



รายงานฉบับสมบูรณ์

Final Report

พฤติกรรมการไหลแบบนาโนของของไหลระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นฟิล์มบางที่
ยืดหยุ่นได้

Nano-Flow Characteristics of Fluids between Roller and Flexible Web

รศ. ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์

นาย คมสัน ม่วยศรี

นาย พุทธา จินครวั

RCA
TA
357
2114 พ

ห้องปฏิบัติการวิจัย Electro-Mechanical Engineering Lab

สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กันยายน พ.ศ. 2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 83861
วัน,เดือน,ปี... 19 ก.ย. 2551

Electro-Mechanical Engineering Laboratory

Research Center for Communications and Information Technology

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

b. 11986025
i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
September 2007

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (Research Center for Communications and Information Technology : ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2550 วงเงินงบประมาณ 131,942.00 บาท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปย่อ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การออกแบบพัฒนาชิ้นส่วนของเครื่องจักรสมัยใหม่ในการผลิตแผ่นฟิล์มใยแก้วนำแสงและแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ทำงานที่ความเร็วและรับภาระสูงมากขึ้นเรื่อยๆ โดยที่เครื่องจักรจะต้องมีอายุการใช้งานนานที่สุดหรือมีความสึกหรอต่ำที่สุด ใช้พลังงานน้อยที่สุด การเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ดังนั้นการเกิดฟิล์มบางของแผ่นฟิล์มที่เคลื่อนที่บนลูกกลิ้งจะเป็นผลดีต่อเครื่องจักรในกระบวนการผลิต แต่ถ้าเกิดฟิล์มบางมากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดการสึกหรอมากได้ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน การคำนวณชั้นสูงควมมีข้อจำกัดในการคำนวณหาฟิล์มบางมากของไหลจะมีความหนาในระดับไมโครเมตรจนกระทั่งฟิล์มอยู่ในระดับนาโนเมตร แรงดันที่เกิดขึ้นในฟิล์มของไหลมีค่าสูงมากคือในระดับ 1 Gpa สมการคำนวณจะเป็นสมการไม่เชิงเส้นมากเป็นผลทำให้เกิดความไม่เสถียรของการคำนวณเชิงตัวเลข จึงต้องใช้เทคนิคการคำนวณชั้นสูงแบบใหม่ๆ เพื่อให้การคำนวณเชิงตัวเลขที่เสถียร ผลงานวิจัยนี้เชื่อว่าจะเป็นกุญแจสำคัญต่อการพัฒนาชิ้นส่วนเครื่องจักรกลให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมาก

2. วัตถุประสงค์

1. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณพฤติกรรมเกิดการเกิดฟิล์มของของไหลระหว่างผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักร ใช้สารของไหลชนิด นอนนิวโทเนียนและประยุกต์การคำนวณเชิงตัวเลขด้วย
2. จำลองพฤติกรรมของแผ่นฟิล์มที่เคลื่อนที่บนลูกกลิ้งแบบ Elastohydrodynamic
3. หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบแผ่นฟิล์มที่เคลื่อนที่บนลูกกลิ้ง

3. ระเบียบวิธีวิจัย

1. เขียนสมการ Reynolds สมการความยืดหยุ่นของวัสดุ และสมการพลังงานให้อยู่ในรูปสมการเชิงตัวเลข โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องร่วมกับวิธี multi-grid multi-level method เพื่อลดเวลาการคำนวณของคอมพิวเตอร์ เนื่องจากเป็นสมการไม่เชิงเส้นมาก
2. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองพฤติกรรมแผ่นฟิล์มที่เคลื่อนที่บนลูกกลิ้งที่ตะสัมผัสเป็นเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ติดตั้งลูกกลิ้งและ แบริ่งเพื่อศึกษาเชิงทดลองช่วง steady state โดยการวัดความหนาฟิล์มของของไหลที่สภาวะการทำงานต่างๆ
4. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Mongkolwongroj, M., "An Application of a Mathematical Programming Technique on Optimal Spacing Characteristics in Web Transport System", Proceedings of ICEAST-2007.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้นำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการหาค่าความหนาของฟิล์มอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้งในกรณีที่แผ่นฟิล์มไม่สามารถให้อากาศทะลุผ่านได้

สมการตัดแปลงเรโนลด์และสมการแสดงการเคลื่อนที่ของแผ่นฟิล์มบางได้ถูกเขียนขึ้นสำหรับในกรณีที่เป็นของไหลแบบนิวโทเนียนและคำนวณหาคำตอบด้วยวิธีเชิงตัวเลข โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ถูกพัฒนาเพื่อจำลองพฤติกรรมของระบบแผ่นฟิล์มบางที่เคลื่อนที่บนลูกกลิ้งและหาขนาดของระบบแผ่นฟิล์มบางและลูกกลิ้งที่ให้พฤติกรรมที่เหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

A theoretical model for estimating the entrained air film thickness between web and roller is presented for impermeable webs. Modified Reynolds equation and the equation of motion were formulated with Newtonian fluid. The simultaneous equations for the compressible Reynolds equation and the equation of motion were solved numerically using Newton Raphson method. Computer program is developed to simulate and to get optimal characteristics of web and roller system. Experiments were performed to measure the entrained air film thickness between web and roller system.

คำย่อและสัญลักษณ์

h_0 = minimum air film thickness at the central position web (μm)

H_0 = normalized minimum air film thickness at the central position ($\equiv h_0 / (R\varepsilon^{2/3})$)

L = web width (m)

p = air film pressure (Pa)

p_a = ambient pressure (Pa)

P = normalized air film pressure ($\equiv (p - p_a) / (T / R)$)

PET = materials of web (polyethylene terephthalate)

R = roller radius (m)

T = web tension (N/m)

U = transport velocity ($\equiv U_r + U_w$) (m/s)

U_r = roller velocity (m/s)

U_w = web velocity (m/s)

X = normalized coordinate in the transport direction

Z = normalized coordinate in the axial direction of roller

ε = web parameter ($\equiv 6U\eta / L$)

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

η = air viscosity

σ = composite rms roughness $\sigma = \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_r^2}$ (μm)

σ_r = rms roughness on roller surface (μm)

σ_w = rms roughness on web surface (μm)

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	2
บทสรุปย่อ.....	3
บทคัดย่อ	4
คำย่อและสัญลักษณ์	6
บทที่ 1 บทนำ.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	10
บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	25
บทที่ 4 วิธีการทดลอง.....	28
บทที่ 5 ผลการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข.....	33
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	47
บทที่ 7 เอกสารอ้างอิง.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหา

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมจำพวก กระดาษหนังสือพิมพ์, แผ่นฟิล์มดิครยอนต์, หรือแผ่นฟอลซ์ การขนย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ระบบลูกกลิ้งลำเลียง ซึ่งการขนย้ายด้วยวิธีการนี้มีความสะดวกรวดเร็ว, ง่าย และ ประหยัด

การออกแบบระบบขนย้ายนั้นต้องคำนึงถึงความเร็วในการขนย้ายและการหมุนของลูกกลิ้ง ถ้าลูกกลิ้งตัวขับเคลื่อนเร็วเกินไปจะทำให้เกิดการลื่นไถล สาเหตุของการลื่นไถลนั้นเกิดจากการแทรกตัวของอากาศบริเวณด้านในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นวัสดุบาง จึงกลายเป็นฟิล์มอากาศขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Soft Elastohydrodynamic Lubrication air film”

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อทดสอบหาความหนาของฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นวัสดุบางที่ได้จากชุดทดสอบที่สร้างขึ้นแล้วนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งคำนวณจากสมการเรย์โนลด์ สังกเกตผลที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกับทฤษฎีหรือไม่ และไม่ใกล้เคียงเพราะเหตุใด

1.3 ขั้นตอนของการทำงาน

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

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาพฤติกรรมการความหนาของอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง
- 1.4.2 สร้างชุดทดสอบระบบการขนย้ายฟิล์มบางที่มีลักษณะยึดหยุ่นเพื่อใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 นำแผ่นฟิล์มบางชนิดต่างๆ มาทดสอบหาค่าความหนาของฟิล์มอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.4 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎี เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับพฤติกรรมของแผ่นฟิล์มบาง

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการเกิดความหนาของฟิล์มอากาศ และพัฒนาชุดทดสอบความหนาของฟิล์มอากาศต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 คำนิยามของการไหล

ของไหลคือสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่องกันไป ภายใต้การกระทำของความเค้นเฉือนหนึ่งๆ ทั้งนี้ไม่ว่าความเค้นเฉือนนั้นจะมีค่าน้อยเท่าใดก็ตาม เมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นผิวหนึ่งๆ ก็คือแรงย่อยในแนวสัมผัสกับพื้น แรงเฉือนนี้หารด้วยพื้นที่ของผิวจะเป็นความเค้นเฉือนเฉลี่ยซึ่งกระทำทั่วพื้นผิวนั้น สำหรับความเค้นเฉือนที่จุดหนึ่งๆ คือค่าลิมิต ของแรงเฉือนต่อพื้นที่ผิวซึ่งขณะนั้นพื้นที่มีขนาดลดลงเป็นจุด

การไหลในเชิงกลศาสตร์ หมายถึง การเคลื่อนที่ของสสารโดยไม่คำนึงถึงแรงกระทำอันเป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ในที่นี้ประกอบด้วย การเปลี่ยนตำแหน่งความเร็ว และความเร่ง การเคลื่อนที่ของของไหลถูกเรียกกันโดยทั่วไปว่าการไหล

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน และหลักการอนุรักษ์ของมวลสารร่วมกับกฎของอุณหพลศาสตร์ กฎความหนืดของนิวตันและหลักการเกี่ยวกับขอบเขตของของไหล ของไหลที่ถือว่าเป็นพวกอัดตัวไม่ได้นั้นได้แก่ของเหลวทุกชนิด สำหรับก๊าซถ้าหากความดันที่กระทำกับก๊าซนั้นมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความดันสัมบูรณ์แล้วก็อาจถือได้ว่าก๊าซนั้นเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาสถานะของของแข็งและของไหลในเชิงกลจากปฏิกิริยาพื้นฐานของสสารที่เกิดจากแรงต่างๆ เช่น แรงดึง แรงอัด และแรงเฉือน จะพบว่าเมื่อของแข็งได้รับแรงเฉือนจะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบอย่างถาวร ส่วนของไหลจะไม่สามารถรับแรงเฉือนได้เลยไม่ว่าจะมีขนาดเท่าใดก็ตามเพราะเมื่อได้รับแรงเฉือนแล้วของไหลจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างหรือเกิดการไหลทันที การที่กล่าวว่าของไหลไม่สามารถรับแรงดึงได้นั้นในทางกายภาพของของไหลสามารถรับแรงดึงได้บ้างเล็กน้อย เพราะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล แต่มีค่าต่ำมากจึงถือเสมือนว่าของไหลไม่สามารถรับแรงดึงได้ ซึ่งเป็นสมมุติฐานของทางวิศวกรรมที่ใช้โดยทั่วไป

2.2 สมมุติฐานและขอบเขตคุณสมบัติของของไหล

ในเชิงวิชาการนั้นการกล่าวถึงการไหลที่ประกอบด้วยเงื่อนไขและคุณลักษณะในการพิจารณา การไหลในแต่ละกรณีนั้นมีความซับซ้อนและละเอียดอ่อนมาก ดังนั้นใจโครงการนี้จึงได้กำหนด ขอบเขตสมมุติฐานของคุณสมบัติของของไหลดังต่อไปนี้

2.2.1 ของไหลจริง

ของไหลจริง หมายถึงของไหลที่มีคุณสมบัติตามธรรมชาติและเกิดขึ้นจริงตามลักษณะการใช้งาน เช่น ความตึงผิวและความสามารถในการอัดตัวได้สำหรับของไหลจริงไม่ว่าจะเป็นของเหลวหรือ ก๊าซ ถ้าหากมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นแล้วก็ต้องมีแรงตามแนวสัมผัสหรือแรงเหนือนเกิดขึ้นด้วยเนื่องจากแรง เหล่านี้จะมีทิศทางสวนทางกับทิศทางการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงเสียดทานจากของไหลขึ้นแรง เสียดทานนี้เกิดจากคุณสมบัติอย่างหนึ่งของของไหลที่เรียกว่าความหนืด

2.2.2 ความหนืด

ความหนืดของของไหลเป็นค่าความต้านทานต่อแรงเฉือน หรือเป็นค่าความต้านทานต่อการ เปลี่ยนแปลงรูปร่าง และแรงเสียดทานในของไหลที่กำลังเคลื่อนที่อยู่เป็นผลมาจากแรงเกาะกัน ในระหว่างโมเลกุล และการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในระหว่าง โมเลกุลของของไหลในขณะที่ย้อนกลับ เพิ่มสูงขึ้นนั้นความหนืดของของเหลวทุกชนิดจะลดน้อยลง ส่วนความหนืดของก๊าซทุกชนิดกลับ เพิ่มขึ้น และให้ทำให้ของไหลที่ช้ากว่านั้นเคลื่อนที่ได้ช้าลง การแลกเปลี่ยนโมเลกุลเช่นนี้ทำให้เกิดแรง เหนือนขึ้น ดังนั้นการเคลื่อนไหวของ โมเลกุลก๊าซที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงๆ จึงเป็นสาเหตุทำให้ ก๊าซมีความหนืดสูงขึ้น ณ ที่นี้ของไหลที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นของไหลที่มีความหนืด

2.2.3 ของไหลที่กอดอัดไม่ได้

ของไหลที่กอดอัดไม่ได้ หมายถึง ของไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมากเมื่อมีความ ดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถที่จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรได้หรือกล่าวได้ว่าของไหลที่ กอดอัดไม่ได้คือ ของไหลที่มีความหนาแน่นคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อความดัน เปลี่ยนแปลง

2.2.3 การไหลแบบคงตัว

การไหลแบบคงตัว หมายถึง การไหลของของไหลชนิดที่ความเร็วของกรไหล ณ จุดใดๆ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เช่นเมื่อคำนึงถึงการไหลของของไหลที่ผ่านจุด A ไม่ว่าจะเป็นเวลาใดของการไหลที่ผ่านจุด A นั้นจะมีความเร็วคงที่เสมอและเมื่อพิจารณาที่จุด B ความเร็วของการไหลของของไหลที่ผ่านจุด B ก็คงที่ด้วยแต่ความเร็วที่จุด A และจุด B ไม่จำเป็นต้องเท่ากันเนื่องจากเหตุผลที่ว่า ของไหลไม่สามารถที่จะขาดช่วงได้เพราะจะทำให้ความเร็วของของไหล ณ จุดนั้นๆ เปลี่ยนแปลงทฤษฎีที่ใช้กับการไหลคงตัวเป็นทฤษฎีเบื้องต้น และการใช้งานทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ จัดว่าเป็นการไหลของของไหลเป็นแบบคงตัว

2.3 ทฤษฎีพื้นฐาน (Fundamental equations)

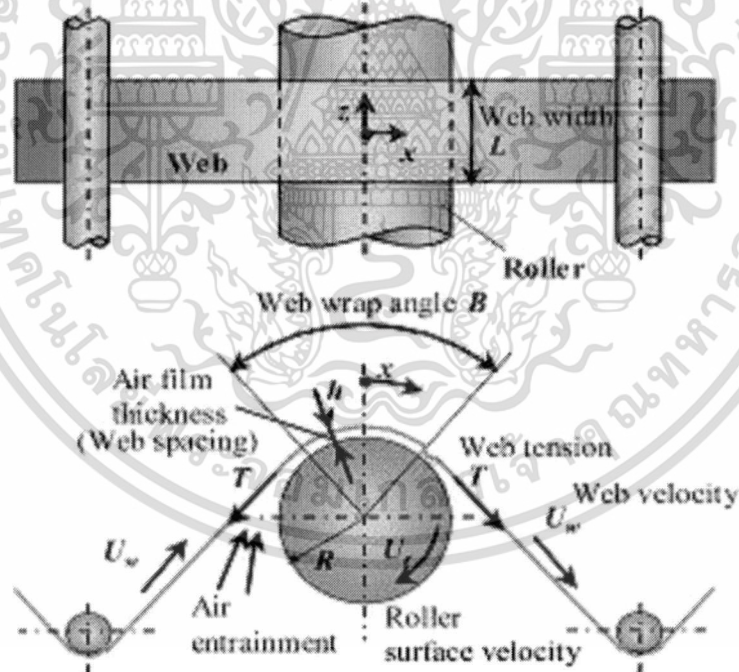
ในการหล่อลื่นแบบอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ ซึ่งจะพิจารณาถึงลักษณะของรูปร่างของของแข็งที่มีการเสีรูปร่างแบบยืดหยุ่น ซึ่งเป็นผลมาจากการหล่อลื่นแบบอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ ซึ่งการหล่อลื่นแบบอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์มีความสำคัญมากในการสัมผัสที่มีโหลดมากๆ เช่น การสัมผัสแบบจุดของบอลเบริง การสัมผัสแบบเส้นของโรลเลอร์เบริง การสัมผัสแบบจุดและเส้นของฟันเกียร์ ดังรูปที่ 1 และ ในการสัมผัสที่มีโหลดมากๆ ความดันสูงจะทำให้ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นและการเสีรูปร่างแบบยืดหยุ่นของส่วนที่สัมผัสกับการเปลี่ยนแปลงความสมมาตรของผิวที่สัมผัสแบบเซอร์เซียน ในส่วนของโรลเลอร์เบริง และของเกียร์จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.5 ถึง 3 Gpa. ค่าความหนืดของสารหล่อลื่นที่ความดันนี้จะมีค่าที่สูงมาก ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของของแข็งในส่วนที่เกิดการสัมผัสกัน การเสีรูปร่างแบบยืดหยุ่นของผิวโลหะจะเป็นไปตามขนาดของความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด

ในการหล่อลื่นอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ เราจะใช้สมการเรย์โนลด์ส์ประยุกต์, สมการแสดงการเสีรูปร่างและสมการความสัมพันธ์ของค่าความหนืดแรงดัน อัตราแรงเฉือนและผลจากความร้อนที่มีความสำคัญมากเช่นกันในกรณีที่มีโหลดมีค่ามากๆ ซึ่งในปัจจุบันก็มีการพัฒนาการวิเคราะห์ขึ้นมามาก ทำให้ทราบถึงการกระจายแรงดันและความหนาของฟิล์ม จากการศึกษที่ผ่านมาเช่น กรูบิน (Grubin; 1949) ได้ศึกษาถึงการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งการเสีรูปร่างแบบยืดหยุ่นและคุณสมบัติของค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องมาจากแรงดันของสารหล่อลื่น ในปัญหาการหล่อลื่นแบบอิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ เขาได้ให้ลักษณะความหนาของฟิล์มและการกระจายของแรงดันในการสัมผัสแบบเส้น เขาได้อธิบายถึงความหนาของฟิล์มที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฮโดรไดนามิกส์ ในปี

ค.ศ.1959 ดอร์สันและอิกกิสันได้พัฒนาขบวนการความสัมพัน์ในการแทนค่าซ้ำๆ ในการแก้ปัญหา และได้พัฒนาสูตรสำหรับความหนาฟิล์มที่น้อยที่สุด และยังพบว่าไหลดมีผลน้อยแต่ค่าความเร็วมีผลต่อลักษณะของฟิล์มมากกว่า ลาเตอร์ และเซง ได้พัฒนาต่อจากกลูบินในการนำมาใช้กับการสัมผัสแบบวงรี และการสัมผัสแบบเซอร์เซียน ต่อมาในปี ค.ศ.1970 แฮมรอก และ ดอร์สัน ได้พัฒนาวิธีทางเชิงตัวเลข ในการแก้ปัญหาแบบฮิสตาโรไฮโดรไดนามิกส์ของโรลเลอร์เบริง

ระบบแผ่นฟิล์มบางที่เคลื่อนที่บนลูกกลิ้งนี้มีความสำคัญต่อระบบขนถ่ายฟิล์มบางสมัยใหม่ ได้แก่ ฟิล์มวัตถุโยแก้วนำแสง ฟิล์มโพลีเมอร์ เป็นต้น ปี 2006 นาย Hashimoto กับคณะ ได้คำนวณหาความหนาของฟิล์มโดยสมมุติว่าเป็น Foil bearing และได้ศึกษาพฤติกรรมของแผ่นฟิล์มบางทางทฤษฎี นาย J.A. Wickert และคณะ ได้ศึกษาการย่นของแผ่นฟิล์มบางที่เคลื่อนที่บนลูกกลิ้ง โดยสมมุติว่าแผ่นฟิล์มบางเป็นวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น

2.4 การหล่อลื่นของอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับโรลเลอร์



รูปที่ 2.1 แสดงการหล่อลื่นของอากาศระหว่างโรลเลอร์กับแผ่นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการเรย์โนลด์ที่ใช้ซึ่งอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(H^3 P \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{1}{4\lambda^2} \frac{\partial}{\partial Z} \left(H^3 P \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 6 \frac{\partial(PH)}{\partial X} \quad (2.34)$$

โดยที่สมการความหนาฟิล์มในรูปตัวแปรไร้มิติสามารถเขียนได้ตามสมการดังนี้

$$H = W + \bar{\delta} \quad (2.35)$$

โดยที่ $\bar{\delta}$ เป็นค่าที่แสดงรูปร่างการสัมผัสของแผ่นฟิล์มบางกับโรเตอร์ซึ่งสามารถแสดงโดยสมการดังนี้

$$\bar{\delta} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(X + \frac{\beta}{2} \right)^2 & \left(X < -\frac{\beta}{2} \right) \\ 0 & \left(-\frac{\beta}{2} \leq X \leq \frac{\beta}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(X + \frac{\beta}{2} \right)^2 & \left(X > \frac{\beta}{2} \right) \end{cases} \quad (2.36)$$

โดยที่ w คือค่าที่แสดงการเสียรูปของแผ่นฟิล์มบางซึ่งสามารถหาได้โดยสมการสมดุลของแรง

$$\frac{T}{R} \left(1 - R \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} (p - p_a) dz \quad (2.37)$$

ซึ่งเมื่อทำอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติจะได้

$$1 - \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} = \int_{-0.5}^{0.5} P dZ \quad (2.38)$$

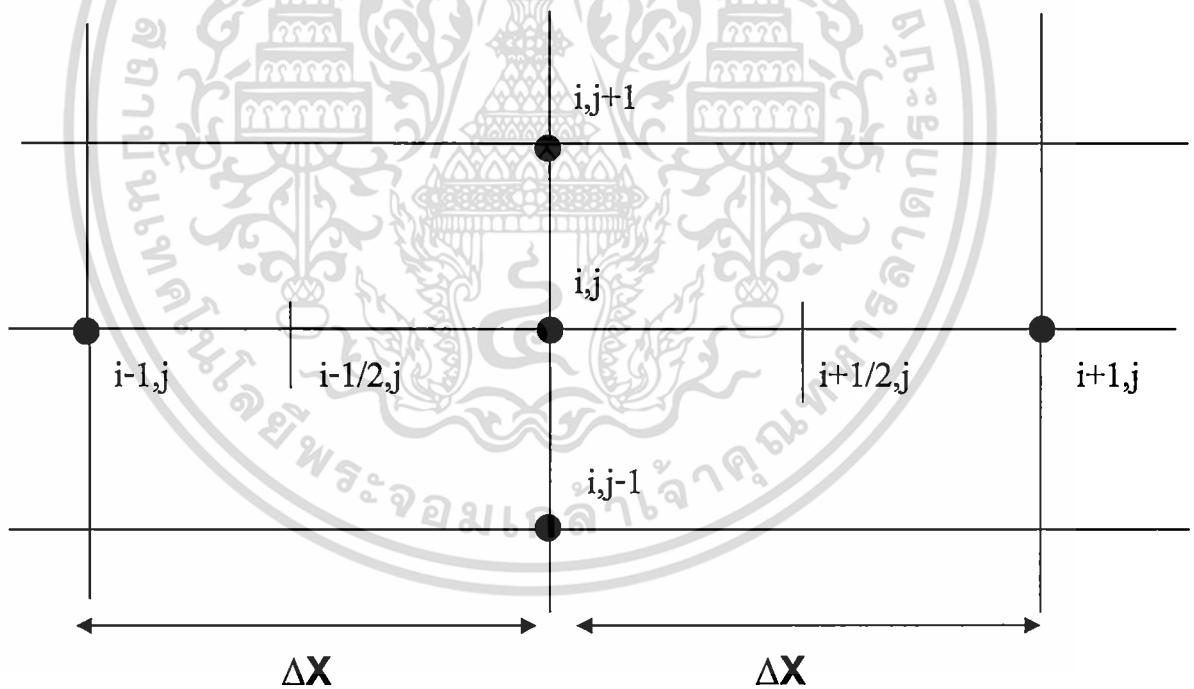
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่กล่าวมานั้นกลุ่มของตัวแปรไร้มิตินั้นแสดงดังกลุ่มสมการดังนี้

$$\begin{aligned} H &= \frac{h}{R\varepsilon^{2/3}}, & P &= \frac{p - p_a}{T/R}, & W &= \frac{w}{R\varepsilon^{2/3}} \\ X &= \frac{x}{R\varepsilon^{1/3}}, & Z &= \frac{z}{L}, & \beta &= \frac{B}{\varepsilon^{1/3}} \\ \delta &= \frac{d}{R\varepsilon^{3/2}}, & \lambda &= \frac{L}{2R\varepsilon^{1/3}}, & \varepsilon &= \frac{6\eta U}{T} \end{aligned} \quad (2.39)$$

2.5 การคำนวณเชิงตัวเลข

ในการคำนวณเชิงตัวเลขนั้นใช้วิธี Finite different ซึ่งแสดงการกระจายโนดในการคำนวณดังรูป



รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายโนดการคำนวณด้วยวิธี Finite different

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสมการเรโนลด์จึงสามารถกระจายได้ดังนี้

$$F_{i,j} = \left[\frac{(K_{i+1,j} + K_{i,j})(P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (K_{i,j} + K_{i-1,j})(P_{i,j} - P_{i-1,j})}{2\Delta X^2} \right] + \left(\frac{1}{4\lambda^2} \right) \left[\frac{(K_{i,j+1} + K_{i,j})(P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (K_{i,j} + K_{i,j-1})(P_{i,j} - P_{i,j-1})}{2\Delta Z^2} \right] - 6 \left[\frac{P_{i,j} H_{i,j} - P_{i-1,j} H_{i-1,j}}{\Delta X} \right] \quad (2.40)$$

เมื่อกระจายแล้ว เนื่องจากสมการเป็นสมการที่ไม่เชิงเส้นดังนั้นจึงต้องใช้วิธีนิวตันมาช่วยในการคำนวณซึ่งแสดงดังสาการ

$$(P_{new})_{i,j} = (P_{old})_{i,j} - \text{Re} \frac{F_{i,j}}{\partial F_{i,j} / P_{i,j}} \quad (2.41)$$

2.6 การคำนวณค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการเคลื่อนที่แผ่นฟิล์มบางนั้นสามารถที่จะกำหนดได้โดยสมการประมาณความหนาฟิล์มโดยที่ความหนาฟิล์มอากาศบางมากการส่งกำลังจะยังมีประสิทธิภาพ

$$H_0 = \frac{h_0}{Re^{2/3}} = 0.589 - \frac{1.614}{L} (2R)\epsilon^{1/3} + \frac{1.764}{L^2} (2R)^2 \epsilon^{2/3} \quad (2.42)$$

โดยที่ L, R, ϵ เป็นตัวแปรที่จะทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจำเป็นที่จะต้องกำหนดเงื่อนไขบังคับในการคำนวณดังนั้นสมการเงื่อนไขบังคับสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังต่อไปนี้

$$h_0 \leq 3\sigma \quad (2.43)$$

$$U^L \leq U \leq U^U \quad (2.44)$$

$$L^L \leq L \leq L^U \quad (2.45)$$

$$R^L \leq R \leq R^U \quad (2.46)$$

โดยที่สมการที่ (2.43) นั้นแสดงค่าที่บ่งบอกถึงความหนาฟิล์มที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับผิวของโรเลอร์ สำหรับการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะใช้วิธีการของ BFGS โดยการหาคำตอบของตัวแปรใหม่แสดงดังสมการ

$$x^{q+1} = x^q + \alpha_q^* S^q \quad (2.47)$$

โดยที่ q คือรอบของการคำนวณ และ x แสดงถึงตัวแปรที่จะหาค่าที่เหมาะสม ในที่นี้คือ L , R และ ε . โดยการลู่เข้าคำตอบถูกกำหนดด้วยสมการ (2.48) และเมตริกของ Hessian สำหรับการคำนวณด้วยวิธี BFGS นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2.49) และ (2.50)

$$|\nabla f(x_i)| = \left| \frac{\partial H_0}{\partial x_i} \right| \leq 0.001, \quad i=1,2,3 \quad (2.48)$$

$$B_{i+1} = B_i + \left(1 + \frac{g_i^T B_i g_i}{d_i^T g_i} \right) \frac{d_i d_i^T}{d_i^T g_i} - \frac{d_i g_i^T B_i}{d_i^T g_i} - \frac{B_i g_i d_i^T}{d_i^T g_i} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} d_i &= x_{i+1} - x_i = \alpha_i^* S_i \\ g_i &= \nabla f(x_{i-1}) - \nabla f(x_i) \end{aligned} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนในการวัด

การวัดหมายถึง การที่ผู้วัดนำเอาปริมาณฟิสิกส์ที่กำลังพิจารณาไปเปรียบเทียบกับปริมาณมาตรฐานด้วยเครื่องวัดชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งผลการวัดจะเป็นจำนวนเท่าของปริมาณมาตรฐานนั้น ผลการวัดประกอบด้วยตัวเลขจำนวนเท่า และหน่วยซึ่งบอกว่าผู้วัดได้เปรียบเทียบกับปริมาณมาตรฐานใด เช่น วัดความยาวได้ 3.62 เมตร หมายความว่า ความยาวที่วัดได้เป็น 3.62 เท่าของความยาว 1 เมตร มาตรฐานความแตกต่างระหว่างผลการวัดกับค่าจริงของปริมาณนั้น เป็นความคลาดเคลื่อน (Errors) ของการวัด ซึ่งผลการวัดใดมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมาก เรียกว่า ผลการวัดนั้นมีความแม่นยำ (Accuracy) สูง นอกจากนี้ในการวัดปริมาณหนึ่ง ๆ อาจทำการวัดหลายครั้ง ผลการวัดแต่ละครั้งก็ไม่จำเป็นต้องเท่ากันเสมอไป อย่างไรก็ตาม ถ้าผลของการวัดหลาย ๆ ครั้งนั้น ให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก เรียกว่า ผลการวัดนั้นมีความเที่ยงตรง (Precision) สูง เครื่องมือวัดที่ดีมีคุณภาพสูง จะให้ผลการวัดที่มีความเที่ยงตรง เช่น เวอร์เนียคาลิเปอร์ กับ ไม้มบรรทัด โดยที่เวอร์เนียคาลิเปอร์จะวัดได้ละเอียดกว่า และมีค่าละเอียดที่สุด (Least Count) ที่อ่านได้ถึง ทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ของเซนติเมตร (0.01 ซม.) ในขณะที่ไม้มบรรทัดมีค่าละเอียดที่สุด เพียงทศนิยมตำแหน่งแรกของเซนติเมตร (0.1 ซม.) เท่านั้น ดังนั้น ผลการวัดด้วยเวอร์เนียหลาย ๆ ครั้ง จึงมีความแตกต่างกันไม่มากนัก นั่นคือ มีความเที่ยงตรงมากกว่าผลการวัดด้วยไม้มบรรทัด อย่างไรก็ตาม เวอร์เนียคาลิเปอร์ที่ชำรุดก็จะให้ผลการวัดที่ไม่มีความแม่นยำและไม่มีความเที่ยงตรงได้ เพราะผลการวัดจะผิดไปจากค่าจริงมาก และอาจจะไม่แน่นอนด้วย สำหรับในทางปฏิบัติ เครื่องมือที่มีคุณภาพที่ดี ซึ่งให้ผลการวัดที่มีความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูง มักจะมีราคาแพง มีการใช้งานที่ยุ่ยยากและมีข้อจำกัดมาก การทดลองบางอย่างไม่จำเป็นต้องใช้ผลการวัดที่ถูกต้องนัก ก็ให้ผลการทดลองที่เชื่อถือได้ ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องมือวัดที่ดีเยี่ยม จึงไม่ใช่ความจำเป็นเสมอไป นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของผลการวัด ยังขึ้นอยู่กับความสามารถของผู้วัดเอง และลักษณะธรรมชาติของปริมาณที่วัดนั้นด้วยการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมระหว่างทำการวัดก็มีผลต่อความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับผลการวัด ตลอดจนผลของการทดลองแบ่งได้เป็น 2 ชนิด แต่ละชนิดเกิดจากสาเหตุที่แตกต่างกันและมีวิธีการจัดการต่างกัน คือ

1) ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทุกครั้งของการวัด หรือการทดลองเกิดขึ้นจากเงื่อนไขต่าง ๆ ที่แปรเปลี่ยนไปอย่างควบคุมไม่ได้ ซึ่งเกิดขึ้นได้กับผู้วัด

เครื่องวัด และปริมาณที่วัด ตลอดจนเงื่อนไขต่าง ๆ ของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในการวัดด้วยไม้บรรทัดผู้วัดต้องประมาณว่าที่อยู่ระหว่างช่องสเกล 0.1 ซม. หรือการอ่านเข็มที่กำลังสั้นอยู่ตลอดเวลาบนหน้าปัดมิเตอร์ 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 จะมากไปหรือน้อยไปเท่ากับ ความคลาดเคลื่อนขีดศูนย์นี้ทุกครั้ง ผลการวัดที่อ่านได้ จึงต้องนำค่าความคลาดเคลื่อนขีดศูนย์มาลบออก หรือบวกเพิ่มเข้าไป เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

2.13.1 ช่วงความคลาดเคลื่อน และการประมาณค่าความคลาดเคลื่อน

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

เป็นช่วงของปริมาตรความคลาดเคลื่อนของผลการวัดที่เรียกว่า ช่วงความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะต้องกว้างพอที่จะทำให้ผลการวัดส่วนใหญ่ตกลงภายในช่วงนี้ แต่ไม่กว้างเกินไปจนผลการวัดขาดความน่าเชื่อถือ ซึ่งพิจารณาได้จากทางสถิติ ในทางปฏิบัติ การประมาณช่วงความคลาดเคลื่อน หาได้จากการกระจายของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ย ข้อมูลที่กระจายมาก Δx ก็จะมีค่ามาก ข้อมูลที่กระจายน้อย Δx ก็จะมี

ค่าน้อย การกระจายข้อมูลได้จากค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยของข้อมูลชุดนั้น 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 อาจประมาณได้จากค่าเฉลี่ยที่น้อยที่สุด (Least Count) ของเครื่องมือวัด โดยคิดเท่ากับ หรือครึ่งหนึ่งของค่าละเอียดที่สุดก็ได้ ตัวอย่างเช่น เวอร์เนียสเกลิปเปอร์ ที่มีค่าละเอียดที่สุด 0.01 ซม. วัดความยาวเพียงครั้งเดียวได้ค่าการวัดเป็น 3.18 ± 0.01 ซม. หรือไม้บรรทัดซึ่งมีค่าละเอียดที่สุด 0.1 ซม. วัดความยาวเพียงครั้งเดียว ได้ค่าการวัด 2.80 ± 0.05 ซม. ช่วงความคลาดเคลื่อนบางครั้งนิยมเขียนในรูปแบบของสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ ที่เราเรียกว่าสัดส่วนความคลาดเคลื่อน ($\frac{\Delta x}{x}$) หรือเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน $\left[\left(\frac{\Delta x}{x} \right) (100) \right]$ ซึ่งตามปกติแล้ว $\frac{\Delta x}{x} \ll 1$

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

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

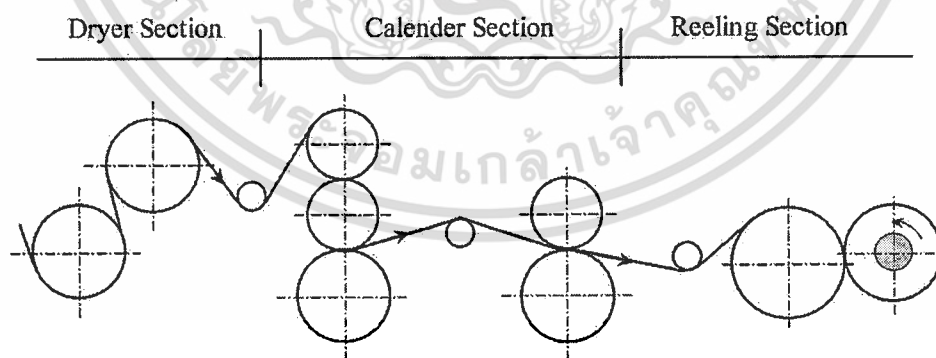
2.13.2 ความคลาดเคลื่อนของการวัดต่อผลการคำนวณ

กรณีที่ผลการทดลองที่ต้องการไม่สามารถหาได้จากการวัดโดยตรง แต่หาได้จากการวัดปริมาณอื่นหลายปริมาณและนำมาคำนวณเช่น การหาค่าความหนาแน่นของวัตถุ หาได้จากการวัดมวล และวัดปริมาตรของวัตถุ ความคลาดเคลื่อนของแต่ละปริมาณวัดจึงไปมีผลต่อผลการคำนวณสุดท้ายให้มีความคลาดเคลื่อนไปด้วยขนาดหนึ่ง ซึ่งขึ้นกับขนาดความคลาดเคลื่อนของผลการวัดและความสัมพันธ์กันของปริมาณเหล่านั้น

2.8 การเกิดฟิล์มบาง

วัสดุที่มีความบางและสามารถดัดโค้งได้อย่างเช่น กระดาษ สิ่งทอ พลาสติก และแผ่นอลูมิเนียมบาง บางครั้งเราเรียกสิ่งพวกนี้ว่า “Web” ระบบการขนส่ง Web ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญของงานอุตสาหกรรม ในการเคลื่อนย้ายแผ่น Web โดยการหมุนของลูกกลิ้งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือเกิดการแทรกตัวของอากาศระหว่างผิวสัมผัสของลูกกลิ้งกับ Web ซึ่งจะเรียกการหล่อลื่นแบบนี้ว่า Soft Elastohydrodynamic Lubrication air film ถ้าความหนาแน่นของฟิล์มอากาศมีขนาดใหญ่และหนากว่าผิวหน้าของความสูงของแผ่น web และลูกกลิ้ง ก็จะทำให้เกิดความฝืดและสูญเสียความสมดุล

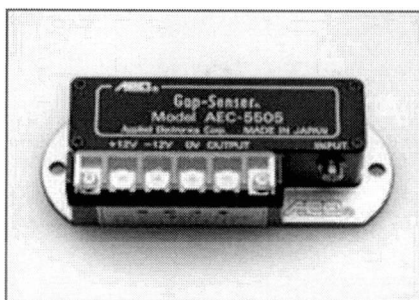
ในบางกรณีลูกกลิ้งจะไม่สามารถขับเคลื่อนได้เนื่องจากกำลังดึงไม่เพียงพอ จึงทำให้ความเร็วลดลง ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นระหว่าง web และลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการคาดการณ์ว่า ความหนาแน่นของฟิล์มอากาศมีความเหมาะสมในการใช้หรือไม่



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของระบบขนย้ายด้วยฟิล์มบาง(เครื่องผลิตกระดาษ)

รูป

2.9 Gap Sensor

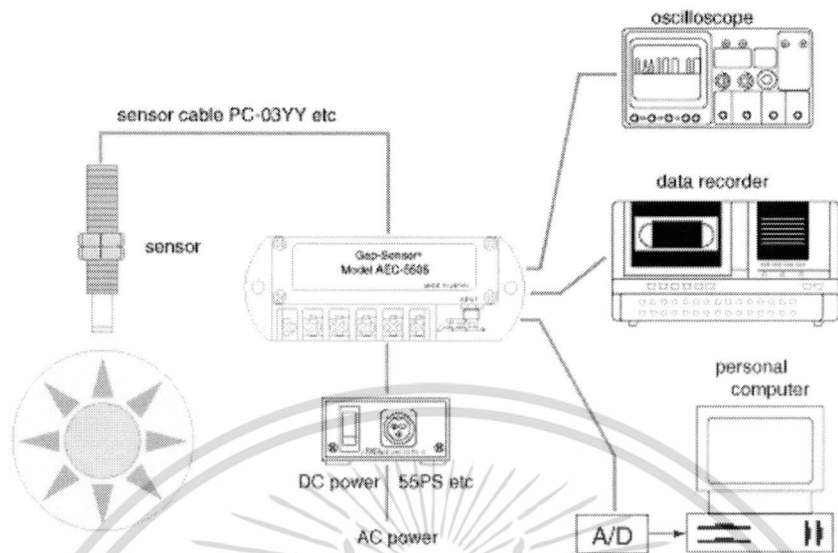


รูปที่ 2.4 Gap-Sensor รุ่น AEC-5505

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

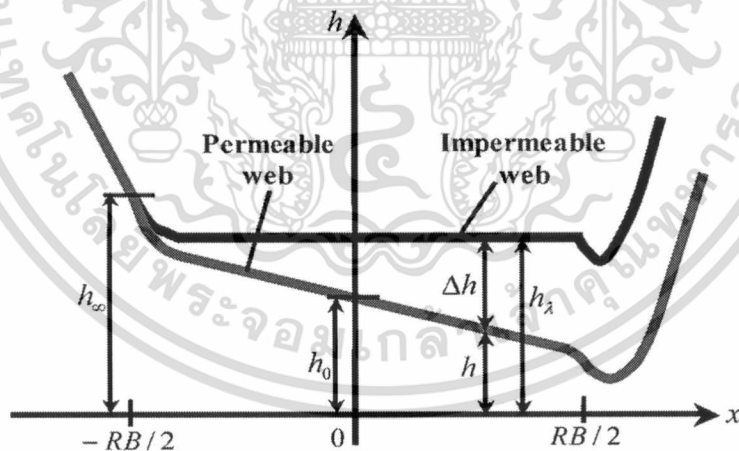
ตารางที่ 2.5 ข้อมูลจำเพาะของ Gap-Sensor รุ่น AEC-5505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การทำงานของ Gap-Sensor รุ่น AEC-5505

2.10 สมการที่ใช้ในการหาค่าระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มบาง กับลูกกลิ้ง



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงโมเดลการแพร่กระจายอากาศสำหรับ Web ที่มีการซึมผ่านและไม่ซึมผ่าน

(ตามเอกสารอ้างอิง [4])

โดยกำหนด $x = 0$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

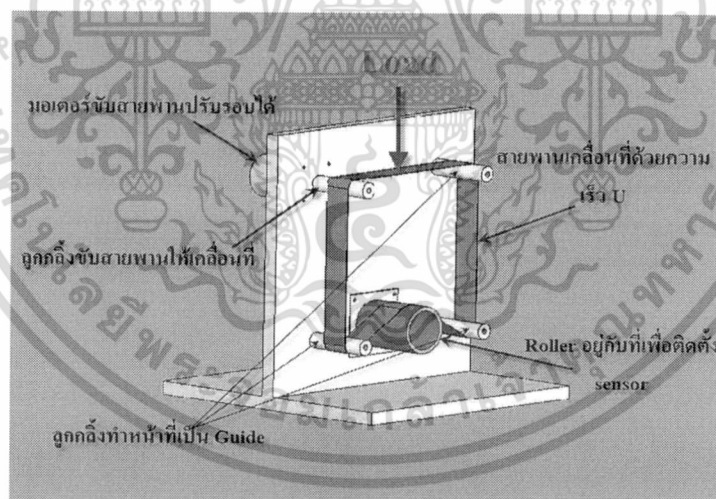
โดยกำหนด $x \neq 0$

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

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

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

2.11 การออกแบบและรายละเอียดแบบ

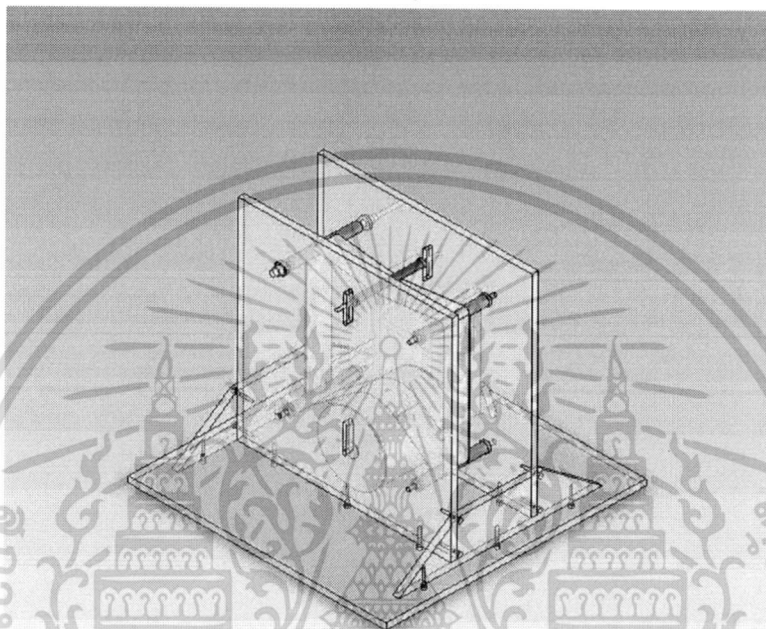


รูปที่ 2.8 แสดงชุดทดลองอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1 ชุดทดลองระบบขนถ่ายฟิล์มบางที่มีลักษณะยืดหยุ่น



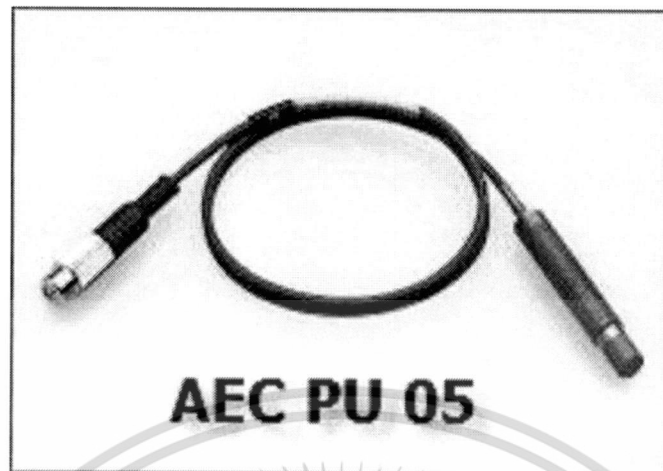
รูปที่ 3.22 แบบชุดทดลอง

3.2 จากภาพจะเห็นเครื่องอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1 multimeter ที่ต่อรับสัญญาณจาก Gap Sensor ค่าที่อ่านได้ เป็น โวลต์ (V)

3.3 Sensor head (AEC PU 05)

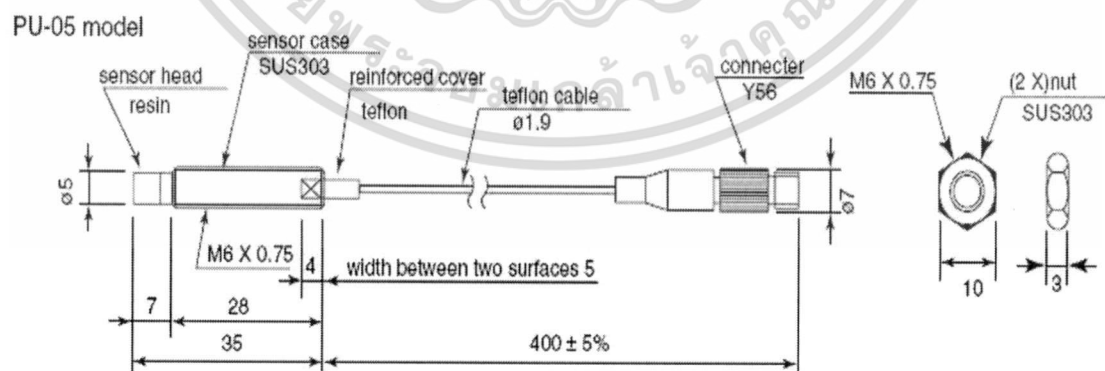
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 Sensor head

model	Sensor : PU-05		
measuring range (iron)	0 to 2mm (± 0.05 mm)		
output voltage	$\approx 5V$ (0.2mm V)		
adopted converters	5505	55MS-M	5505HF
resolution	0.3 μ m	0.8 μ m	0.8 μ m
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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

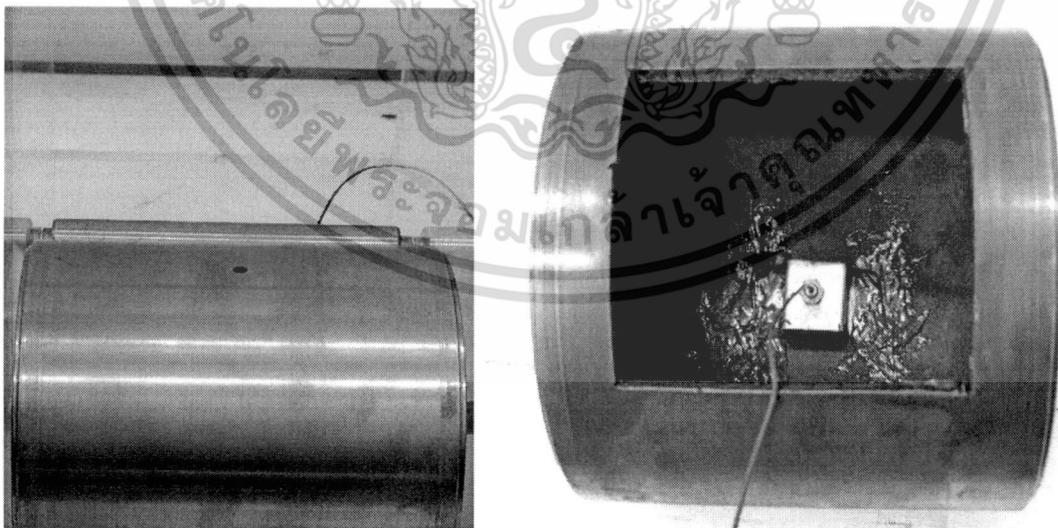
3.4 Gap Sensor

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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

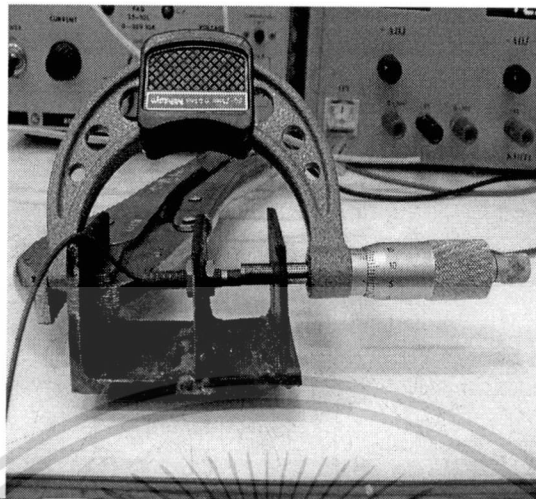
4.1.2 นำกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ตัดได้ขนาดเรียบร้อยแล้วมาติดด้วยกระดาษกาวอลูมิเนียม เพราะเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดนั้นไม่สามารถวัดกระดาษหนังสือพิมพ์ได้

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

4.2 การคาริเบทเซ็นเซอร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก multimeter

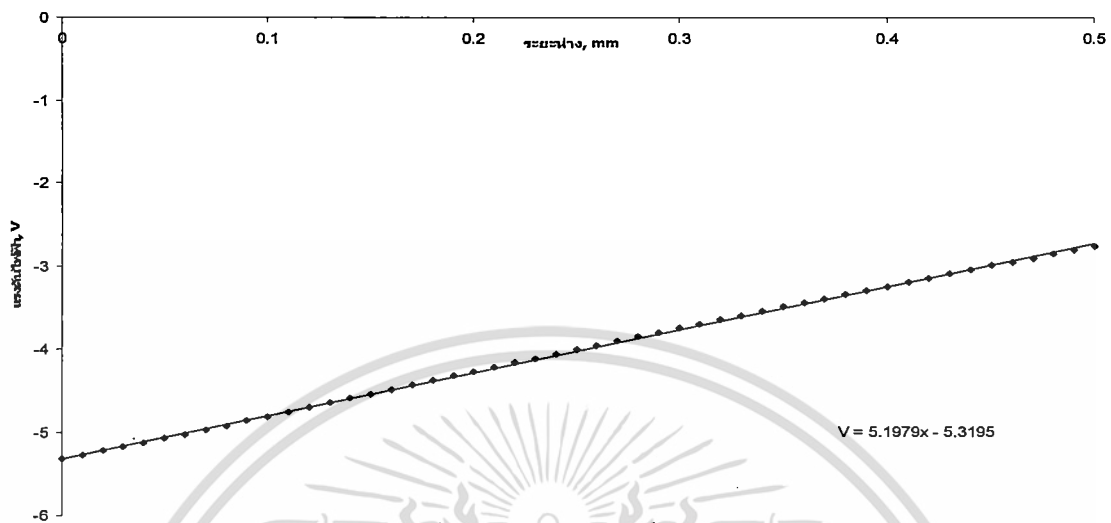
วิธีการริเบทหัวเซ็นเซอร์

- 4.2.1. ตัดตั้งหัวเซ็นเซอร์เข้ากับแท่นยึด
- 4.2.2. ตัดตั้งไมโครมิเตอร์เข้ากับแท่นยึด
- 4.2.3. ปรับให้หัวของไมโครมิเตอร์ให้ชิดกับหัวของไมโครมิเตอร์ที่สุด
- 4.2.4. ปรับไมโครมิเตอร์ให้ห่างจากระยะหัวเซ็นเซอร์ที่ละ 0.01 mm. จนถึง 0.5 mm. และบันทึกค่า
- 4.2.5. นำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับระยะห่าง



ในการทดลองเราจะใช้กราฟหลัก ๆ คือกราฟแสดงค่าการปรับแต่งค่าเซ็นเซอร์โดยจะใช้สมการความชันเส้นตรงที่หามาได้เป็นสมการเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงค่าการคาริเบทเซ็นเซอร์

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)

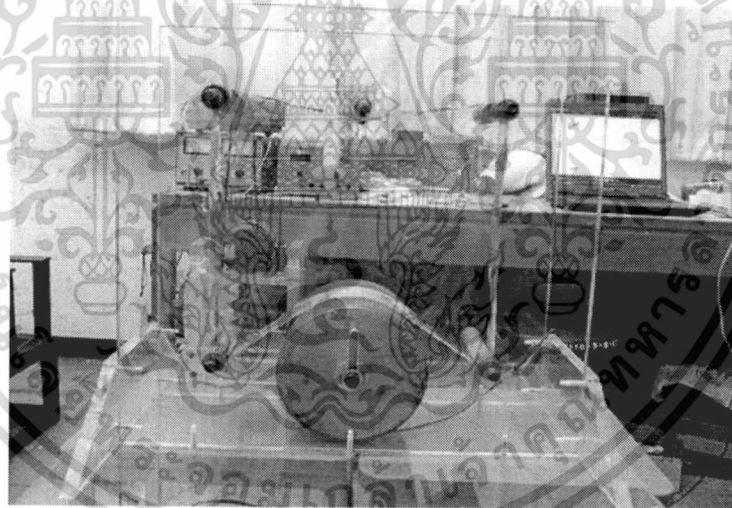
และ จุดที่ 2 ได้โดยใช้สมการ (16) ในการคำนวณจะได้ค่า $h = 0.07878\text{ mm}$ (II)

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 ทำการเปลี่ยนขนาดความกว้างของแผ่นกระดาษหนังสือพิมพ์ที่ทำการทดสอบแล้ว ทดสอบด้วยความเร็วรอบที่เหมือนกัน จนได้ผลการทดลองครบด้วยกันจำนวน 4 ความกว้าง

4.3.5 ทำการทดลอง จำนวน 10 แผ่นในทุกๆ ขนาดเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การคำนวณหาค่าคงที่ของ $\varepsilon, \lambda, \mu$ ที่จำเป็นในการทดลอง

4.4.1 นำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองแล้วนำไปวาดกราฟ

4.4.2 นำผลที่ได้จากการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีมาวาดกราฟ

4.3.3 นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้

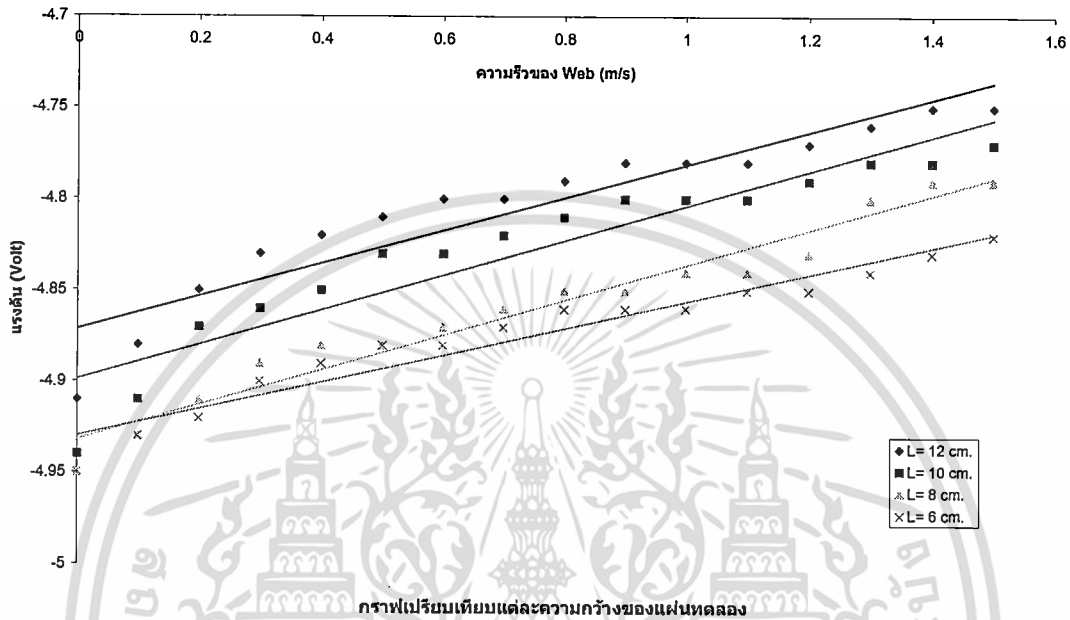


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

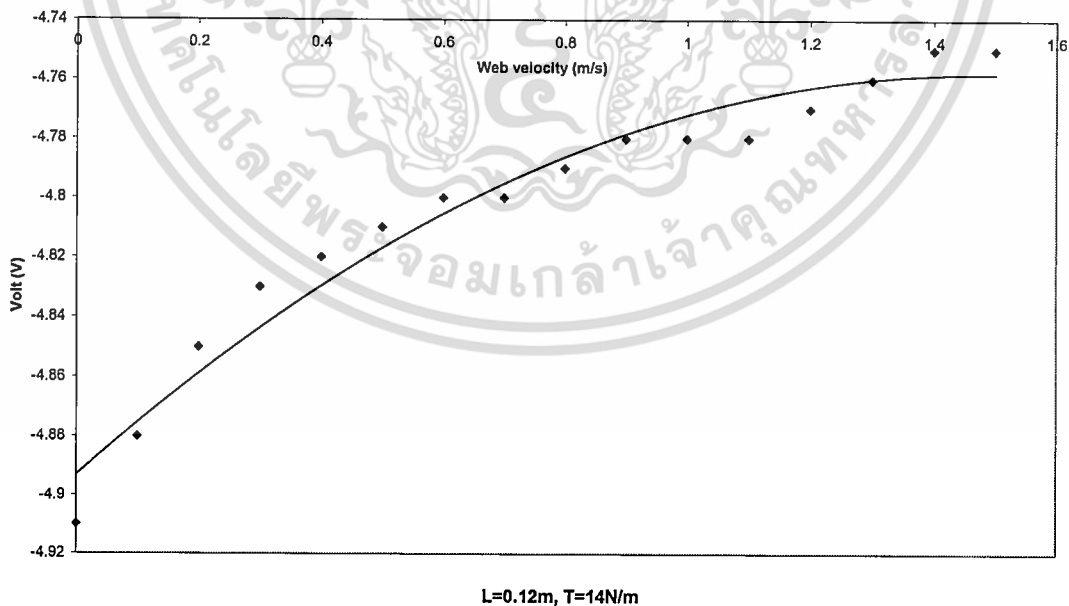
บทที่ 5

ผลการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข

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

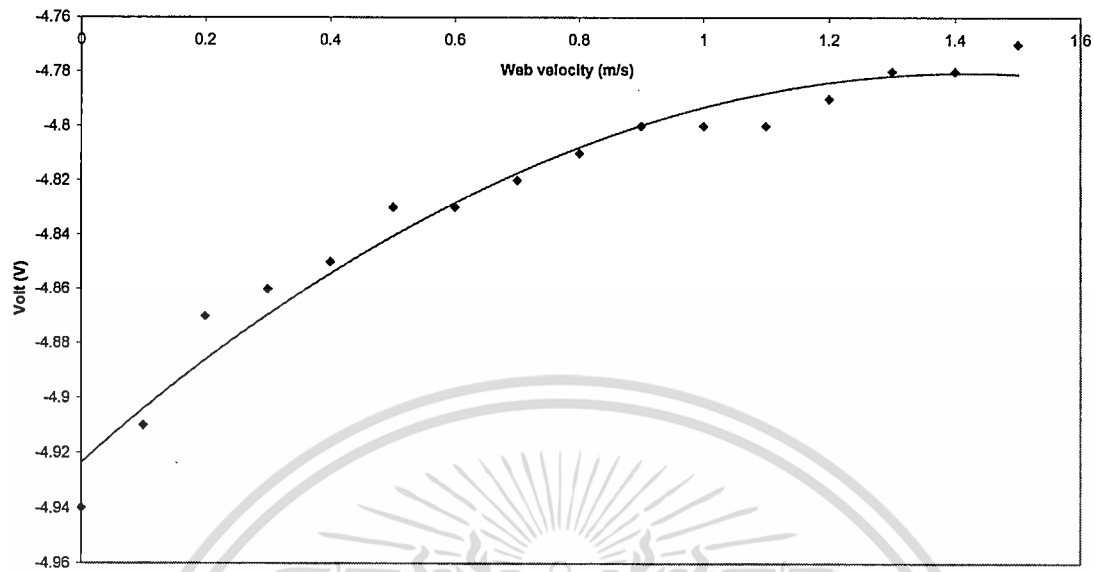


รูปที่ 5.1 แสดงผลการทดลองที่ได้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันกับขนาดความกว้างของ Web



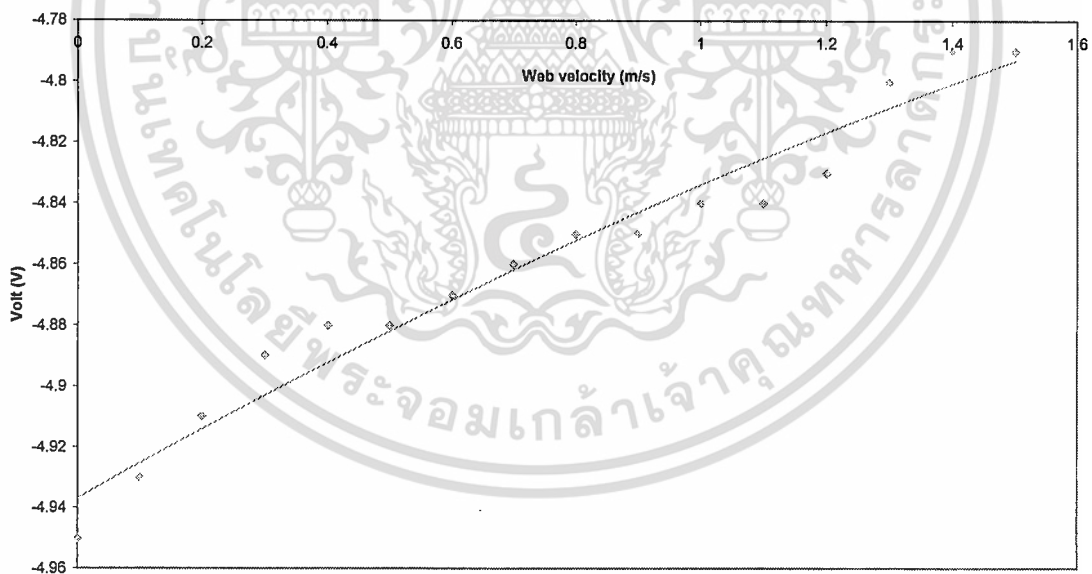
รูปที่ 5.2 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.12 m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

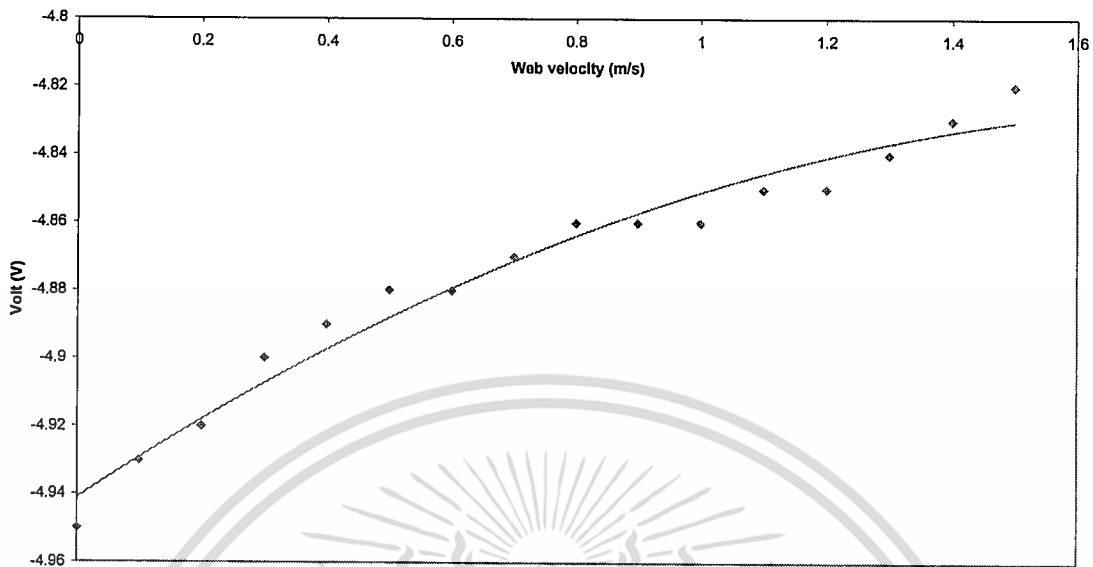
รูปที่ 5.3 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.10\text{ m}$



$L=0.08\text{ m}, T=14\text{ N/m}$

รูปที่ 5.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด $L=0.08\text{ m}$

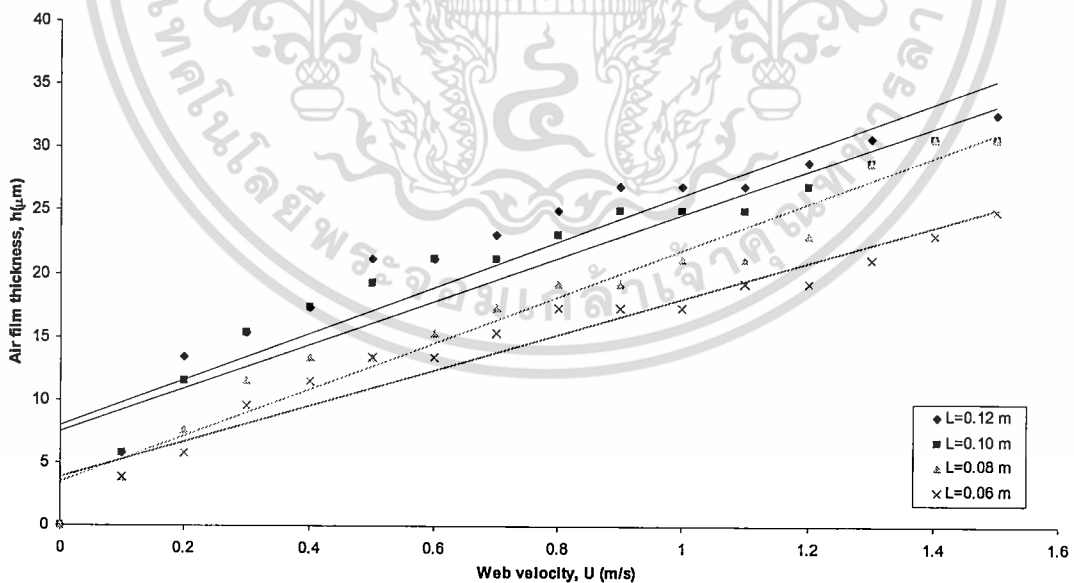
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



L = 0.06 m, T = 14 N/m

รูปที่ 5.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า (v) ที่ได้จากการทดลองแผ่น Web ขนาด L=0.06 m

5.2 เมื่อนำค่าที่ได้มาเทียบกับการการิเบทเซนเซอร์ก็จะให้ความหนาฟิล์มดังนี้

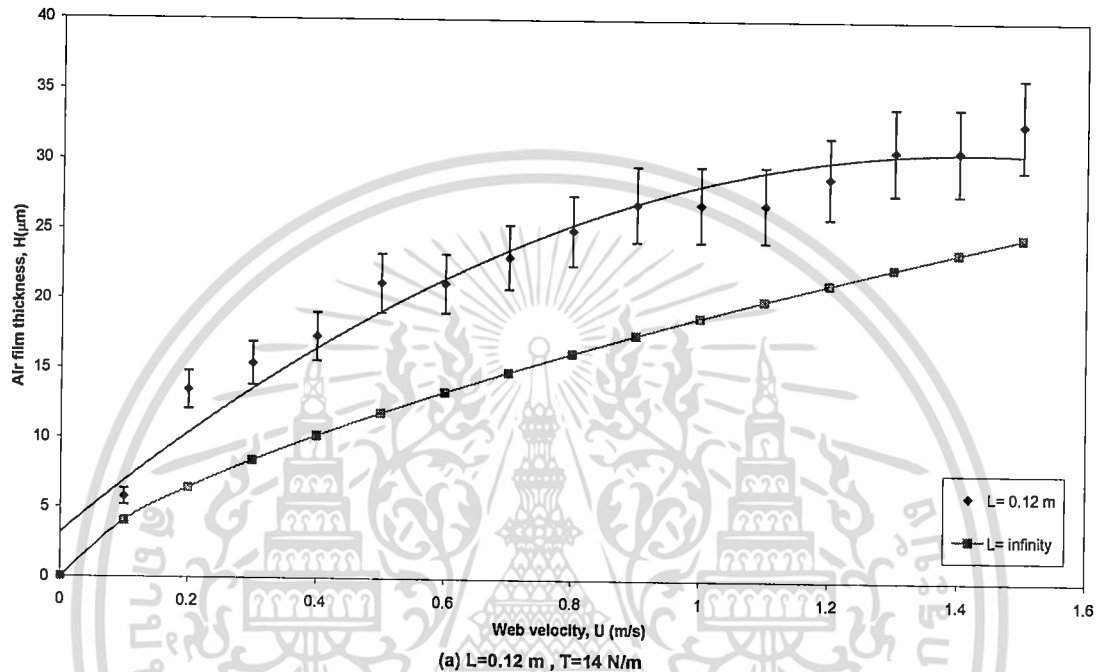


ตารางเปรียบเทียบแต่ละความกว้าง

รูปที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบทดสอบแผ่น web 4 ขนาดความกว้าง

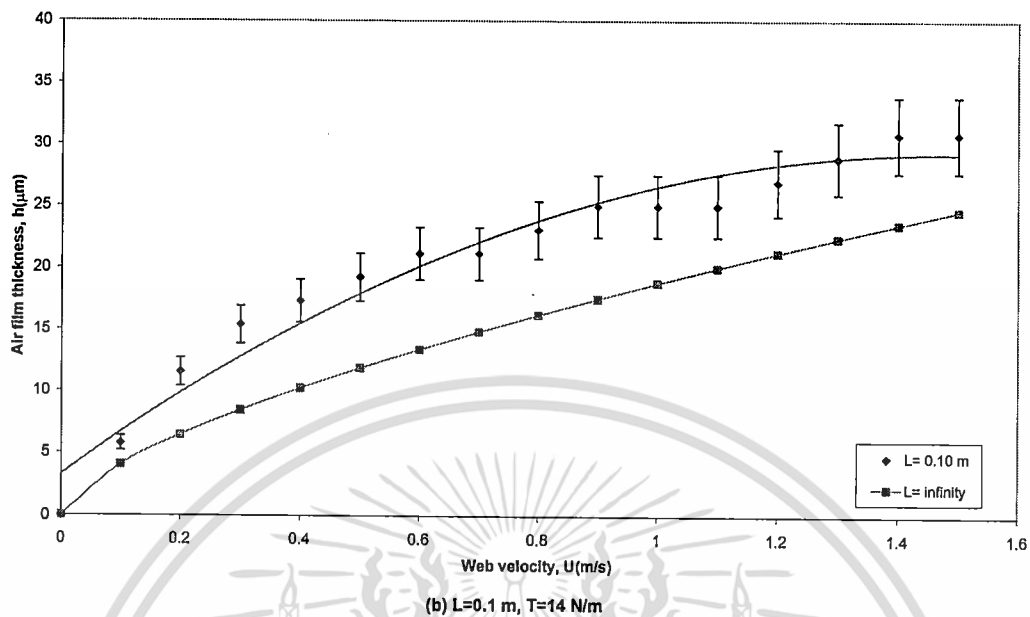
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางการเปรียบเทียบผลการทดลองของแต่ละความกว้างของแผ่นจะพบว่าที่ความเร็วเดียวกันเมื่อความกว้างของแผ่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาของฟิล์มอากาศเพิ่มขึ้นตามด้วยดังนั้นในแผ่นที่มีความกว้างมากจะเกิดการสิ้นเปลืองมากตามไปด้วย



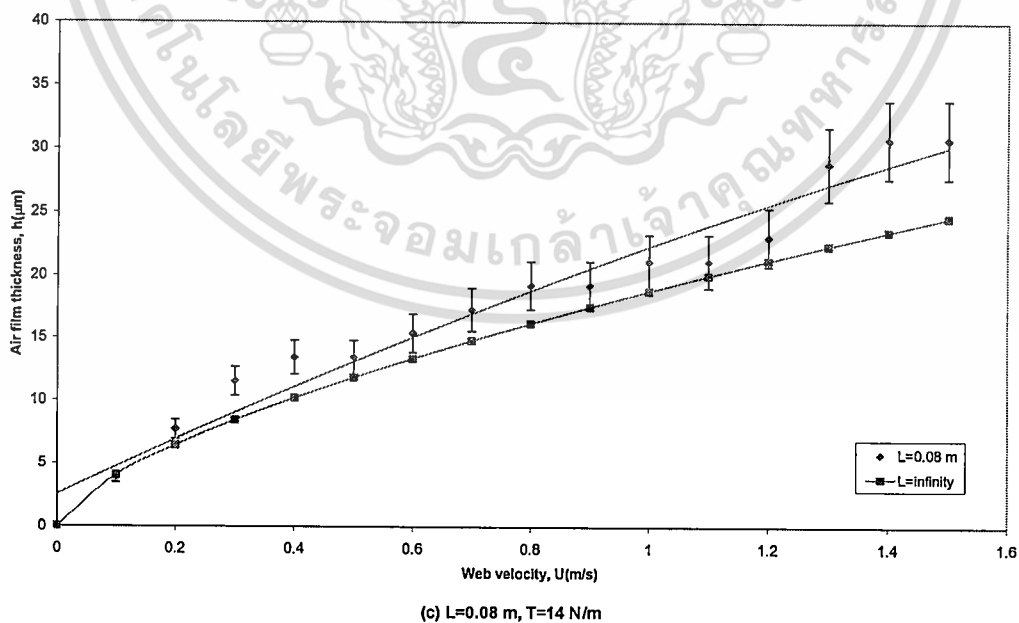
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.12 m

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 ความหนาของฟิล์มอากาศจะเพิ่มขึ้นทีละน้อย และเมื่อเพิ่มความเร็วของแผ่น web มากขึ้น ความหนาของฟิล์มอากาศก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่จะเพิ่มอย่างคงที่จนจบการทดลอง



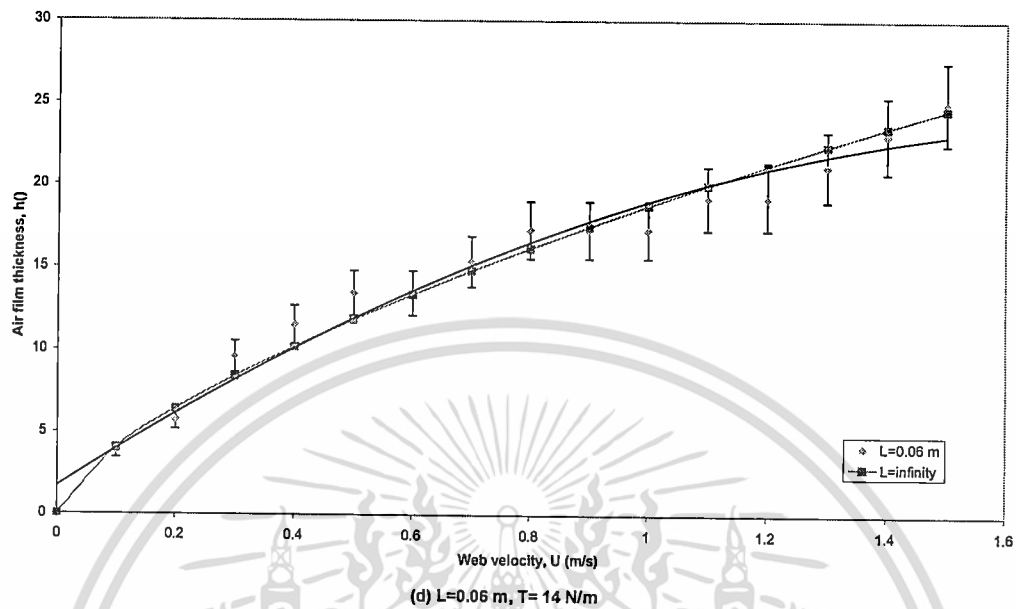
รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.10 m

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



รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.08 m

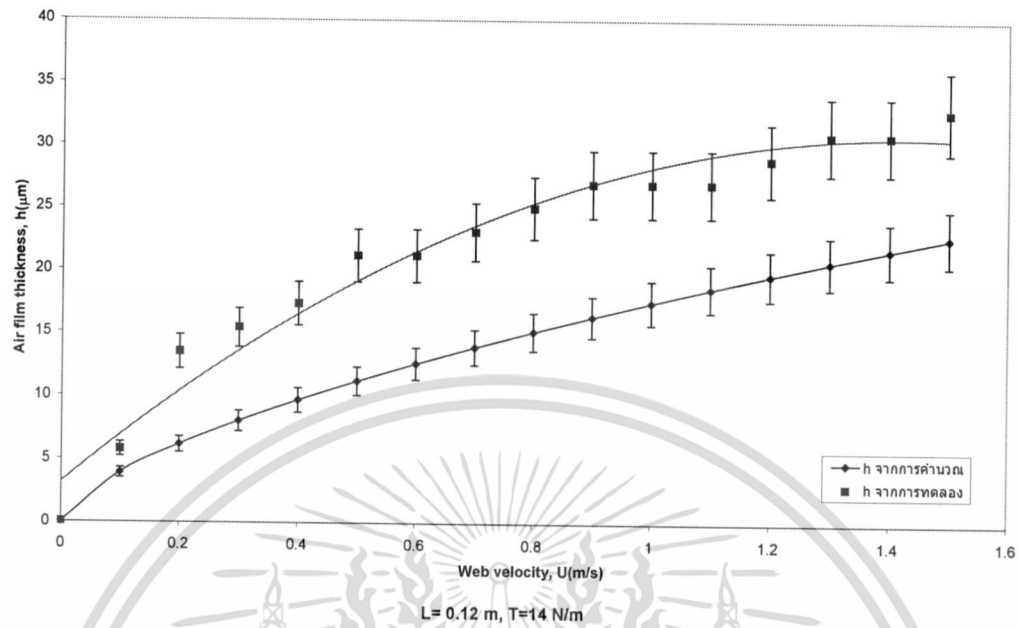
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



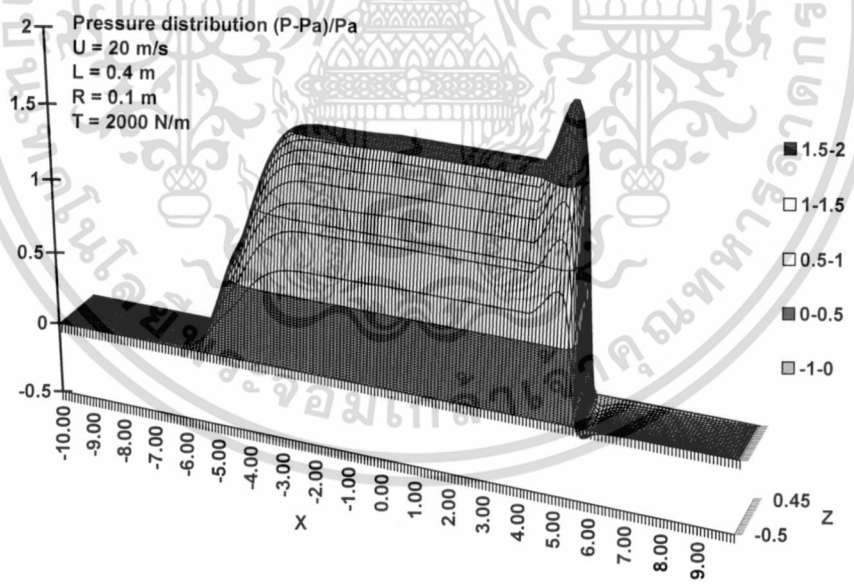
รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบการลอยตัว ของแผ่น web ที่ขนาดความกว้าง 0.06 m

และเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวของแผ่น web เป็นขนาด 0.08 m. และ 0.06 m. ความหนาของฟิล์มอากาศจะน้อยลง ไปด้วย แต่ลักษณะกราฟยังคงเดิมไปจนจบการทดลอง

จากกราฟทั้ง 4 กราฟที่แสดงมานั้น ยังแสดงถึงการเปรียบเทียบ โดยความยาวที่ใช้ในการทดลองเทียบกับความยาวอนันต์ (เส้นสีชมพู) เพื่อดูค่าผิดพลาดที่เกิดจากการทดลองซึ่งเกิดจากอากาศที่รั่วไหลออกบริเวณด้านข้างของแผ่น ถ้าความยาวของแผ่นเป็นอนันต์นั้นการรั่วไหลที่เกิดบริเวณขอบของแผ่นกระดาษจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการซึมผ่านแผ่น

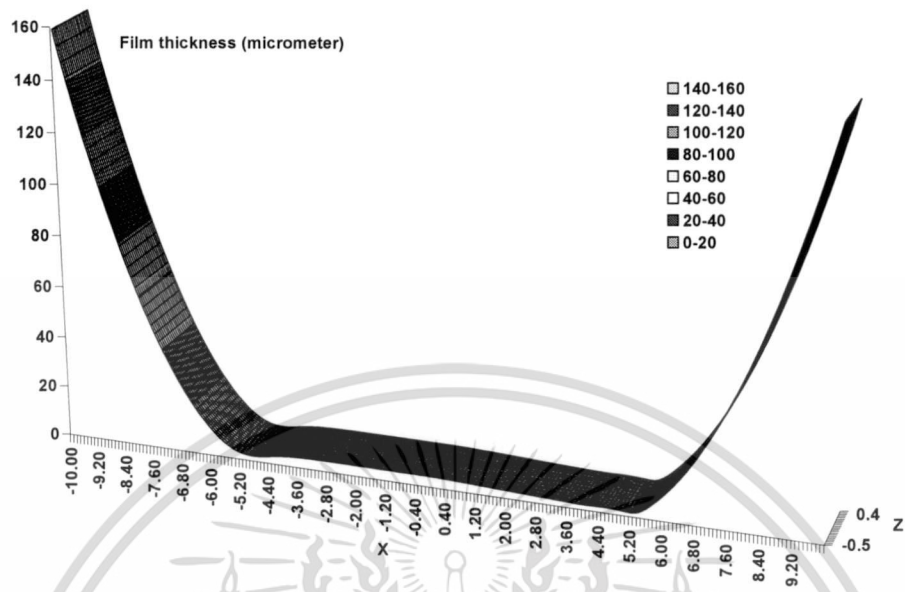


รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบการลอยตัวที่ได้จากการคำนวณเทียบกับการทดลอง

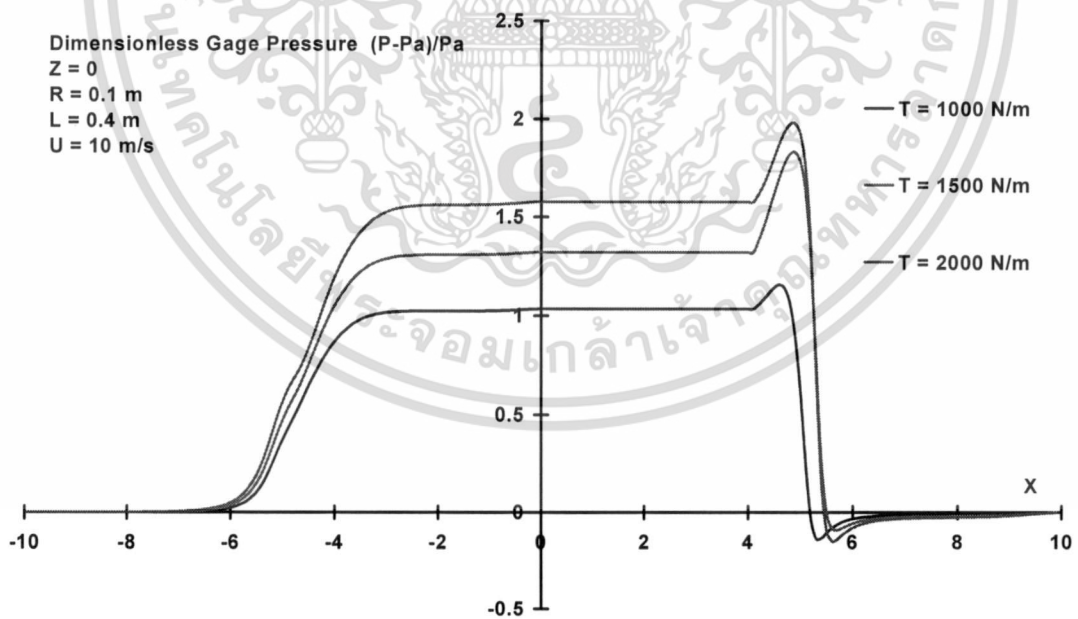


รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายตัวของความดันอากาศระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

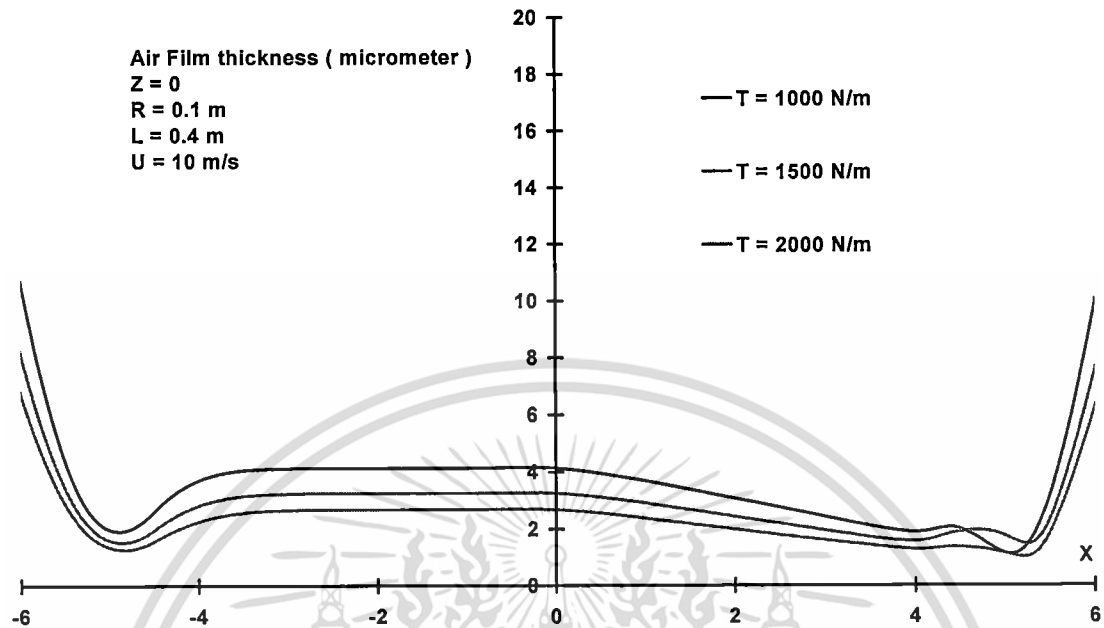


รูปที่ 5.13 แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มอากาศระหว่างลูกกลิ้งกับแผ่นฟิล์มบาง

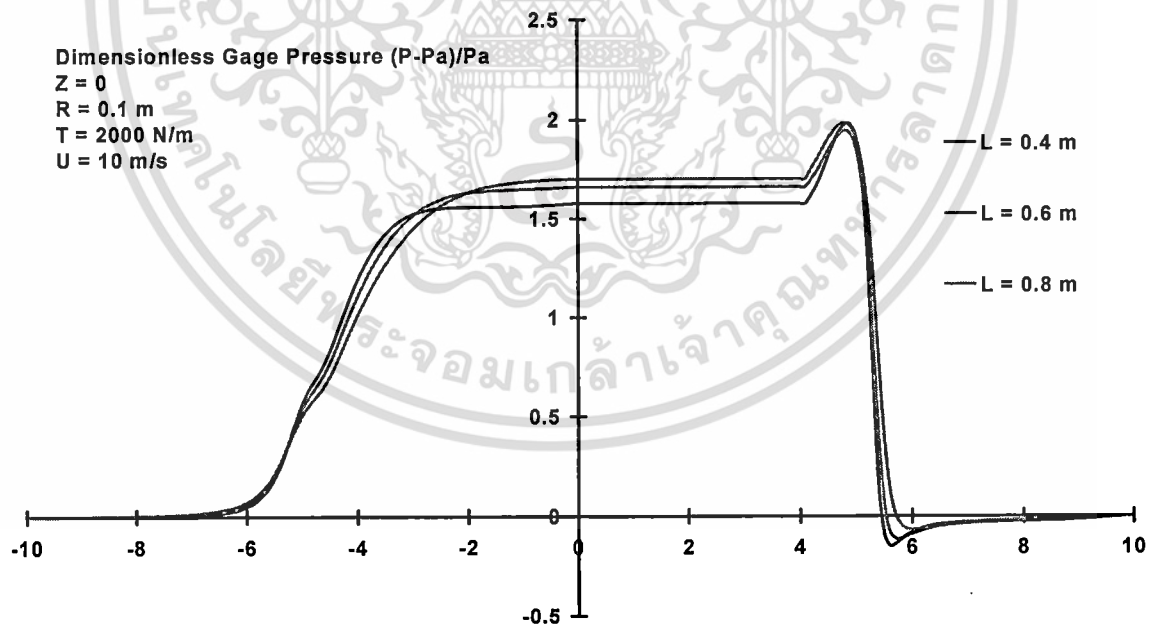


รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายตัวของความดันอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงตึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

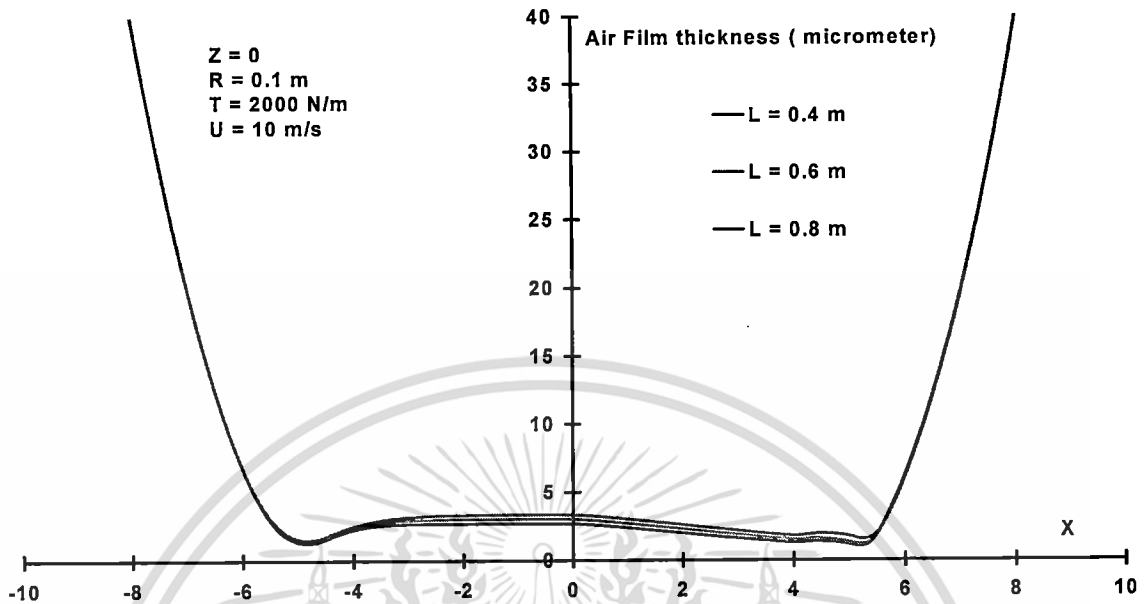


รูปที่ 5.15 แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงตึง

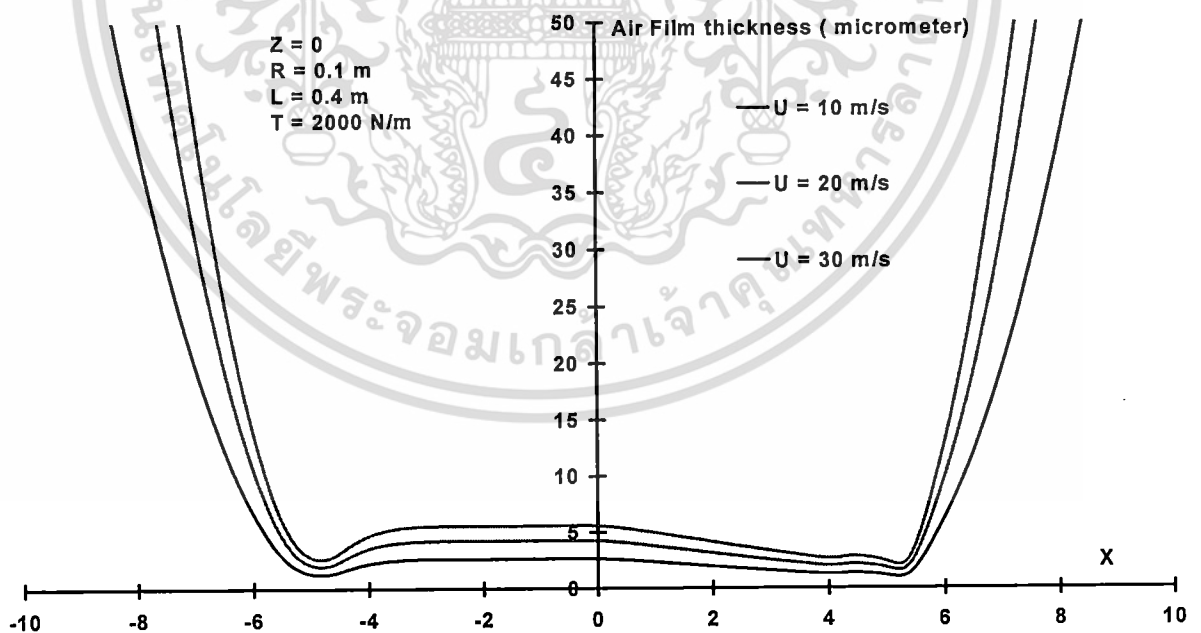


รูปที่ 5.16 แสดงการกระจายตัวของความดันอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของแผ่นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

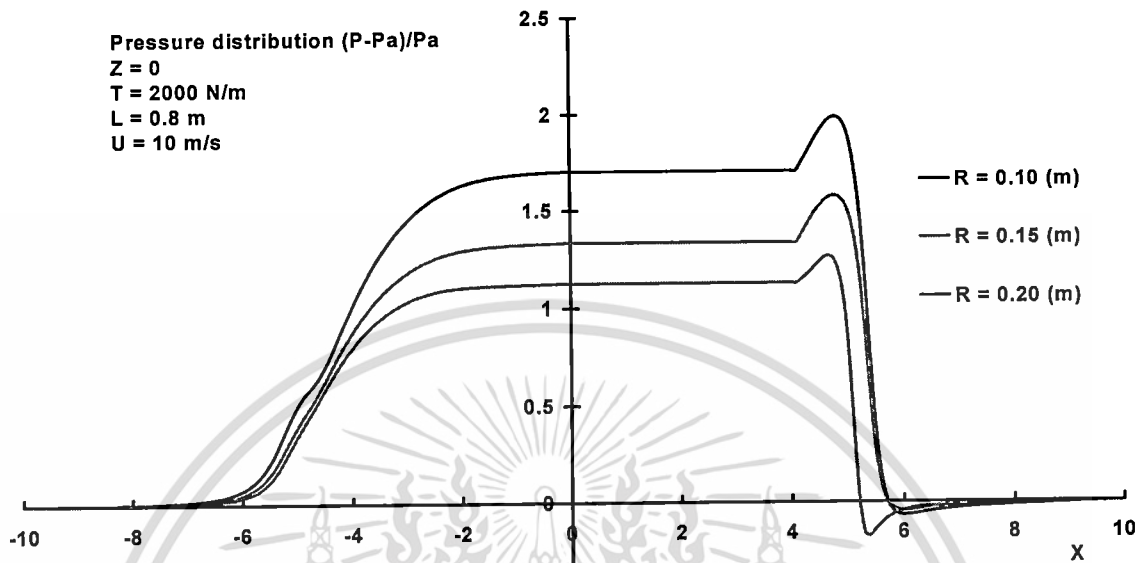


รูปที่ 5.17 แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างของแผ่นฟิล์มบาง

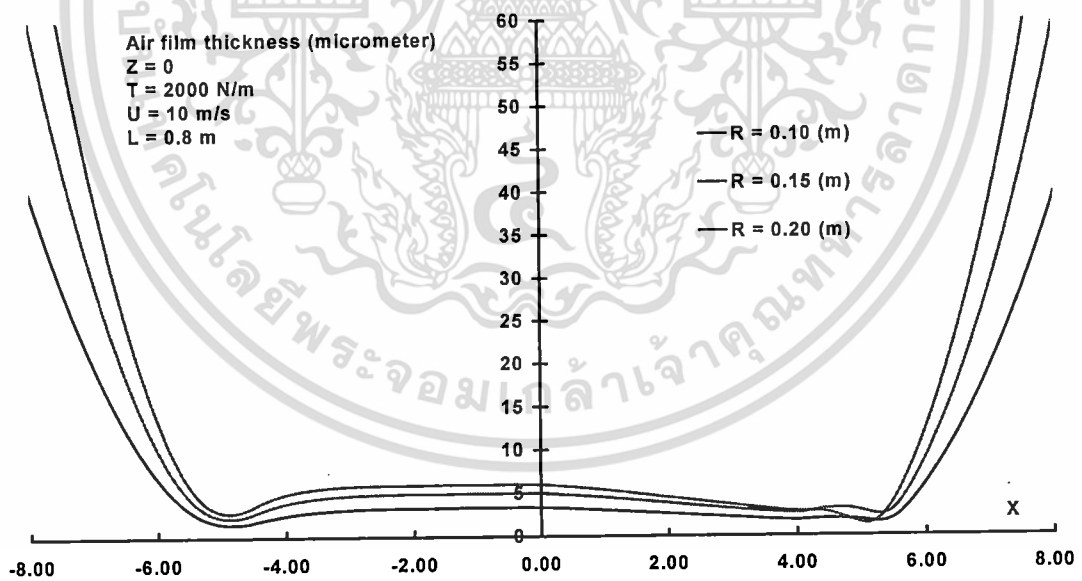


รูปที่ 5.18 แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



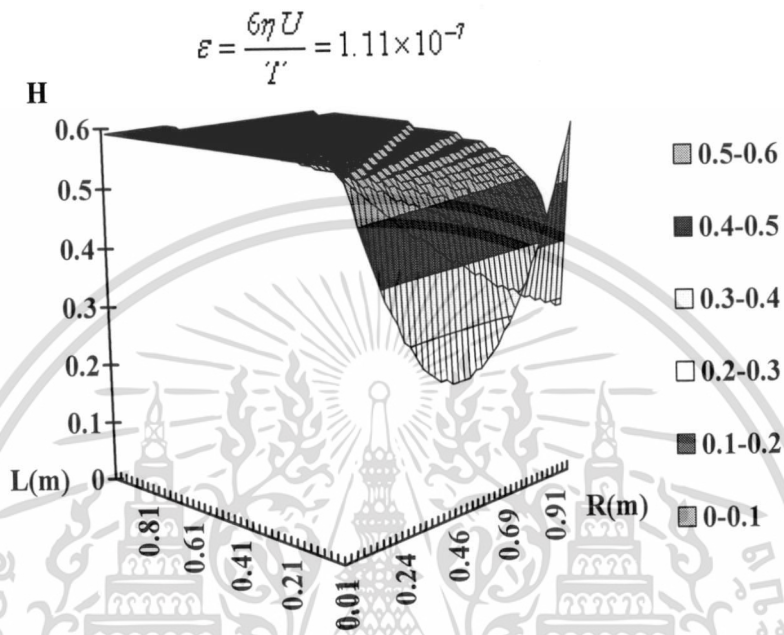
รูปที่ 5.19 แสดงการกระจายตัวของความดันอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงรัศมีของลูกกอล์ฟ



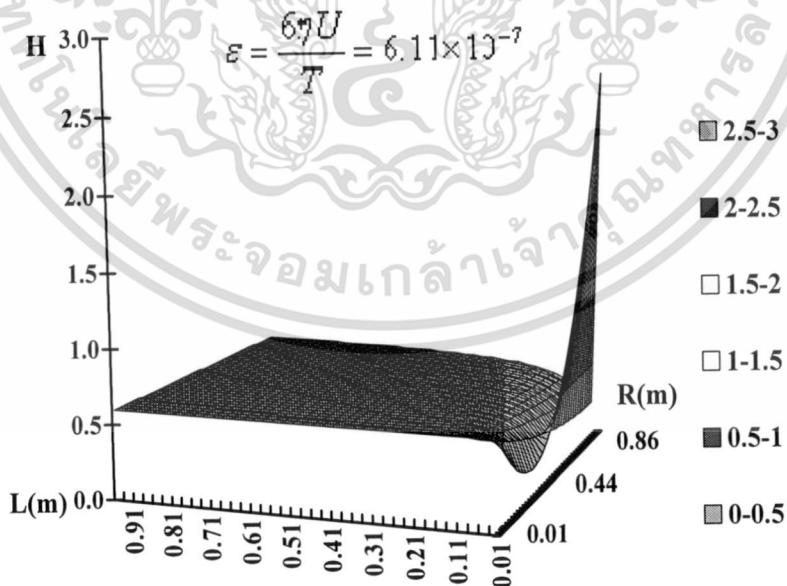
รูปที่ 5.20 แสดงการกระจายตัวของความหนาฟิล์มอากาศเมื่อเปลี่ยนแปลงรัศมีของลูกกอล์ฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.12-5.20 แสดงผลการคำนวณเชิงตัวเลขของแผ่นฟิล์มบางที่เคลื่อนที่บนลูกกลิ้ง และจากรูปที่ 5.21- 5.24 แสดงผลการคำนวณในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

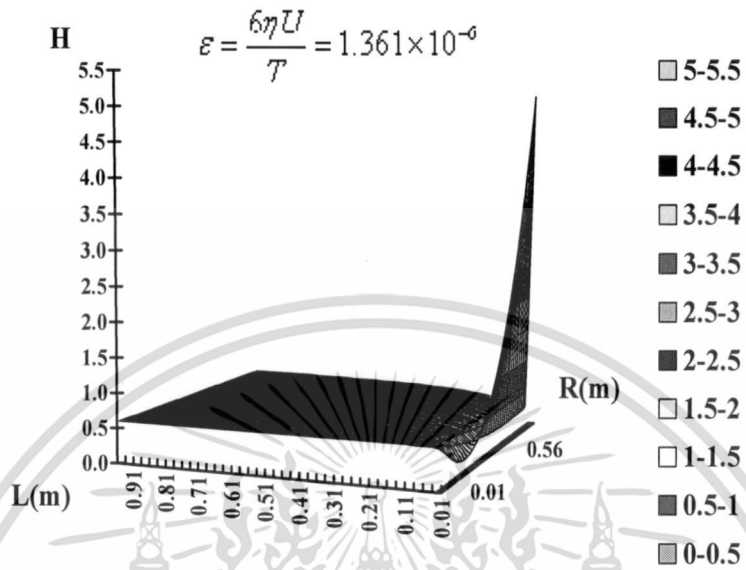


รูปที่ 5.21 Simulation of objective function $\varepsilon = 1.11 \times 10^{-7}$

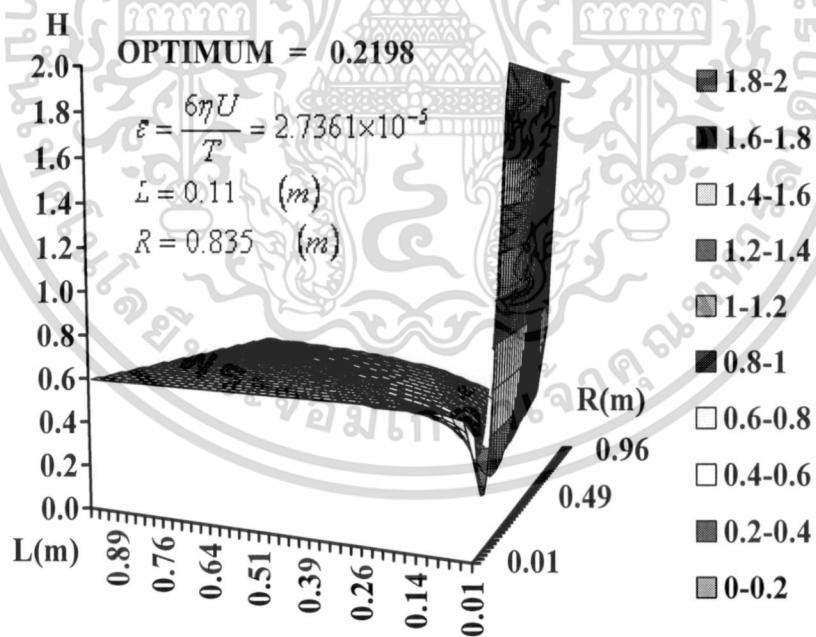


รูปที่ 5.22 Simulation of objective function $\varepsilon = 6.11 \times 10^{-7}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 Simulation of objective function $\varepsilon = 1.361 \times 10^{-6}$



รูปที่ 5.24 Simulation of objective function $\varepsilon = 2.74 \times 10^{-5}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีเพื่อทำนายพฤติกรรมของแผ่นฟิล์มบางเคลื่อนที่บนลูกกอล์ฟดังนี้

1. ได้เขียนสมการเรโนด์และสมการแสดงการเคลื่อนที่ของแผ่นฟิล์มบาง และได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาพฤติกรรมของแผ่นฟิล์มบาง
2. การกระจายแรงดันและความหนาฟิล์มของอากาศระหว่างแผ่นฟิล์มบางกับลูกกอล์ฟจะขึ้นกับความเร็วลูกกอล์ฟ ความยาวของแผ่นฟิล์ม แรงดึงของแผ่นฟิล์มและค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม
3. ระบบของแผ่นฟิล์มบางที่เคลื่อนที่บนลูกกอล์ฟที่ทำให้ความหนาฟิล์มอากาศต่ำที่สุดเมื่อความยาวของแผ่นฟิล์มเท่ากับ 0.11 เมตร รัศมีลูกกอล์ฟ 0.835 เมตร ให้ความหนาฟิล์มอากาศเท่ากับ 2.7361

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Mongkolwongrojn, K. Thammakosol, C. Aiumpornsin, "Theoretical Investigation in Thermoelastohydrodynamic Lubrication with Non-Newtonian Lubricants under Sudden Load Change", *Trans. of the ASME, Journal of Tribology*, vol. 128, No. 4, 2006.
- [2] M. Mongkolwongrojn, K. Thammakosol, "Theoretical Investigation of Transient Elastohydrodynamic Lubrication with Newtonian Solid-Liquid Lubricants", *Journal of Lubrication Science*, vol. 17, No.3, pp. 347-357, 2005
- [3] Jeremy G, Andrew P, Richard D, and Babatunde A, "Cross-directional of sheet and film processes," *automatica*, 2006, pp.191-211
- [4] Block, H, and Rossum, J.J, " The Foil Bearings: A New Departure in Hydrodynamic Lubrication," *Lubr. Eng.*, 1953, pp. 310-320.
- [5] Eshel, A, and Elrod, H.G, " The Theory of Infinitely Wide Perfectly Flexible Self-Acting Foil Bearings," *ASME J. Basic Eng.*, 1965, pp. 831-836.
- [6] H. Hashimoto, and H. Nakagawa, " Improvement of Web Spacing and Friction Characteristics by Two Types of Stationary Guides," *ASME*, 2001, pp.509-516
- [7] H. Hashimoto, and M. Okajima, "Theoretical and Experimental Investigation Into Spacing Characteristic Between Roller and Three Types of Webs With Different Permeabilities ," *ASME*, 2006, pp 267-274
- [8] Singiresu S, " *Engineering Optimization*," Wiley-Interscience, 1996
- [9] Mizoh Y, Yohda H, Kaminaka N, Kotera H, and Kita H, "Analysis of Tape Floating Behavior on Magnetic Head and Grooved Drum in VCR," *Industrial and Environmental Application of Fluid Mechanics*, 1992, pp 151-156
- [10] Muftu S, and Cole K.A, "The Fluid/Structure Interaction of a Thin Flexible Cylindrical web Supported by an Air Cushion," *Fluids Struct*, 1999, pp 681-708
- [11] Good J.K, "Shear in Multispan Web System," *Proceeding of the Fourth International Conference on Web Handling*, 1997, pp 264-285



ICEAST
2007

November 21-23, 2007

International Conference on Engineering, Applied
Sciences, and Technology
The Swissotel Le Concorde, Bangkok, Thailand



Messages



Conference Info



Sessions



Authors



Papers



Search



Help



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ICEAST
2007**

November 21-23, 2007

International Conference on Engineering, Applied
Sciences, and Technology
The Swissotel Le Concorde, Bangkok, Thailand

Session : E_H2 : Mechanical Engineering 2 & Chemical Engineering 1

Date : Thursday, 22nd November 2007

Time : 15.20 - 17.20



An Application of a Mathematical Programming Technique on optimal Spacing characteristic in Web Transport Systems (Abstract)

Mongkol Mongkolwangroj
Puttha Jeenkour

(Faculty of Engineering, KMITL, Thailand)
(Graduate Student, KMITL, Thailand)



Thermoelectrics for a Temperature and Humidity Control System (Abstract)

Mongkol Mongkolwangroj
Komsan Muysee

(Faculty of Engineering, KMITL, Thailand)
(Graduate Student, KMITL, Thailand)

Back

Menu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An Application of a Mathematical Programming Technique on optimal Spacing characteristic in Web Transport Systems

M. Mongkolwongrojn¹, P. Jeenkour²

¹Electro-Mechanical Engineering Lab, ReCCIT Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

²Graduate Student, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

Abstract— Web is a thin flexible material such as paper textiles, plastic sheet etc. In the web transport system, the moving webs and the rollers being the surrounding air between a web and a roller behaves as a self-acting flexible bearing. In this paper, optimal web handling system is achieved the objective function is defined as minimized spacing characteristics between roller and web to obtain sufficient traction in web transport system. The mathematical model has been developed from the existing numerical results based on modified Reynold equation. The mathematical programming comprised of the Broyden-Fletcher-Goldfarb-shanno (BFGS) method and the line search method was utilized to minimize the air spacing between rollers and webs in web transport system under the constraint of boundary friction between web and roller. The implemented approach is more practical in design and relatively less time consuming in comparison with other approaches. Since the adopted optimization technique can update itself automatically. The results for PET web without permeability are presorted and the expediency the method has been verified.

Keywords—Web transport system, modified Reynolds equation, Static characteristics, mathematical programming using BFGS method

I. INTRODUCTION

In the recent developments [1] in paper transportation system as shown in Figure 1, the improvement of sheet and film properties can mean significant reductions in material consumption, great production rates for existing equipment, improved product quality and reduced energy consumption.

The most critical factor of the performance of web transport system is the air film must be thin enough to achieve high traction between the web and the roller. Block and Van Rosum [2] and Eshel and Elrod [3] solved the incompressible Reynolds equation combined with the equilibrium equation to obtain the air film thickness. In 2006, Theoretical model for web transport system in order to estimate the entrained air film thickness between the web and the roller was presented. The predicted results of air film thickness are compared with the experimental results. In this paper, the PET web was examined to obtain the optimum web transport system.

II. THEORY

The modified Reynolds equation in steady state operating condition which governs the air film pressure in

the spacing between the web and the roller surface in the web transport system is expressed in dimensionless form as:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(H^3 P \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{1}{4\lambda^2} \frac{\partial}{\partial Z} \left(H^3 P \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = 6 \frac{\partial(PH)}{\partial X} \quad (1)$$

Web equilibrium equation is:

$$1 - \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} = \int_{-0.5}^{0.5} P dZ \quad (2)$$

Air film thickness in the central region [4,5]

$$H_0 = \frac{h_0}{R\epsilon^{2/3}} = 0.589 - \frac{1.614}{\lambda} + \frac{1.764}{\lambda^2} \quad (3)$$

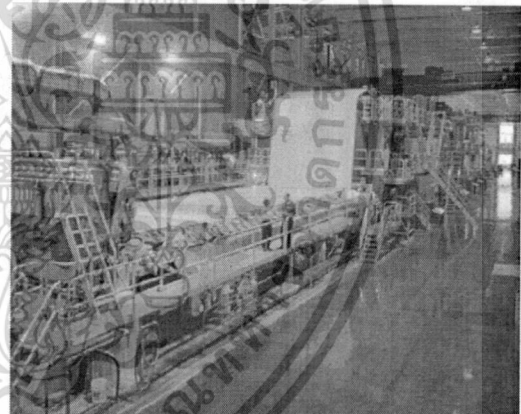


Fig 1. An industrial paper machine

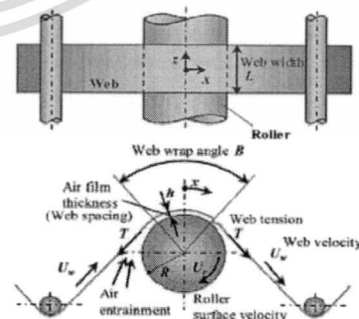


Fig 2. Flexible bearing model for web-roller interface

In web transportation system; it is very important to examine the spacing and friction characteristics between the web and the roller. The web-roller interface problem can be modeled as a self-acting flexible bearing model as shown in Figure 2. Finite difference method has been proposed for solving the modified Reynolds equation to obtain static characteristics of the air bearing between the web and the roller in the web transport system.

III. OPTIMIZATION TECHNIQUE

The optimum design of the web transport system in steady state can be formulated as:

The statement of problem is to minimize H_0

$$H_0 = \frac{h_0}{R\epsilon^{2/3}} = 0.589 \frac{1.614}{L} (2R)\epsilon^{1/3} + \frac{1.764}{L^2} (2R)^2 \epsilon^{2/3} \quad (4)$$

Where R, ϵ are the design variable.

The constraints are

$$h_0 \leq 3\sigma \quad (5)$$

$$U^L \leq U \leq U^U \quad (6)$$

$$R^L \leq R \leq R^U \quad (7)$$

In this problem, the design variables are roller radius R and parameter ϵ . The constraint of equation (5) is to keep sufficient friction between the web and the roller. The constraints of equation (6) to equation (7) are impose to limit the value of web and roller system where lower and upper bounds are denoted by superscripts L and U respectively.

Initial roller radius R^0 and web parameter ϵ^0 are assumed. At the starting point, a vector descent directions is determined. The objective function of equation (4) will be reduced. Then, a constrained line search is performed to find the scalar parameter α^* which defined the distance of travel.

Where the objective function becomes minimum without violating the side constraints in directions.

In the paper, the Broyden-Fletcher-Goldfarb-shanno (BFGS) method for the determination of a descent direction due to its effective algorithm based on polynomial approximation method for line search under restriction of the side constraints.

$$x^{q+1} = x^q + \alpha_q^* S^q \quad (8)$$

Where q is the iteration number of optimization process and is a vector of design variable which are roller radius R and web parameter ϵ . The convergence criteria are:

$$\left| \nabla f(x_i) \right| = \left| \frac{\partial H_0}{\partial x_i} \right| \leq 0.001, \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

The Hessian matrix is:

$$B_{i+1} = B_i + \left(1 + \frac{g_i^T B_i g_i}{d_i^T g_i} \right) \frac{d_i d_i^T}{d_i^T g_i} - \frac{d_i g_i^T B_i}{d_i^T g_i} - \frac{B_i g_i d_i^T}{d_i^T g_i} \quad (10)$$

$$\text{Where } \begin{aligned} d_i &= x_{i+1} - x_i = \alpha_i^* S_i \\ g_i &= \nabla f(x_{i+1}) - \nabla f(x_i) \end{aligned} \quad (11)$$

IV. COMPUTATIONAL RESULTS

The numerical results using finite difference technique to solve the modified Reynolds equation in equation (1) in this paper are shown in Figure 3 to Figure 5. The results for PET under different web tension of $T=100$ N and 500 N for various roller velocity U as shown in Figure 3. The air film thickness becomes considerable small for low roller speed and for low web tension. The air film thickness increases highly with the decreasing of the roller width due to side leakage of entrained air as shown in Figure 4. Figure 5 shows the air film thickness increases considerable as the radius of the roller decreases.

The proposed optimization approach is developed based on the accuracy of the mathematical model described in the previous section and applied to the flexible web-roller system as shown in Figure 2. The relationship among the objective function and the design variables are shown in Figure 6, Figure 7, Figure 8 and Figure 9 respectively. For web width $L=0.02$ m, the optimum film thickness and the optimum roller radius are 0.2198 and 0.19 m respectively as shown in Figure 6. The optimum dimensionless film thickness are 0.2198 , 0.5282 and 0.5579 for web width $L=0.03$ m, 0.5 m and 1 m respectively. The results also show that for web width equal to 0.03 m, 0.5 m and 1.0 m, the optimum roller radius are equal to 0.32 , 0.4 and 0.4 m respectively as shown in Figure 7 to Figure 9.

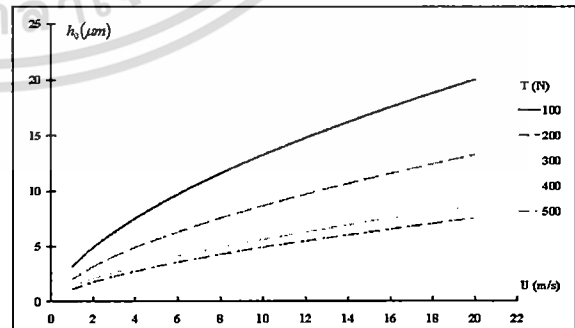


Fig 3. Variation of air film thickness h_0 with roller velocity U and web tension T

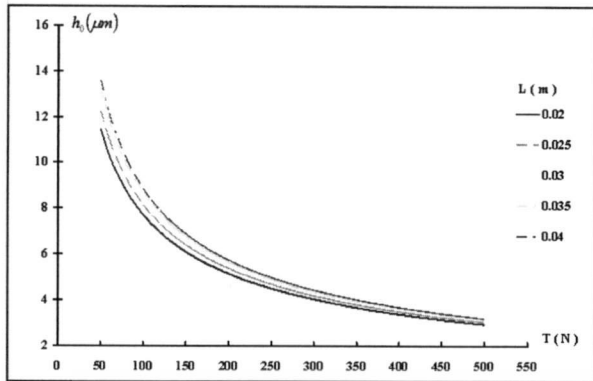


Fig 4. Variation of air film thickness h_0 with web tension T and roller width L

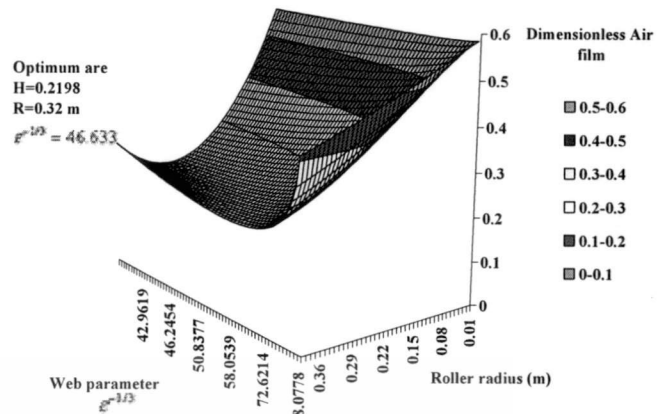


Fig 7. Simulation of objective function $L=0.03$ m

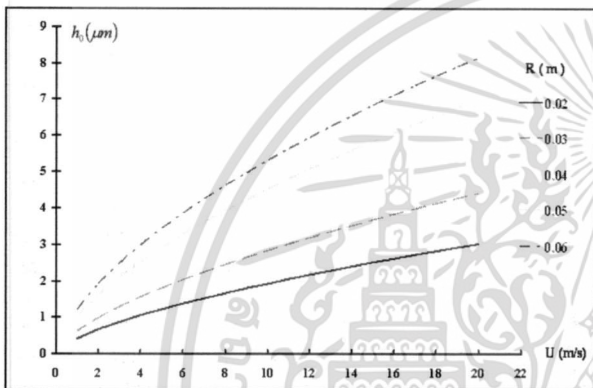


Fig 5. Variation of air film thickness h_0 with roller velocity U and roller radius R

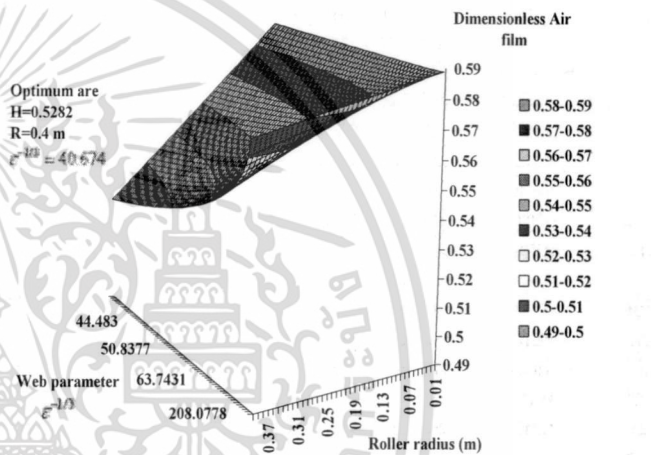


Fig 8. Simulation of objective function $L=0.5$ m

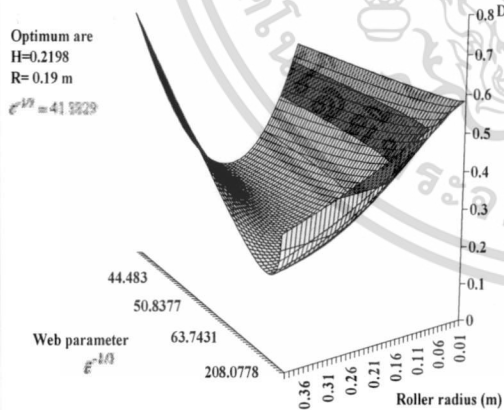


Fig 6. Simulation of objective function $L=0.02$ m

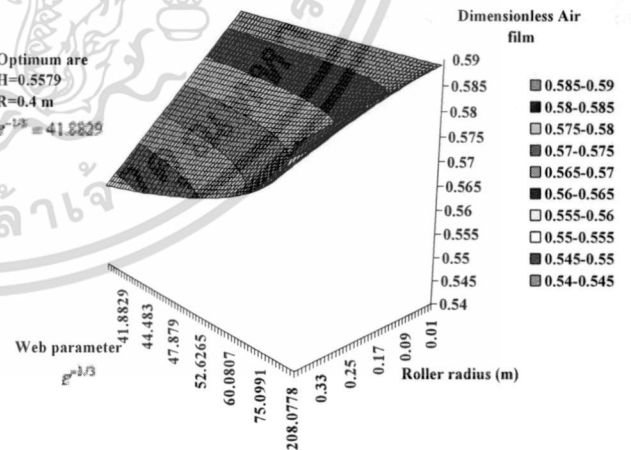


Fig 9. Simulation of objective function $L=1.0$ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V. CONCLUSION

This paper has proposed the practical approaches to the prediction of optimum web transport system. The optimization technique employing the Broyden-Fletcher-Goldfarb-shanno method and constrained line search algorithm was used to obtain minimum air film spacing of the air bearing in web transport system in order to obtain the highest performance of web transport system.

VI. NOMENCLATURE

B = Hessian matrix

$f(x_i)$ = objective function

h_0 = minimum air film thickness at the central position
web (μm)

H_0 = normalized minimum air film thickness at the
central position ($\equiv h_0 / (R\varepsilon^{2/3})$)

L = web width (m)

p = air film pressure (Pa)

p_a = ambient pressure (Pa)

P = normalized air film pressure ($\equiv (p - p_a) / (T / R)$)

PET = materials of web (polyethylene terephthalate)

R = roller radius (m)

S = search direction

T = web tension (N/m)

U = transport velocity ($\equiv U_r + U_w$) (m/s)

U_r = roller velocity (m/s)

U_w = web velocity (m/s)

x_i = design variable

X = normalized coordinate in the transport direction

Z = normalized coordinate in the axial direction of
roller

ε = web parameter ($\equiv 6U\eta / L$)

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

η = air viscosity

σ = composite rms roughness $\sigma = \sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_r^2}$ (μm)

σ_r = rms roughness on roller surface (μm)

σ_w = rms roughness on web surface (μm)

α^* = optimal step length

ACKNOWLEDGMENT

This research work was partly supported financially by ReCCIT, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

REFERENCES

- [1] Jeremy G, Andrew P, Richard D, and Babatunde A, "Cross-directional of sheet and film processes," *automatica*, 2006, pp.191-211
- [2] Block, H, and Rossum, J.J, "The Foil Bearings: A New Departure in Hydrodynamic Lubrication," *Lubr. Eng.*, 1953, pp. 310-320.
- [3] Eshel, A, and Elrod, H.G, "The Theory of Infinitely Wide Perfectly Flexible Self-Acting Foil Bearings," *ASME J. Basic Eng.*, 1965, pp. 831-836.
- [4] H. Hashimoto, and H. Nakagawa, "Improvement of Web Spacing and Friction Characteristics by Two Types of Stationary Guides," *ASME*, 2001, pp.509-516
- [5] H. Hashimoto, and M. Okajima, "Theoretical and Experimental Investigation Into Spacing Characteristic Between Roller and Three Types of Webs With Different Permeabilities," *ASME*, 2006, pp 267-274
- [6] Singiresu S, "Engineering Optimization," Wiley-Interscience, 1996
- [7] Mizoh Y, Yohda H, Kaminaka N, Kotera H, and Kita H, "Analysis of Tape Floating Behavior on Magnetic Head and Grooved Drum in VCR," *Industrial and Environmental Application of Fluid Mechanics*, 1992, pp 151-156
- [8] Muftu S, and Cole K.A, "The Fluid/Structure Interaction of a Thin Flexible Cylindrical web Supported by an Air Cushion," *Fluids Struct*, 1999, pp 681-708
- [9] Good J.K, "Shear in Multispan Web System," *Proceeding of the Fourth International Conference on Web Handling*, 1997, pp 264-285