 6 cm, 8 cm, 10 cm, and 12 cm respectively under varying web velocity. The inductive type gap sensor is used to measure the film thickness. Calibration and measurement of the film thickness using gap sensor were done precisely for a very small value of air film thickness. Tests were done ten times at each operating condition for obtaining the accurate results. The experimental results show that air film thickness increase significantly with the increase in web velocity and the air film thickness increase with the increase of the web width.

1. บทนำ

วัสดุที่มีความบางและสามารถตัดโค้งได้อย่างเช่น กระดาษ ลิงทอ ฟิล์มพลาสติก และแผ่นอลูมิเนียมบาง บางครั้งเราเรียกสิ่งพวกนี้ว่า “Web” ระบบการขนส่ง Web ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญของงานอุตสาหกรรม ในการเคลื่อนย้ายแผ่น Web โดยการหมุนของลูกกลิ้งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือเกิดการแทรกตัวของอากาศระหว่างผิวสัมผัสของลูกกลิ้งกับ Web ซึ่งจะเรียกการหล่อลื่นแบบนี้ ว่า Soft Elastohydrodynamic Lubrication air film ถ้าความหนาแน่นของฟิล์มอากาศมีขนาดใหญ่และหนากว่าผิวหน้าของความสูงของแผ่น web และลูกกลิ้ง ก็จะทำให้เกิดความฝืดและสูญเสียความสมดุล

ในบางกรณีลูกกลิ้งจะไม่สามารถขับเคลื่อนได้เนื่องจากกำลังดึงไม่เพียงพอ จึงทำให้ความเร็วลดลง ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่าง Web และลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการคาดการณ์ว่า ความหนาแน่นของฟิล์มอากาศมีความเหมาะสมในการใช้หรือไม่

¹ ชื่ออังกฤษ “Flexible web for material handling system”

² นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 3Q/1 และ 3Q/2 รหัส 48015375 และ 48015416, 48015426 ตามลำดับ

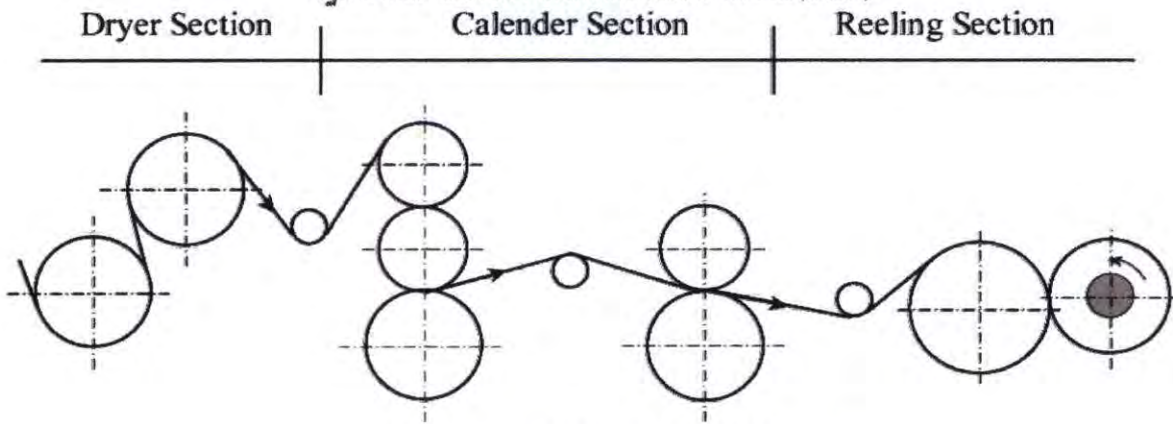
³ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล kmmongko@kmitl.ac.th

© 2006 Department of Mechanical Engineering, KMITL. All rights reserved

Keywords: flexible web transportation system, self acting air bearing, air film thickness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่วารณิใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 1 ตัวอย่างของระบบขนถ่ายด้วยฟิล์มบาง(เครื่องผลิตกระดาษ)

ในขั้นแรก แบบจำลองจะทำการหาปัญหาที่เกิดขึ้นของ แผ่นฟิล์มบางและลูกกลิ้งโดยการประมาณความหนาแน่นของฟิล์มอากาศระหว่างแผ่น web และลูกกลิ้ง โดยปัญหานี้จะมีลักษณะเดียวกันกับหัวอ่านเทป (หัวกระดาษหมุนที่ใช้ในการรับโทรเลข, หัวแถบพลาสติกเคลือบสารแม่เหล็กเป็นม้วนสำหรับบันทึกเสียง) ในสิ่งพิมพ์ประเภทแคตตาล็อกหรือใบปลิว เมื่อความยาวของเทป มากกว่าระยะที่จะหุ้มหัวอ่าน ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในที่สุด โดยใช้สมการของเรย์โนลด์ ในการคำนวณเกี่ยวกับขนาดของหัวอ่านเทป (one dimension) การวิเคราะห์เพื่อจำแนกหาความสูง สามารถพิจารณาผลกระทบของความกว้างของเทป โดยจุดมุ่งหมายของผู้เขียนรายงานฉบับนี้ เพื่อนำไปปรับปรุงและแก้ปัญหา และเป็นพื้นฐานในการจัดทำแบบจำลองความหนาแน่นของ air film แบบ one dimension

ปัญหาของแบบจำลองของลูกกลิ้ง คือ ผลกระทบของความกว้างของแผ่น Web เพราะเมื่อแผ่น Web มีความกว้างมาก จะทำให้อากาศสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่ายเช่นเดียวกับการที่น้ำซึมผ่านกระดาษ และ สิ่งทอ พิจารณาจากฐานของฟิล์มอากาศแบบ one dimension การใช้แบบจำลองจะต้องพิจารณาจาก การซึมผ่านของน้ำ ความกว้างของแผ่น Web, wrap angle, และการรั่วไหล โดยนำเสนอในรูปแบบของวัตถุทรงกระบอกแบบจำลองการเคลื่อนที่ของของแข็งที่มีลักษณะหยาบ

ในรายงานนี้ ทฤษฎีการใช้แบบจำลอง สามารถคำนวณการดันตัวขึ้นของความหนาแน่นฟิล์มอากาศระหว่างแผ่น Web และ roller โดยนำเสนอแบบทั้งหมดในรูปแบบของการที่น้ำซึมผ่าน และไม่ซึมผ่าน เห็นได้จากตัวอย่างของสูตรแบบปิดที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นฟิล์มอากาศ เพื่อใช้หาผลของการรวมตัวของอากาศ ที่เริ่มจากด้านขอบหรือมุมของ Web และการแพร่กระจายการซึมของอากาศ ผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง

2. วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบและวัดค่าความหนาของอากาศ , แรงดึงของแผ่นฟิล์มบาง และ แรงเสียดทาน ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ เพื่อที่จะได้ค่า ฟิล์มอากาศที่เหมาะสมระหว่างแผ่น Web กับลูกกลิ้ง

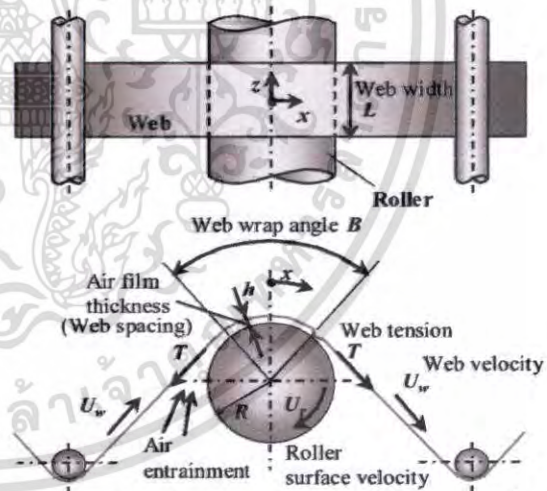
3. ขอบเขตงานวิจัย

3.1 ศึกษาพฤติกรรมความหนาของอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง

3.2 ออกแบบและสร้างชุดทดลอง

3.3 ทดสอบและบันทึกผลการทดลอง

3.4 สรุปผลการทดลองพร้อมอธิบายความสัมพันธ์ต่าง ๆ



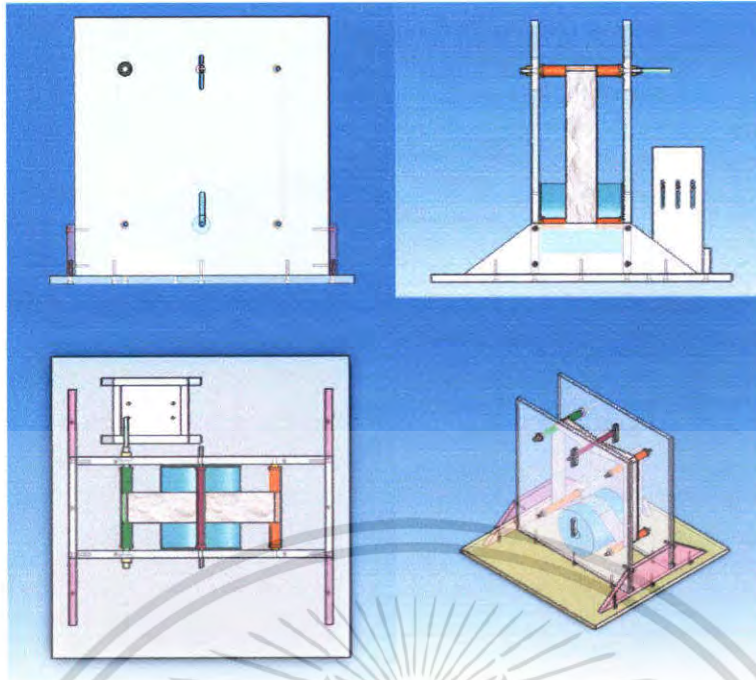
รูป 2 การเกิดฟิล์มอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในระบบขนถ่ายด้วยแผ่นฟิล์มบางสิ่งสำคัญที่คำนึงถึงคือระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้งและแรงดึงของแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้งนั้นสามารถหาได้โดย สมการเรย์โนลด์ (Reynolds equation)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 p \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 p \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\eta U \frac{\partial (ph)}{\partial x} \quad (1)$$

3.2 ออกแบบและสร้างชุดทดลอง



รูป 3 แสดงชุดทดลอง

นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับสมการสมดุลของแผ่นฟิล์มดังนี้คือ

1. ไม่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากการแอ่นตัว
2. คัดการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงตึงเท่านั้น
3. สมมติว่าอากาศที่ไหลระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้งเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)

ดังนั้นสมการสมดุลของแผ่นฟิล์มบางจะเขียนได้ว่า

$$\frac{T}{R} - T \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} (p - p_a) dz \quad (2)$$

และสมการความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้งคือ

$$h = w + d \quad (3)$$

เมื่อ d มีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$d = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(x + \frac{RB}{2} \right)^2 & \left(x < -\frac{RB}{2} \right) \\ 0 & \left(-\frac{RB}{2} \leq x \leq \frac{RB}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(x - \frac{RB}{2} \right)^2 & \left(x > \frac{RB}{2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับสมการเรย์โนลด์ (Reynolds equation)

$$\begin{aligned} p(x_s, z) &= p_a, & p(x_e, z) &= p_a \\ p\left(x, -\frac{L}{2}\right) &= p_a, & p\left(x, \frac{L}{2}\right) &= p_a \end{aligned} \quad (5)$$

เงื่อนไขขอบเขตสำหรับสมการสมดุลของแผ่นฟิล์มบาง

$$\begin{aligned} w(x_s) &= 0, & w(x_e) &= 0 \\ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{x=x_s} &= 0, & \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{x=x_e} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ x_s และ x_e แสดงระยะพิกัดของทางเข้าและทางออกของส่วนที่สัมผัสกันระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง

ในการคำนวณเราจะพบตัวแปรไร้มิติที่มีบทบาทสำคัญอยู่ 2 ตัว

คือ ε และ λ

เมื่อ $\varepsilon = \text{web parameter} (= 6U\eta/T)$

$\lambda = \text{normalized web width} (= L/(2R\varepsilon^{1/3}))$

ซึ่งมีส่วนในการช่วยออกแบบเป็นอย่างมาก การหาค่าระยะห่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง

$$h_0^- = \frac{h_0}{R\varepsilon^{2/3}} = 0.589 - \frac{1.614}{\lambda} + \frac{1.764}{\lambda^2} \quad (7)$$

ในการออกแบบเราใช้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ค่ารัศมีของ Roller (R) = 0.08 m

ค่าความตึงของแผ่น Web (T) = 14 N/m

ความกว้างของแผ่น Web (L) = 0.06-0.12 m

และค่าความเร็วของแผ่น Web (U) = 0.1-1.0 m/s

คำนวณ ทาค่า $\varepsilon^{-1/3}$ เมื่อค่า $\eta = 1.86 \times 10^{-5} \frac{N \cdot s}{m^2}$

$$\begin{aligned} \varepsilon^{-1/3} &= \left[\frac{(6U\eta)}{T} \right]^{-1/3} \\ &= \left[\frac{6 \times 0.10 \times 1.86 \times 10^{-5}}{14} \right]^{-1/3} \\ &= 107.85 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่า $\varepsilon^{-1/3}$ ไปคำนวณหาค่า λ ต่อไปโดย

$$\begin{aligned} \lambda &= \left(\frac{L}{2R\varepsilon^{1/3}} \right) \\ &= \left(\frac{0.12}{2 \times 0.80} \right) \times 107.85 \\ &= 8.089 \end{aligned}$$

ในการทดลองเราจะเปลี่ยนค่าความเร็วของแผ่น Web, ความกว้างของแผ่น web และ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 2 ชนิด

- ได้แก่ 1. กระดาษหนังสือพิมพ์
- 2. แผ่นพลาสติกบาง

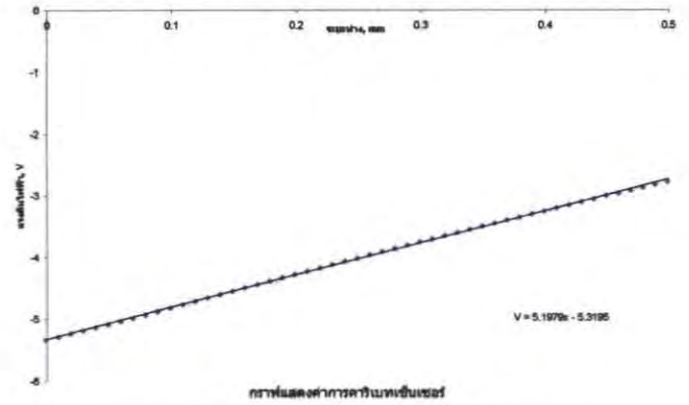
จากนั้นบันทึกค่าการทดลองในตาราง บันทึกผลเพื่อเปรียบเทียบกันว่าชนิดไหนจะเกิด Air Film thickness ที่ความเร็ว และความกว้างเท่า ๆ กัน

5. การดำเนินงานที่ผ่านมา

เดือน	รายการ
ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2550	Project 1: ระบบการขนย้ายด้วยฟิล์มบางที่มีลักษณะยืดหยุ่น
ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2550	Project 2: ออกแบบชุดทดลองและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง
พฤศจิกายน 2550	สร้างชุดทดลอง
ธันวาคม 2550	ทดลองและเก็บค่า
มกราคม 2551	ปรับปรุงชุดทดลองใหม่
กุมภาพันธ์ 2551	ทดลองและเก็บค่าใหม่
มีนาคม 2551	นำเสนอ Project 2

ในการทดลองเราจะใช้กราฟหลัก ๆ คือกราฟแสดงค่าการคาบบริบทเซ็นเซอร์โดยจะใช้สมการความชันเส้นตรงที่หาได้เป็นสมการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



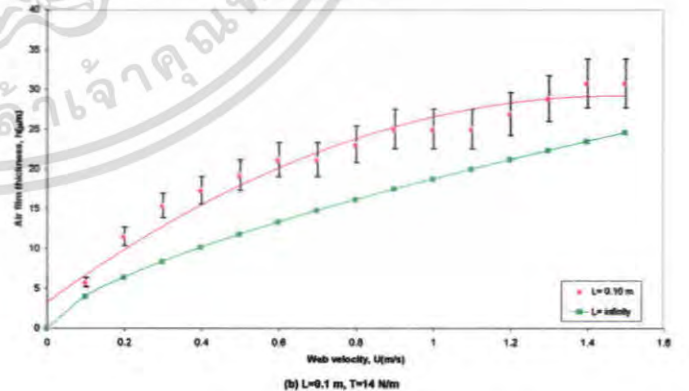
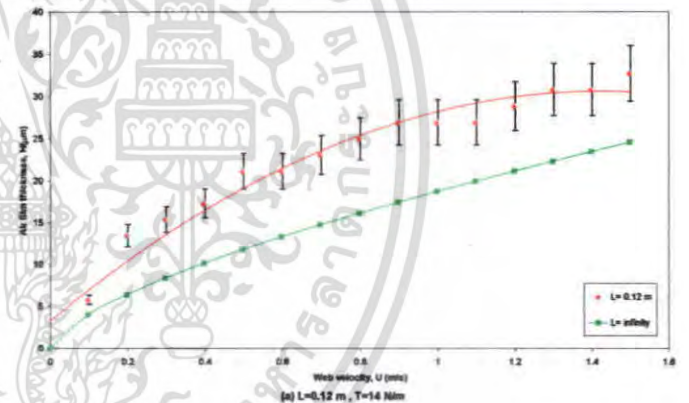
โดยความสัมพันธ์ของระยะห่างกับแรงดันไฟฟ้าจะได้

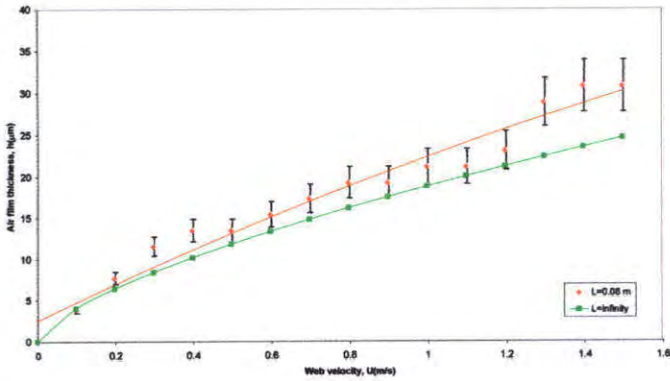
$$V = 5.1979X - 5.3195 \quad (8)$$

ดังนั้นสามารถหาระยะห่างได้โดย

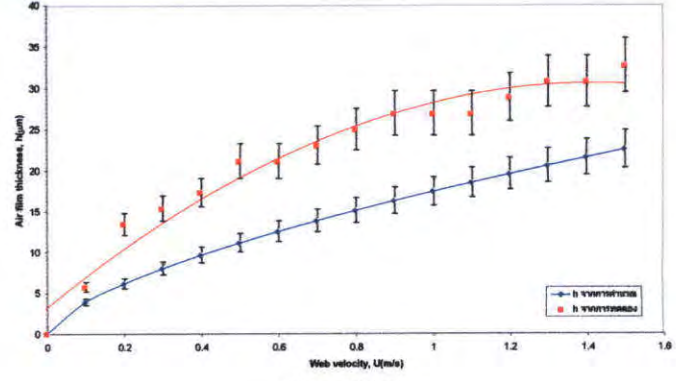
$$X = \frac{V + 5.3195}{5.1979} \quad (9)$$

ซึ่งค่า V นั้นได้จากการทดลองโดยตรงในการหาค่า h เรากำหนดให้ $X = h$ ดังนั้น เมื่อแทนค่า V ลงในสมการ (9) จะได้ค่า h แล้วเรานำไปพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแผ่น Web กับ ความหนาของฟิล์มอากาศ

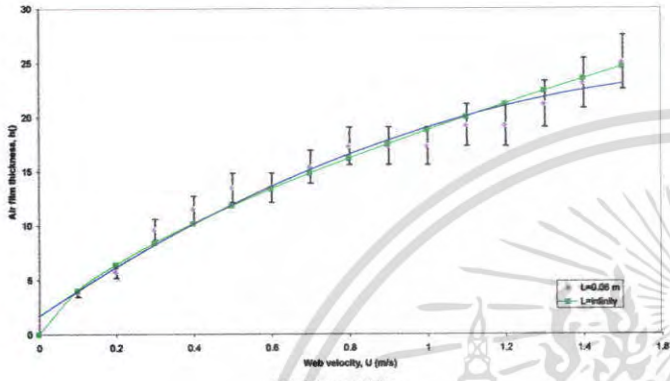




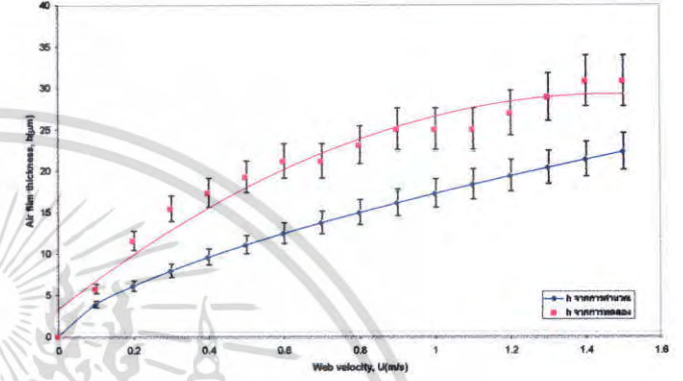
(c) L=0.08 m, T=14 N/m



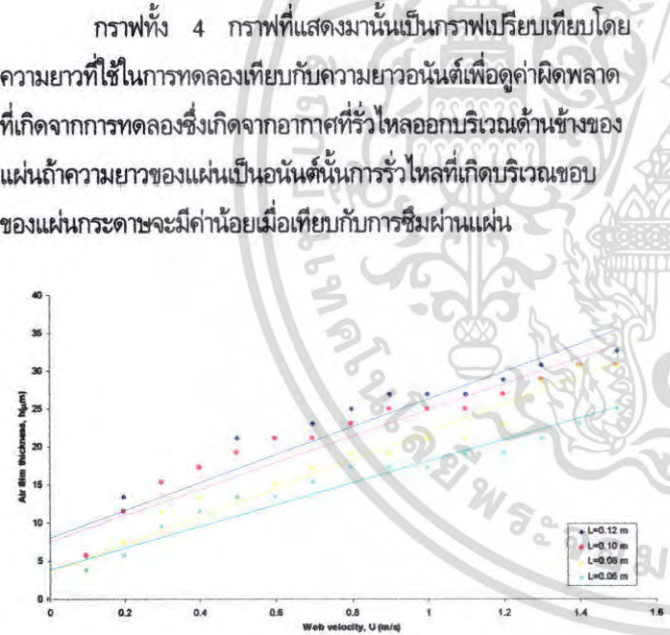
L= 0.12 m, T=14 N/m



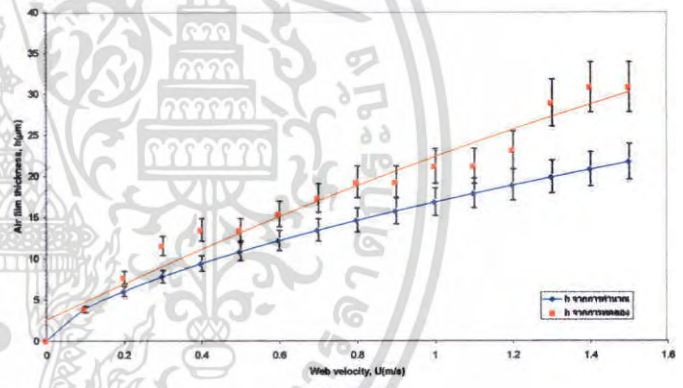
(d) L=0.06 m, T= 14 N/m



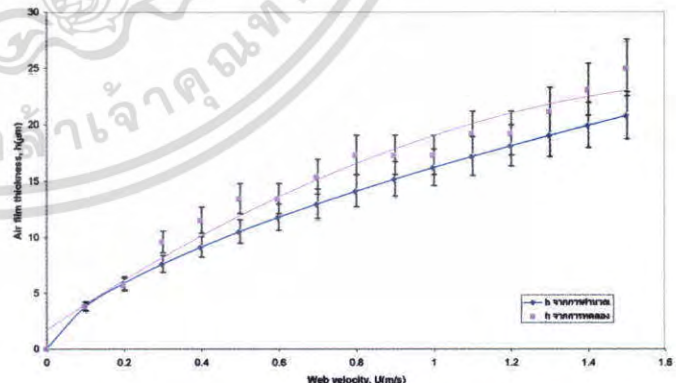
L= 0.10 m, T=14 N/m



ตารางเปรียบเทียบผลจากความกว้าง



L=0.08m, T=14 N/m



L=0.06m, T=14 N/m

จากตารางการเปรียบเทียบผลการทดลองของแต่ละความกว้างของแผ่นจะพบว่าที่ความเร็วเดียวกันเมื่อความกว้างของแผ่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้นตามด้วยดังนั้นในแผ่นที่มีความกว้างมากจะเกิดการสั่นไถลมากตามไปด้วย

ในการทดสอบเมื่อได้ค่า h แล้วเรานำค่า h ที่ได้มาพล็อตกราฟเปรียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณก็จะได้ผลตามกราฟทั้ง 4 รูปด้านบน

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นจะมีความสูงมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดในการทดลอง ไม่ว่าจะเกิดจากเครื่องทดลองที่ไม่สมบูรณ์, แผ่น Web ไม่สมบูรณ์ และความสามารถของเซ็นเซอร์ไม่ดีพอ จึงทำให้เกิดค่าเหล่านั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในฐานการประชาสัมพันธ์ และไม่หวังกำไร หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	u ความเร็วของลูกกลิ้ง (m/s)
B มุมที่สัมผัสกันระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง	w มุมเบี่ยงเบนของแผ่นฟิล์มบาง (μm)
h ค่าความหนาฟิล์มอากาศ (μm)	x ระยะ x (m)
L ความกว้างของแผ่นฟิล์มบาง (m)	x_c ขอบเขตทางเข้าที่บรรจบกันของแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง (m)
p ความดันของฟิล์มอากาศ (Pa)	x_c ขอบเขตทางออกที่บรรจบกันของแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง (m)
p_a ความดันของบรรยากาศโดยรอบ (Pa)	z พิกัดในมุมหักเหตามแนวแกนของลูกกลิ้ง (m)
R รัศมีลูกกลิ้ง (m)	ϵ web parameter
T ค่าความตึง (N/m)	λ normalized web width

6. สรุป

โครงการนี้ได้ออกแบบพัฒนาและทดสอบระบบขนย้ายฟิล์มบาง และได้ศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของแผ่นฟิล์มบางสามารถสรุปได้ดังนี้

- 6.1.ความหนาของฟิล์มอากาศลอยด้วยก Web เป็นพฤติกรรมสำคัญต่อระบบขนถ่ายฟิล์มบาง เนื่องจากมีค่าต่ำ จึงต้องทำการวัดอย่างละเอียด
- 6.2.ความหนาฟิล์มอากาศ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของโรเตอร์
- 6.3.ความหนาของฟิล์มอากาศจะมีค่าเพิ่ม เมื่อความกว้างของ Web มีความกว้างเพิ่มขึ้น
- 6.4. ความหนาของฟิล์มอากาศลอยตัวจะมีค่าไม่เกิน 48 ไมครอน หากสูงเกินไปจะทำให้เกิดการสิ้นไถล

ข้อเสนอแนะ ในการออกแบบชุดทดลองควรออกแบบให้ลูกกลิ้งหมุนและแผ่น Web อยู่กับที่จะดีกว่าแบบแผ่น Web เคลื่อนที่และควรติดตั้งเซ็นเซอร์ไว้ด้านนอกลูกกลิ้งเนื่องจากเวลาวัดจะได้ค่าที่แน่นอน(เพราะวัดวัตถุอยู่นิ่ง) ซึ่งผลการทดลองที่ออกมาจะคล้ายกันแต่มีค่าผิดพลาดน้อยกว่ามาก

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ที่ให้คำแนะนำในการทำงานครั้งนี้ ไม่ว่าจะเป็น แนวทางในการศึกษาข้อมูล หรือการเขียนบทความก็ตาม

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] กฤษณะ มีมาก และ มงคล มงคลวงศ์โรจน์. “การหล่อเส้นแบบเทอร์โมออสโตไซโตโรไดนามิคที่สัมผัสเป็นเส้นตรงในโรลเลอร์ที่เป็นวัสดุอ่อน”
- [2] Dr. Karl N, Reid. 1983. Web Handling Research Center.
- [3] H,Hashimoto and M,Okajima “Theoretical and Experimental Investigations Into Spacing Characteristics Between Roller and Three Types of Web With Different Permeabilities” vol.128, April 2006. Pp.267-27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้