



ใบรับรองปัญหาพิเศษ

เรื่อง

การประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็กในเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิงบอล
(Application of Magnetic sensors in Falling ball Viscometer)

โดย

นายสุรเกียรติ์ ว่องวีรกิจโกศล

รหัสนักศึกษา 43040697

นางสาวอภิญญา ผลทิพย์

รหัสนักศึกษา 43040699

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

.....

(อาจารย์พิเศษ ดำรง โกวรรณ)

.....22/.....03/.....47.....

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร

.....

(ผศ.ดร.ระติพร หาเรือนกิจ)

คณบดีโครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปัญหาพิเศษ

เรื่อง

การประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็กในเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งบอล
(Application of Magnetic sensors in Falling ball Viscometer)



โดย

นายสุรศักดิ์ ว่องชีริกโกศล

รหัส 43040697

นางสาวอภิญญา ผลทิพย์

รหัส 43040699

ร/พ.

ศษ 45 ก

2546



T096873

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **96873**
วัน,เดือน,ปี..... - 5 Jun 2009

โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร

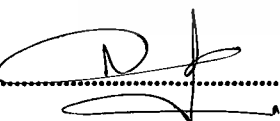
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นายสุรเกียรติ์ ว่องธีรกิจโกศล และ นางสาวอภิญญา ผลทิพย์ 2546 : การประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็กในเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิงบอล (Application of Magnetic sensors in Falling ball Viscometer) โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิงบอลเป็นเครื่องวัดความหนืดชนิดหนึ่งใช้หลักการตกของลูกบอลโดยนำเอาของเหลวที่ต้องการวัดความหนืดมาใส่ไว้ในกระบอกดวงแก้ว จากนั้นก็นำเอาวัตถุรูปทรงกลมที่รู้ขนาดและน้ำหนักมาปล่อยให้จมลงในของเหลวนั้น เพื่อหาระยะทางและเวลาที่ใช้ในการตกในของเหลวของลูกบอล นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเร็ว นำไปแทนค่าในสมการของสโตค เพื่อหาค่าความหนืดออกมา ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการจับเวลาเราจึงนำตัวรับสัญญาณแม่เหล็กเข้ามาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณแม่เหล็กนั้นประกอบไปด้วย ส่วนแรก ขดลวดทองแดง 2 ขด ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ขดลวดตัวที่ 1 จะอยู่ด้านบนคือระยะเริ่มต้นเมื่อมีลูกเหล็กวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กจะทำให้เวลาเริ่มเดิน และเมื่อลูกเหล็กวิ่งผ่านขดลวดตัวที่ 2 ที่อยู่ด้านล่างซึ่งเป็นระยะสุดท้ายจะทำให้เวลาที่เดินหยุด ส่วนที่สอง วงจรตรวจรับสัญญาณแม่เหล็ก เป็นวงจรตรวจรับสัญญาณแม่เหล็ก ส่วนที่สาม ออสซิลโลสโคป ใช้เป็นนาฬิกาจับเวลาจับเวลา (มีความแม่นยำมากกว่า) และส่วนสุดท้าย วงจรนาฬิกาดิจิตอล เป็นนาฬิกาจับเวลา ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ น้ำ น้ำมันพืช น้ำเชื่อม ค่าความหนืดที่วัดได้มีค่า 1509.65, 2365.02, 4704.71 เซนติพอยส์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ลูกเหล็กที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.25 เซนติเมตร ระยะทางที่ใช้ 24.6 เซนติเมตร จากการทดลองเราไม่สามารถเปรียบเทียบเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิงบอลกับเครื่องวัดความหนืดแบบรูคฟีลด์ รุ่น LV DV III+ ได้ เนื่องจากวงจรรับสัญญาณแม่เหล็กมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ เหมาะสมกับของเหลวชนิดนิวโตเนียน สามารถวัดของเหลวที่มีความหนืดมากได้ดี และระยะห่างระหว่างขดลวดตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ไม่ควรน้อยกว่า 20 เซนติเมตรเนื่องจากจะทำให้สนามแม่เหล็กจากขดลวดเกิดการรบกวนกันขึ้น

1.) 



22 / 03 / 47

2.) อภิญญา ผลทิพย์

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

วัน เดือน ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำปัญหาพิเศษในหัวข้อ การประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็กในเครื่องวัดความหนืดแบบ
ฟอลติงบอล นี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี ทางผู้จัดทำต้องขอขอบคุณบุคคลต่างๆ ดังต่อไปนี้

หนุ่มๆ นายทศพร เกษมภักดี กับแนวความคิดเริ่มต้นอันพิสดารแต่ก็นำมาสู่การเปลี่ยน
จินตนาการให้กลายเป็นความจริง

ป๊อคและเพื่อนวิศวะไฟฟ้าและคนอื่น ที่เจอกัน โดยบังเอิญที่หอสมุดแต่ก็ได้ช่วยร่างแบบ
เบื้องต้นของงานให้

หมู เพื่อนวิศวะอิเล็กทรอนิกส์ ที่ช่วยให้ข้อมูลและชิมกุญแจห้องโปรเจกต์จนงานสำเร็จได้ด้วยดี
พี่ธงและพี่ต่อ ที่คอยเอื้อเฟื้อคอมฯนอกเวลาและให้ข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง
พี่สี่ น้องชายเจ้าของหอพักโชติพัทธ์ (สุดซอยร้านพันธ์) รุ่นพี่วิศวะอิเล็กทรอนิกส์ลาดกระบังที่เจอกัน
ยิ่งกว่านิยายแต่ก็ช่วยเหลืออย่างเต็มที่ ทั้งให้ข้อมูลและยกอุปกรณ์จากบ้านมาให้ลงมือทำและ
ขอขอบพระคุณเจ้ศรี เจ้าของหอ ที่น่ารัก ที่ให้ยืมอุปกรณ์และห้องพักอาศัย (น้ำ-ไฟ แยกต่างหาก)

พี่จี้ พี่ ป.โทวิศวะอิเล็กทรอนิกส์ พี่ข้างห้อง ที่คอยช่วยทุกอย่างตั้งแต่เขียนวงจรและให้คำปรึกษา
ตลอดจนให้ห้องโปรเจกต์ไว้สำหรับทำงาน

ขอขอบพระคุณอาจารย์กิตติพล หัวหน้าภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ พระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่ได้
กรุณาให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์กิตติชัย บรรจง กับคำปรึกษาและการที่จะนำเครื่องมือไปใช้ในการ
เรียนการสอนแก่นักศึกษาต่อไป ซึ่งผู้จัดทำหวังว่า จะสามารถใช้ได้ดี เพื่อประโยชน์สูงสุด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ถิรเดช ดำรงโกวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา กับข้อมูลและงบประมาณใน
การนำมาแก้ไขปรับปรุง กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

และขอขอบพระคุณ พ่อ แม่ กับงบประมาณที่ไม่ได้บอกกล่าวแต่ก็ใช้อย่างเป็นประโยชน์และ
ขอบคุณกับความห่วงใยของเพื่อนๆทุกคนที่มีก็จะให้กำลังใจว่า ขอให้จบซัมเมอร์ นะ และกับทุกๆ
กำลังใจที่ให้แก่กันด้วยดีตลอดมา

ผู้จัดทำ

ศุรกิจย์ ว่องธีรกิจโกศล

อภิัญญา ผลทิพย์

15 มีนาคม 2547

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1	1
บทนำ	1
วัตถุประสงค์	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์	2
2.1 คุณสมบัติของของไหล (Properties of fluids)	2
2.2 วิวัฒนาการของกลศาสตร์ของไหล (Development of fluid mechanics)	2
2.3 ความหนืด (Viscosity)	3
2.4 คินแมติกส์ของการไหล (Kinematids of fluid flow)	10
2.5 การไหลแบบลามินาร์และการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ (Laminar and Turbulent flow)	11
2.6 สมบัติทางรีโโลยีของอาหารเหลว (Rheological Properties of Fluid Foods)	14
2.7 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการไหล	19
2.8 การวัดความหนืด (Measurement of viscosity)	20
2.9 เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งบอล	25
บทที่ 3 การสร้างและการทำงาน	29
ส่วนประกอบเครื่องวัดความหนืดที่ประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็ก	30
หลักการทำงาน	34
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการ	38
การทดลอง	38
เครื่องมือและอุปกรณ์	38
วิธีการทดลอง	39
บทที่ 5 ผลการทดลอง	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการทดลองชุดที่ 1	41
ผลการทดลองชุดที่ 2	42
ปัญหาที่พบ	46
การปรับแต่งวงจร	46
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	48
เอกสารอ้างอิง	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ	40
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองชุดที่ 1	41
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองชุดที่ 2 (การทดลอง โดยใช้ออสซิลอสโคปในการจับเวลา) ที่ระยะทาง 24.6 เซนติเมตร	42
ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความหนืดของน้ำเชื่อมความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างการจับเวลาโดยใช้ออสซิลอสโคปกับนาฬิกาดิจิตอล ที่ระยะทาง 24.6 เซนติเมตร	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ความหนืดสัมบูรณ์ μ ของของไหล	4
ภาพที่ 2 ความหนืดคิเนแมติก ν ของของไหล	5
ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว	6
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับ velocity gradient	7
ภาพที่ 5 เพลาที่หมุนร่วมแกนอยู่ในกระบอกกลาง	8
ภาพที่ 6 การไหลแบบลามินาร์	12
ภาพที่ 7 การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์	12
ภาพที่ 8 Head loss ของท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอ เมื่อความเร็วแตกต่างกัน	14
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate)	15
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์แบบบิงแฮมพลาสติก	16
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์แบบซูโดพลาสติก	17
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์แบบไดลาแทน	17
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์แบบริคโซโทรปี	18
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์แบบบริโอเพกซี	18
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนกับอัตราเฉือน ของของเหลวต่างชนิดกัน	19
ภาพที่ 16 เครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน	20
ภาพที่ 17 แผนภูมิของแรงที่กระทำกับวัตถุภาพทรงกลมเมื่อความเร็วคงที่แล้ว	24
ภาพที่ 18 เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งบอลของสโตคส์	28
ภาพที่ 19 แสดงเครื่องวัดความหนืดที่ประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็ก	29
ภาพที่ 20 แสดงเครื่องวัดความหนืดพร้อมนาฬิกาจับเวลาดิจิตอล	30
ภาพที่ 21 แสดงชุดชุดลวดทองแดง	30
ภาพที่ 22 แสดงกระบอกตวง ขนาด 500 มล.และฐานพลาสติก	31
ภาพที่ 23 แสดงเครื่องออสซิลโลสโคปและการใช้ในการทดลอง	31
ภาพที่ 24 แสดงวงจรเครื่องวัดความหนืด	32
ภาพที่ 25 แสดงวงจรรนาฬิกาดิจิตอล	33
ภาพที่ 26 แสดงสัญญาณ ณ จุด TP1 ที่ $t = 100 \mu s$	35
ภาพที่ 27 แสดงสัญญาณ ณ จุด TP 2 ในขณะที่ไม่มีลูกเหล็ก	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 28 แสดงสัญญาณ ณ จุด TP 2 ในขณะที่มีลูกเหล็ก	36
ภาพที่ 29 แสดงสัญญาณ ณ จุด TP3	37
ภาพที่ 30 แสดงจุดที่จะทำการปรับแต่งเครื่อง	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งบอลเป็นเครื่องวัดความหนืดชนิดหนึ่งใช้หลักการตกของลูกบอล โดยนำเอาของเหลวที่ต้องการวัดความหนืดมาใส่ไว้ในกระบอกดวงแก้ว จากนั้นก็นำเอาวัตถุภาพทรงกลมที่รูขนาดและน้ำหนักมาปล่อยให้จมลงในของเหลวนั้น เพื่อหาระยะทางและเวลาที่ใช้ในการตกในของเหลวของลูกบอล นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเร็ว นำไปแทนค่าในสมการของสโตคส์ เพื่อหาค่าความหนืดออกมา ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการจับเวลา จากที่จับเวลาโดยใช้สายตามองวัตถุทรงกลมในของเหลวที่ใสแล้วใช้นาฬิกาจับเวลาโดยใช่มือกดปุ่ม เราจึงนำตัวรับสัญญาณแม่เหล็กเข้ามาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการจับเวลา และสามารถใช้กับของเหลวที่มีลักษณะขุ่นได้ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณแม่เหล็กนั้นประกอบไปด้วย ส่วนแรก ขดลวดทองแดง 2 ขด ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก ขดลวดตัวที่ 1 จะอยู่ด้านบนคือระยะเริ่มต้นเมื่อมีลูกเหล็กวิ่งผ่านสนามแม่เหล็กจะทำให้เวลาเริ่มเดิน และเมื่อลูกเหล็กวิ่งผ่านขดลวดตัวที่ 2 ที่อยู่ด้านล่างซึ่งเป็นระยะสุดท้ายจะทำให้เวลาที่เดินหยุด ส่วนที่สอง วงจรตรวจรับสัญญาณแม่เหล็ก เป็นวงจรตรวจรับสัญญาณแม่เหล็ก ส่วนที่สาม ออสซิลโลสโคป ใช้เป็นนาฬิกาจับเวลาจับเวลา (มีความแม่นยำมากกว่า) ส่วนที่สี่ วงจรนาฬิกาดิจิตอล เป็นนาฬิกาจับเวลา ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ของเหลวชนิดนิวโตเนียน เช่น น้ำ น้ำมันพืช และน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการใช้งานของการวัดความหนืดแบบการใช้การตกของลูกบอล (Falling ball)
2. เพื่อเปรียบเทียบการวัดความหนืดกับเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 คุณสมบัติของของไหล (Properties of fluids)

กลศาสตร์ของไหลเป็นวิทยาศาสตร์ของของเหลวและแก๊ส กลศาสตร์ของไหลนี้ใช้พื้นฐานเดียวกันกับกลศาสตร์ของแข็ง แต่กลศาสตร์ของไหลนี้ซับซ้อนกว่า ทั้งนี้เพราะส่วนต่างๆ ที่ประกอบกันเข้าเป็นก้อนของไหลนั้นไม่สามารถแยกกันอยู่ แต่กลศาสตร์ของแข็งนั้นส่วนต่างๆ สามารถแยกกันอยู่ และสามารถจับต้องได้

ของไหล เป็นชื่อที่ใช้สำหรับเรียกของเหลวและแก๊ส ของไหลเป็นสสารที่มีจำนวนมวลคงที่แน่นอนแต่มีภาพร่างไม่แน่นอน เพราะจะเปลี่ยนแปลงไปตามภาพร่างของภาชนะที่รองรับ แก๊สเป็นของไหลที่สามารถอัดตัวได้สูง (high compressibility) เพราะ โมเลกุลของมันอยู่รวมกันอย่างหลวมๆ ดังนั้นถึงแม้ว่าภาชนะที่รองรับมันนั้นจะมีขนาดแตกต่างกันก็ตาม มันก็สามารถที่จะกระจายตัวหรืออัดตัวได้เต็มภาชนะที่รองรับนั้นทั้งของเหลวและแก๊สต่างก็มีความสามารถในการถ่ายทอดความดันหรือส่งทอดความดันจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ และเนื่องจากของไหลยอมปรับตัวเข้ากับภาพร่างของภาชนะที่รองรับ ดังนั้นจึงสามารถใช้ปริมาตรของไหลไปตามท่อและเส้นทางที่คดเคี้ยวต่างๆ ได้โดยสะดวก

2.2 วิวัฒนาการของกลศาสตร์ของไหล (Development of fluid mechanics)

วิชากลศาสตร์ของไหลแบ่งออกได้เป็น 3 แขนงด้วยกัน คือ :

ของไหลสถิต (fluid statics) : เป็นการศึกษาถึงกลไกของของไหลที่นิ่งอยู่กับที่หรือของไหลไม่มีการเคลื่อนไหว

จลศาสตร์ (kinematics) : เป็นการศึกษาถึงความเร็วและเส้นทางการเคลื่อนที่ของของไหล โดยไม่มีการพิจารณาถึงแรงหรือพลังที่เกิดขึ้น

ไฮโดรไดนามิกส์ (hydrodynamics) : เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความเร่ง และแรงที่กระทำโดยของไหล หรือกระทำกับของเหลวที่กำลังเคลื่อนที่ ส่วนใหญ่แล้วคลาสสิกอลไฮโดรไดนามิกส์ (Classical hydrodynamics) เป็นวิชาทางด้านวิทยาศาสตร์ เนื่องจากเกี่ยวข้องกับของไหลที่สมมุติขึ้นในจินตนาการ (ideal fluid) ซึ่งถือว่าเป็นของไหลที่ไม่มีความเสียดทาน การศึกษาของไหลในจินตนาการโดยไม่ได้พิจารณาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลจริงนั้นทำให้ผลที่ได้รับนั้นคุณค่า

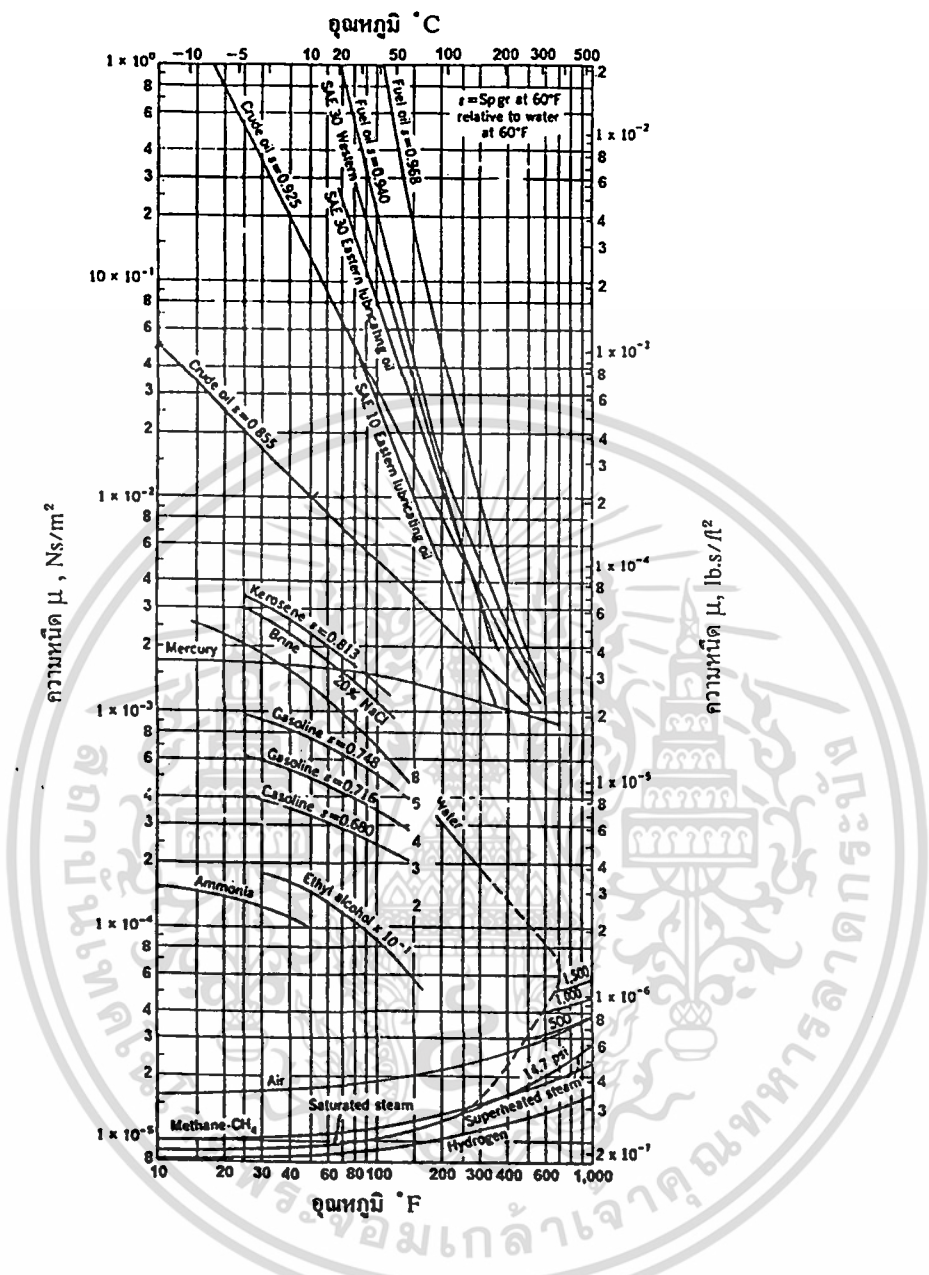
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการใช้งานน้อยมาก ดังนั้นในอดีตที่ผ่านมาวิศวกรจึงหันไปใช้วิธีทดลอง และนำเอาผลที่ได้จากการทดลองนี้มาสร้างสูตรสำเร็จขึ้นสำหรับใช้งานในด้านปฏิบัติและเรียกวิชาดังกล่าวนี้ว่า วิชาไฮดรอลิกส์

วิชาไฮดรอลิกส์ที่ใช้สูตรสำเร็จนี้ ส่วนใหญ่จะใช้กับน้ำ และมีขอบเขตการใช้งานค่อนข้างแคบ แต่เนื่องจากวิชาการทางด้านการบิน (aeronautic) วิศวกรรมเคมีและอุตสาหกรรมปิโตรเลียมขยายตัวมากขึ้นดังนั้นความต้องการในการใช้งานก็มากตามขึ้นไปด้วย ฉะนั้นจึงได้นำเอาคลาสสิกอลไฮโดรไดนามิก (classical hydrodynamics) นี้มารวมกับการศึกษาของของไหลจริง และเรียกศาสตร์แขนงใหม่นี้ว่า กลศาสตร์ของไหล ในวิชากลศาสตร์ของไหลสมัยใหม่จะนำเอาหลักการพื้นฐานของไฮโดรไดนามิกส์ มารวมกับเทคนิคทางด้านการทดลองของไฮดรอลิกส์ ข้อมูลจากการทดลองนี้สามารถนำมาใช้ในการสร้างทฤษฎีหรือใช้ในการสร้างทฤษฎีหรือใช้เป็นข้อมูลสำหรับประกอบการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ ผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้ก็จะเป็นกฎพื้นฐานของวิชากลศาสตร์ของไหล ที่สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาในงานทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวกับการไหลของของไหล

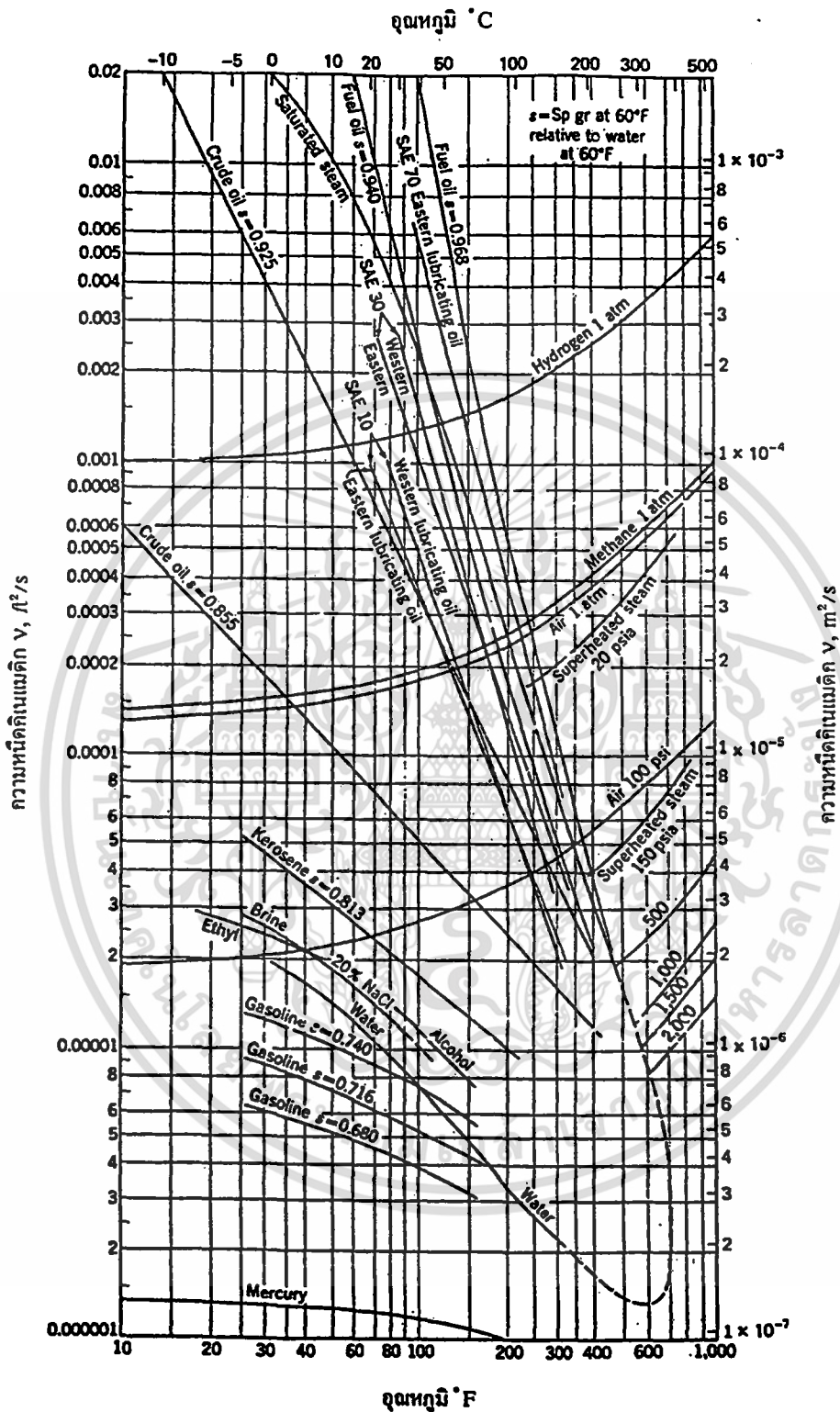
2.3 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของของไหลเป็นค่าความต้านทานต่อแรงเฉือน หรือเป็นค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนภาพเชิงมุม (angular deformation) แรงเสียดทานในของไหลที่กำลังเคลื่อนที่อยู่เป็นผลมาจากแรงเกาะกันในระหว่าง โมเลกุลและการแลกเปลี่ยน โมเมนตัมในระหว่าง โมเลกุลของของไหล ในภาพที่ 1 และ 2 เป็นค่าความหนืดของของไหลบางชนิด จากภาพจะเห็นได้ว่าในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นนั้น ความหนืดของของแก๊สทุกชนิดกลับเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เพราะแรงเกาะกันในระหว่าง โมเลกุลที่หายไปนั้นเป็นลักษณะเด่นของของเหลว ส่วนแก๊สนั้นลักษณะเด่นเกิดมาจากการแลกเปลี่ยน โมเลกุลในระหว่างชั้นของของเหลวที่มีความเร็วแตกต่างกัน โมเลกุลที่อยู่ในชั้นของไหลที่เร็วกว่าจะย้ายไปอยู่ในชั้นของไหลที่ช้ากว่า และไปทำให้ของไหลชั้นที่ช้ากว่านั้นเคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่วน โมเลกุลจากชั้นที่ช้ากว่าก็จะย้ายไปอยู่ในชั้นที่เร็วกว่า และไปหน่วงให้ชั้นที่เร็วกว่านั้นเคลื่อนที่ช้าลง การแลกเปลี่ยน โมเลกุลเช่นนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้น หรือทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นในระหว่างชั้นที่ติดต่อกันนั้น ดังนั้น การเคลื่อนไหวของโมเลกุลแก๊สที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แก๊สมีความหนืดสูงขึ้น



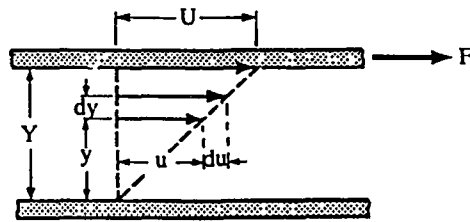
ภาพที่ 1 ความหนืดสัมบูรณ์ μ ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2 ความหนืดคินแมติก V ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว

ให้พิจารณาแผ่นวัตถุสองแผ่น ดังภาพที่ 3 แผ่นวัตถุทั้งสองนี้มีขนาดโตมากจนสามารถตัดผลกระทบจากสภาวะของขอบแผ่นวัตถุทิ้งได้ แผ่นวัตถุทั้งสองนี้อยู่ห่างกันเป็นระยะทางเท่ากับ Y ช่องว่างระหว่างแผ่นวัตถุทั้งสองนี้บรรจุด้วยของไหล ให้วัตถุแผ่นล่างอยู่นิ่งกับที่ ส่วนวัตถุแผ่นบนเคลื่อนที่ในแนวขนานกับแผ่นล่างด้วยความเร็ว U โดยมีแรง F กระทำกับพื้นที่ A ลักษณะดังกล่าวนี้ได้แก่ช่องว่างของเจอร์นอลแบร์ริง (journal bearing) ที่บรรจุด้วยน้ำมัน (ตัดแรงตามแนวรัศมีทิ้ง)

อนุภาคของของไหลที่สัมผัสกับแผ่นวัตถุ จะเกาะติดกับแผ่นวัตถุนั้น และถ้าหากระยะห่าง Y หรือความเร็ว U ไม่มากจนเกินไปแล้ว ความเร็วของของไหลแต่ละชั้นก็จะค่อยๆ ลดหลั่นลงไป (velocity gradient) ในลักษณะที่แปรเป็นเส้นตรง โดยของไหลแต่ละชั้นจะเลื่อนตัวไปบนชั้นของของไหลที่อยู่ถัดไปจากการทดลองกับของไหลส่วนใหญ่แล้วปรากฏว่า แรง F ที่จะทำให้วัตถุเคลื่อนที่นั้นแปรโดยตรงกับพื้นที่ A และความเร็ว U ของแผ่นวัตถุ แต่จะแปรตรงกันข้ามกับระยะห่าง Y ของแผ่นวัตถุทั้งสอง และเมื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์แล้วก็จะได้ว่า :

$$F \propto \frac{AU}{Y}$$

จะเห็นได้จากสามเหลี่ยมคล้ายในภาพที่ 1.3 ว่าค่า U/Y นั้นสามารถแทนได้ด้วย velocity gradient, du/dy และถ้าให้ μ เป็นค่า constant of proportionality แล้วก็จะได้ว่า :

$$F = \frac{\mu AU}{Y} = \frac{\mu A du}{dy}$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{\mu U}{Y} = \frac{\mu du}{dy} \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือน (shearing stress), N/m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

F = แรงที่กระทำกับวัตถุ, N

A = พื้นที่ของแผ่นวัตถุ, m^2

μ = ค่าคงที่, Ns/ m^2

U = ความเร็ว, m/s

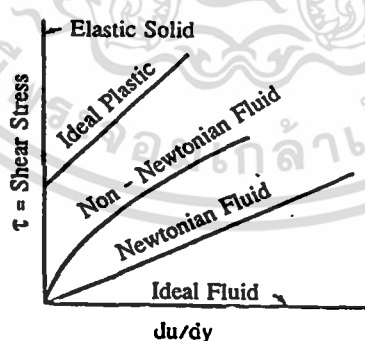
Y = ระยะห่างระหว่างแผ่นวัตถุทั้งสอง, m

สมการ (2.1) นี้มีชื่อเรียกว่า สมการความหนืดของนิวตัน (Newton's equation of viscosity) ถ้าเขียนใหม่เพื่อแสดงค่า proportionality constant ก็จะได้ว่า :

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

เราเรียก μ ในสมการ (2.2) นี้ว่า สัมประสิทธิ์ความหนืด (coefficient of viscosity) หรือความหนืดสัมบูรณ์ (absolute viscosity) หรือความหนืดไดนามิกส์ (dynamic viscosity) หรือเรียกเพียงสั้นๆ ว่าความหนืด

โดยความแตกต่างระหว่างของแข็งกับของไหลนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับความเค้นเฉือนของสารนี้ถ้ารับความแตกต่างอื่นระหว่างของไหลและของแข็งนั้นจะได้ศึกษากันในรายละเอียดโดยอาศัย ภาพที่ 4



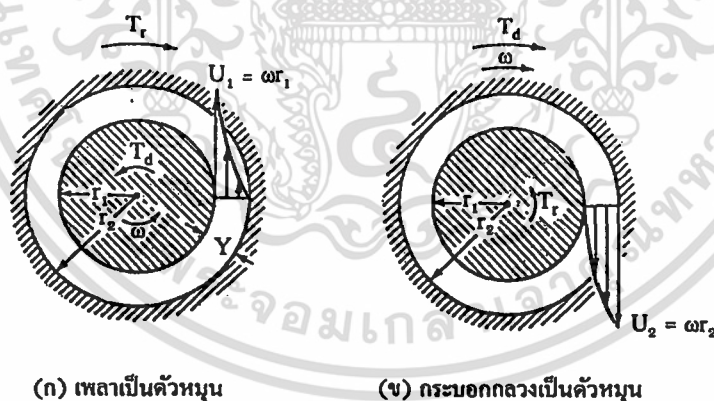
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับ velocity gradient

ในกรณีที่เป็นของแข็ง ความเค้นเฉือนจะเป็นสัดส่วนกับขนาดของการเปลี่ยนแปลง (deformation) แต่จากสมการ (2.1) นั้นปรากฏว่า ความเค้นเฉือนของของไหลจะเป็นสัดส่วนกับอัตรา การเปลี่ยนแปลง (time rate of deformation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราเรียกของไหลที่มีค่า constant of proportionality หรือ ความหนืดที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) ของไหลดังกล่าวนี้แสดงด้วยกราฟเส้นตรงที่อยู่ในภาพที่ 4 ค่าความลาดเอียงของเส้นตรงดังกล่าวนี้ก็คือ ค่าความหนืดของมันนั่นเอง ส่วนของไหลในจินตนาการซึ่งไม่มีความหนืดนั้น ก็สามารถแทนได้ด้วยเส้นกราฟที่อยู่ในแกนนอน สำหรับของแข็งที่มีความยืดหยุ่นอย่างแท้จริงนั้นแทนด้วยเส้นกราฟในแกนตั้ง ส่วนพลาสติกที่มีความเค้นก่อนเกิดการเปลี่ยนสภาพภายหลังที่เลยจุดครากไปแล้วก็สามารถแทนได้ด้วยกราฟเส้นตรงที่ตัดแกนตั้งตรงความเค้นของจุดคราก และถึงแม้ว่าจะมีของไหลแบบนอนิวโตเนียน (Non-Newtonian fluid) ได้แก่ สี โคลน และ พลาสติกบางชนิด ที่มีค่า μ แปรตามอัตราการเปลี่ยนแปลงอยู่ด้วยก็ตาม มันก็มีประโยชน์ต่องานทางด้านวิศวกรรมไม่มากมายนัก ดังนั้น ในที่นี้ก็จะขอกล่าวถึงของไหลทั่วไปที่เป็นไปตามกฎของนิวตันแต่เพียงอย่างเดียว

ในกรณีของแผ่นวัตถุที่วางขนานกันดังภาพที่ 3 นั้น ถ้าหาก U มีค่าคงที่ และตัดผลกระทบจากสถานะที่ขอบแผ่นวัตถุทิ้งแล้ว ความเค้นเฉือนบนแผ่นวัตถุทั้งสองก็จะเท่ากัน และเนื่องจาก $\mu \propto (du/dy)$ ดังนั้น velocity gradient, du/dy ก็จะมีค่าคงที่



ภาพที่ 5 เฟลาที่หมุนร่วมแกนอยู่ในครอบกลวง

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของวัตถุภาพทรงกระบอกที่มีแกนร่วมกันดังในภาพที่ 5 และมีความเร็วเชิงมุม ω คงที่นั้น ความเค้นเฉือนบนผิวของวัตถุภาพทรงกระบอกชั้นในก็จะมีค่ามากกว่าความเค้นเฉือนบนผิวของวัตถุทรงกระบอกชั้นนอก ทั้งนี้เพราะวัตถุทรงกระบอกทั้งสองนั้นมีรัศมีแตกต่างกัน จึงทำให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

velocity gradient ไม่เท่ากันตลอดความหนาของช่องว่าง และถ้านำเอาแรงบิด Tr ที่ด้านทานการหมุนมา เทากับแรงบิด Td ที่ใช้ขับให้หมุนแล้ว ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ของ du/dy ที่รัศมี r_1 และ r_2 ได้ดังนี้

$$\text{แรงบิดด้านทานการหมุน, } Tr = \text{แรงบิดที่ใช้ขับให้หมุน, } Td$$

$$\tau_1 (2 \pi r_1) L (r_1) = \tau_2 (2 \pi r_2) L (r_2)$$

$$\mu \frac{[du]_1 r_1^2}{dy} = \mu \frac{[du]_2 r_2^2}{dy}$$

$$\frac{[du]_1}{dy} = \frac{[r_2]^2 [du]_2}{r_1 dy}$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า ถ้า $r_1 \rightarrow r_2$ หรือระยะห่าง $Y \rightarrow 0$ แล้วค่า

$$(du/dy)_1 = (du/dy)_2 = U/Y = \text{constant}$$

ดังนั้น ถ้าหากระยะห่างนั้นน้อยมาก ก็สามารถใช้ได้ว่าเส้น โพรไฟล์ของความเร็วแปรเป็นเส้นตรง

หน่วยของความหนืดสัมบูรณ์ μ เป็นหน่วยของแรงต่อพื้นที่ ทารด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ในระบบ S.I. นั้น ความหนืดสัมบูรณ์จะมีหน่วยเป็น :

$$\text{หน่วยของ } \mu = \frac{\text{หน่วยของ } \tau}{\text{หน่วยของ } du/dy} = \frac{N/m^2}{(m/s)/m} = \frac{Ns}{m^2} = Pa \cdot s$$

ส่วนในระบบ english gravitational (F.P.S) ความหนืด μ มีหน่วยเป็น $lb\text{-sec}/ft^2$, ระบบเมตริก มีหน่วยเป็น $gm/cm\text{-sec}$ หรือเรียกชื่อว่า poise ซึ่งเป็นชื่อที่ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่ Poiseuille ซึ่งเป็นผู้ที่ได้ศึกษาถึงความหนืดนี้อย่างจริงจัง

งานในด้านวิศวกรรมเป็นจำนวนมากที่มักจะต้องการค่าความหนืด μ นี้ด้วยความหนาแน่น V เราเรียกอัตราส่วนดังกล่าวนี้ว่า ความหนืดคิเนแมติก (kinematic viscosity) ดังนั้น :

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

หน่วยของความหนืดคิเนแมติก ในระบบ เอสไอ คือ m^2/s ในระบบอังกฤษจะเป็น ft^2/sec ส่วนในระบบเมตริกจะเป็น cm^2/sec ซึ่งมีชื่อเรียกว่า stoke ทั้งนี้เพื่อเป็นเกียรติแก่นาย G.G.Stokes แต่หน่วยที่นิยมใช้ในระบบเมตริกคือ centistoke (= 0.01 Stoke)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทลวงนวิชาหกรใช้งานเพอการศกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใชประยชนดานการคาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติสำหรับงานในด้านวิศวกรรมนั้นจะถือว่า ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลทุกชนิดไม่แปรตามความดัน และถึงแม้ว่าความดันนั้นจะสูงมากก็ตามความหนืดของมันก็ไม่แตกต่างจากค่าที่มีอยู่ในภาพที่ 1 มากมายนัก ส่วนความหนืดคินแมติกของแก๊สนั้นจะแปรไปตามความดัน ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นของแก๊สนั้นเปลี่ยนค่าไป

2.4 คินแมติกส์ของการไหล (Kinematics of fluid flow)

เมื่อกล่าวถึงการไหลของของไหลแล้วก็มักจะหมายถึงการไหลของของไหลในจินตนาการของไหลในจินตนาการเป็นของไหลที่ไม่มีมีความหนืด คุณสมบัติดังกล่าวนี้จะไม่มีอยู่ในของไหลจริง อย่างไรก็ตามข้อสมมุตินี้มีประโยชน์ต่องานทางด้านวิศวกรรมบางประเภท สำหรับการไหลของของไหลจริงนั้นจะมีผลกระทบจากความหนืดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ความหนืดที่วุ่นวายจะทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้นในระหว่างอนุภาคของของไหลเมื่ออนุภาคของของไหลนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน การไหลนั้นสามารถแบ่งออกตามประเภทของของไหลได้เป็น

- การไหลของไหลที่อัดตัวไม่ได้
- การไหลของของไหลที่อัดตัวได้

เนื่องจากของเหลวต่าง ๆ นั้นอัดตัวได้น้อยมาก ดังนั้นจึงถือว่าของเหลวทั้งหมดเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ และภายใต้สภาวะบางสภาวะนั้นสามารถถือได้ว่าการไหลของแก๊สเป็นการไหลของของไหลที่อัดตัวไม่ได้เช่นเดียวกัน เช่น ในกรณีที่แก๊สนั้นมีการเปลี่ยนแปลงความดันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั่วๆไปที่ปกติแล้วจะต้องคิดถึงผลกระทบจากการอัดตัวได้นั้นรวมเข้าไปด้วย นอกจากนี้ก็ยังสามารถแบ่งการไหลตามชนิดของของไหลได้อีกด้วย เช่น

- การไหลของของไหลจริง
- การไหลของของไหลในจินตนาการ

แบ่งลักษณะการไหลโดยการเปรียบเทียบกับเวลา ก็จะได้ :

- การไหลแบบ steady flow
- การไหลแบบ unsteady flow

และเมื่อแบ่งการไหลโดยพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลแล้ว ก็จะแบ่งการไหลได้เป็น

- การไหลแบบลามินาร์ (laminar flow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

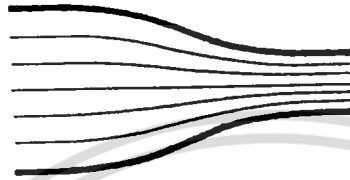
- การไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ (turbulent flow)
แบ่งการไหลโดยพิจารณาจากลักษณะการเคลื่อนที่ของลำน้ำ ก็จะได้
- การไหลแบบหมุน (rotational flow)
- การไหลแบบไม่หมุน (irrotational flow)
แบ่งการไหลตามความเร็วของลำน้ำจะได้
- การไหลแบบซูเปอร์คริติคัล (supercritical)
- การไหลแบบซับคริติคัล (subcritical)
แบ่งการไหลตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ (process) ก็ได้
- การไหลแบบรีเวอร์ซิเบิล (reversible)
- การไหลแบบเออร์วิเวอร์ซิเบิล (irreversible)
แบ่งการไหลโดยพิจารณาจากความสม่ำเสมอของการไหล ก็จะได้
- การไหลที่สม่ำเสมอ (uniform)
- การไหลที่ไม่สม่ำเสมอ (nonuniform) ฯลฯ

2.5 การไหลแบบลามินาร์และการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ (Laminar and Turbulent flow)

จะศึกษาเฉพาะความเร็ว ความเร่ง และการเคลื่อนที่ของของไหลในที่แตกต่างกัน โดยไม่พูดถึงเรื่อง
ของแรง ลักษณะการไหลสองแบบที่จะศึกษาในที่นี้ก็คือ การไหลแบบลามินาร์และการไหลแบบเทอร์
บิวเลนซ์ ออสบอร์น เรย์โนลด์ (osborne Reynolds) ได้สาธิตให้เห็นลักษณะการไหลทั้งสองแบบดัง
กล่าวในปี ค.ศ. 1883 โดยการฉีดสีเข้าไปที่ปากหลอดแก้วที่ต่อจากถังน้ำ ส่วนทางปลายหลอดแก้วก็มี
วาล์วสำหรับปรับความเร็วของน้ำในหลอดแก้ว จากการสาธิตของ ออสบอร์น เรย์โนลด์ ปรากฏว่า
เมื่อน้ำในหลอดแก้วมีความเร็วต่ำก็จะเห็นเส้นสีที่ฉีดเข้าไปนั้นไหลเป็นเส้นตรงตลอดความยาวของท่อ
ลักษณะการไหลดังกล่าวนี้แสดงว่าอนุภาคการไหลของน้ำเคลื่อนที่ขนานกันไปเป็นเส้นตรง แต่เมื่อ
ค่อยๆเพิ่มความเร็วโดยการเปิดวาล์วให้กว้างขึ้นแล้ว ก็ปรากฏว่าลักษณะการไหลของน้ำในท่อเปลี่ยน
แปลงไป ในตอนแรกนั้นขนาดของเส้นสีที่อยู่ในหลอดแก้วจะหนาขึ้น ต่อจากนั้นเส้นสีที่อยู่บริเวณ
ปากทางเข้าของหลอดแก้วก็จะแตกตัวปนเข้าไปในน้ำวนที่เกิดขึ้น ส่วนเส้นสีที่อยู่ถัดออกไปทางด้านใต้
น้ำก็จะกระจายตัวออกไปอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งมองไม่เห็นเส้นสี จากการสังเกตนี้แสดงว่าความเร็ว
ของอนุภาคต่างๆของของเหลวจากการไหลแบบหลังนี้เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทั้งขนาดและทิศทาง
ลักษณะการไหลจากการสาธิตแบบแรกของ ออสบอร์น เรย์โนลด์ นั้นมีชื่อเรียกว่า การไหลแบบลามิ
นาร์ (laminar flow) หรือการไหลแบบสตรีมไลน์ (streamline) หรือการไหลของของไหลที่มีความหนืด
สูง (viscosity flow) ลักษณะที่สำคัญของการไหลแบบนี้ก็คือ ของไหลในแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลื่อนตัวไปบนชั้นที่อยู่ถัดไป และอนุภาคของของไหลแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่ไปในเส้นทางที่แน่นอน และสามารถสังเกตเห็นได้ หรือเคลื่อนที่เป็นเส้นสตรีมไลน์ดังในภาพที่ 6 การไหลแบบนี้เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่มีความหนืดสูงหรือความหนืดของของไหลนั้นมีอิทธิพลมากกว่าคุณสมบัติอื่นๆ



ภาพที่ 6 การไหลแบบลามินาร์

ลักษณะการไหลแบบที่สองมีชื่อเรียกว่า การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ การไหลแบบนี้มีลักษณะดังภาพที่ 7 ในภาพ (ก) นั้นเป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบของกลุ่มอนุภาคของของไหล ส่วนภาพ (ข) แสดงให้เห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบ และมีเส้นทางการไหลที่ไม่แน่นอนของอนุภาคเพียงอนุภาคเดียวในช่วงเวลาการเคลื่อนที่ที่ยาวนานขึ้น ลักษณะที่สำคัญของการไหลแบบนี้ก็คือความไม่เป็นระเบียบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่าง ๆ นั้นเองถ้าหากการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์นี้มีคลื่นอยู่ด้วยแล้วคลื่นนั้นก็จะมีความถี่ไม่คงที่ และถ้าหากมีการไหลวน (eddy) เกิดขึ้นแล้วก็จะไม่เห็นลักษณะการไหลวนนั้น



(ก)

(ข)

ภาพที่ 7 การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์

การไหลวนขนาดใหญ่ การไหลหมุน (swirl) และการเคลื่อนที่ที่ผิดปกติของก้อนของไหลขนาดใหญ่ที่มีต้นตอที่ทำให้เกิดการไหลดังกล่าว ไม่ใช่สาเหตุที่จะทำให้เกิดการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์เลย อาจจะเรียกการไหลแบบบี้ว่าเป็นการไหลที่เกิดจากการถูกรบกวน (disturbed flow) ก็ได้ ในทาง

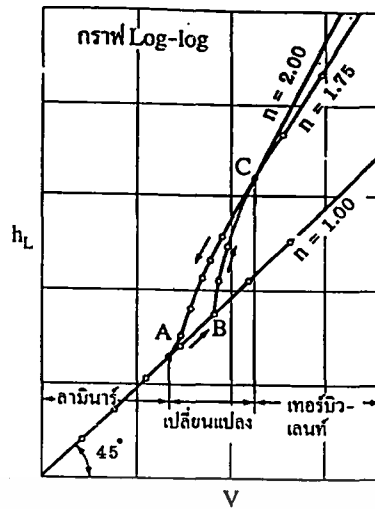
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงกันข้ามการไหลที่สงบเรียบและไม่มีต้นตอที่ทำให้เกิดการไหลแบบนั้น ก็อาจจะเป็นการไหลแบบเทอร์บิวเลนท์ที่ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป (fluctuation) นี้จะมีขนาดค่อนข้างเล็กและจะตรวจพบได้ก็ต่อเมื่อมีเครื่องมือพิเศษเท่านั้น

ตามตัวอย่างในภาพที่ 7 (ข) นั้น อนุภาคที่จุด O อาจจะไม่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว OD แต่ในกรณีที่มีการไหลเป็นแบบเทอร์บิวเลนท์นั้น OD จะเปลี่ยนทั้งขนาดและทิศทางอยู่ตลอดเวลา ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะเกิดขึ้นพร้อมๆกับการเปลี่ยนแปลงของความดัน และนี่ก็เป็นคำอธิบายว่าทำไมความดันของของไหลที่กำลังเคลื่อนที่จึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลที่มีการไหลแบบเทอร์บิวเลนท์นี้ จะมีสภาพที่ผิดปกติและมีเส้นทางการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน เส้นทางการเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคสองอนุภาคของของไหลที่มีการไหลเป็นแบบเทอร์บิวเลนท์นั้นไม่มีโอกาสที่จะเหมือนกันเลย ดังนั้นจึงไม่มีวิธีการที่ตายตัวทางด้านคณิตศาสตร์ที่จะใช้กับการไหลแบบเทอร์บิวเลนท์นี้ และจะต้องใช้วิธีการประเมินผลทางสถิติแทน

ถ้าวัดเสถียรภาพของความดันที่สูญเสียไป (head loss) ของท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอในช่วงความยาวที่กำหนดให้ เมื่อมีความเร็วแตกต่างกันแล้วก็จะเห็นได้ว่า ทรายโคที่ความเร็วของของไหลยังต่ำเพียงพอที่จะคงการไหลให้การไหลเป็นแบบลามินาร์แล้วเสถียรภาพของความดันที่สูญเสียไปก็เนื่องจากความเสียดทานก็จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของของไหลดังภาพที่ 8 แต่เมื่อเพิ่มความเร็วถึงจุด B ก็จะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลจะเปลี่ยนจากลามินาร์ไปเป็นเทอร์บิวเลนท์ ในช่วงนี้เสถียรภาพของความดันที่สูญเสียไปจะไม่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเร็วแต่จะเพิ่มในอัตราที่มากกว่าถ้าหากเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าลด (log) ของเสถียรภาพของความดันที่สูญเสียไปกับความเร็วลงบนกระดาษกราฟธรรมดาหรือนำเสถียรภาพของความดันที่สูญเสียไปมาเขียนบนกระดาษกราฟสเกลลอ (log) แล้วก็จะเห็นได้ว่าหลังจากเลขช่วงหัวเลี้ยวหัวต่อนี้ไปแล้ว เส้นกราฟที่เขียนได้จะมีค่าความลาดชันอยู่ในช่วง 1.75 - 2.00 จะเห็นได้จากกราฟในช่วงที่มีการไหลเป็นลามินาร์นั้นพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานจะแปรตามความเร็ว V ส่วนในช่วงเทอร์บิวเลนท์นั้นจะแปรตาม V^2 ค่า n นี้จะมีค่าตั้งแต่ 1.75 - 2.00 ท่อที่มีผิวเรียบและมีการไหลแบบเทอร์บิวเลนท์จะมีค่า $n = 1.75$ แต่เมื่อผิวหยาบค่า n นี้ก็จะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นตามความหยาบของผิวจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 2 ค่าต่างๆที่เขียนในภาพที่ 7.1 ในที่นี้ได้มาจากการวัดของออสบอร์น เรย์โนลด์ ในภาพแสดงให้เห็นเส้นกราฟที่อยู่ในช่วงหัวเลี้ยวหัวต่อซึ่งจะเห็นจากภาพว่าเมื่อค่อยๆลดความเร็วจากสูงมาต่ำแล้วเส้นกราฟจะไม่ลดลงตามเส้นทาง CB แต่จะลดลงตามเส้นทาง CA จุด B ในกราฟนั้นมีชื่อเรียกว่า จุดวิกฤตตัวค่ามากและเรียกจุด A ว่า จุดวิกฤตตัวน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 8 Head loss ของท่อที่มีขนาดสม่ำเสมอ เมื่อความเร็วแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม ตัวที่จะตัดสินว่าการไหลเป็นลามินาร์หรือเทอร์บิวเลนต์นั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วแต่เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ในที่นี้มีดิเรกเส้น L ที่สำคัญของที่กลมก็คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง D นั่นเอง ดังนั้น :

$$N_R = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

N_R นี้เป็นตัวเลขที่ไม่มีมิติ ไม่ว่าจะใช้หน่วยของระบบไหนก็ตาม

2.6 สมบัติทางรีโอโลยีของอาหารเหลว (Rheological Properties of Fluid Foods)

รีโอโลยีเป็นการศึกษาถึงการเสียภาพร่าง (deformation) และการไหลของวัตถุ พฤติกรรมทางรีโอโลยีหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (shear stress) กับกาเปลี่ยนแปลงทางภาพร่างที่เกิดขึ้น (shear strain) คุณสมบัติทางรีโอ โลยีเป็นตัวกำหนดความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ในระหว่างการเคลื่อนที่ (velocity profile) ของวัตถุนั้น ทำให้สามารถหาค่าความดันที่ลดลง (pressure drop) ในระหว่างการขนส่งทางท่อ ทำให้สามารถออกแบบท่อและขนาดของปั๊มที่ต้องการในระหว่างการขนส่งของไหล นอกจากนั้นยังทำให้สามารถประเมินขนาดกำลังงานที่ต้องการใช้ในการกวน การผสม และคำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นได้

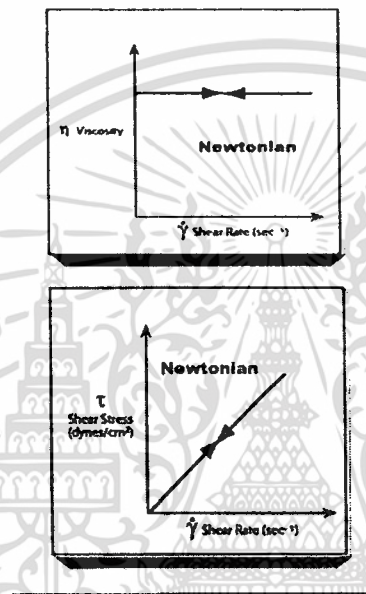
คุณสมบัติทางรีโอโลยียังมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทมวลสารและความร้อน ความสามารถในการตกตะกอนของสารในอาหารเหลว และความสามารถในการกวนผสม นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการบ่งบอกถึงขนาดและภาพร่างในระดับ โมเลกุลของอาหารเหลวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดพฤติกรรมทางรีโอโลยีของของเหลว

1. พฤติกรรมแบบนิวโตเนียน (Newtonian) คือของเหลวที่มีพฤติกรรมไหลเป็นไปตามกฎของนิวตันดังสมการ

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) โดยมีความหนืดเท่ากับค่าที่ได้ดังภาพ เป็นเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด และความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) ดังภาพที่ 9 ค่าความหนืดที่ได้จะคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน สารในกลุ่มนี้ได้แก่ น้ำ น้ำมัน น้ำผึ้ง สารละลาย เป็นต้น

เมื่อ τ คือค่า shear stress หรือแรงที่กระทำ

dv/dy คือค่า shear rate ($\dot{\gamma}$) หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งต่างๆ

μ คือค่า ความหนืด (viscosity or dynamic viscosity)

$$\text{Kinematic viscosity} = \mu / \rho$$

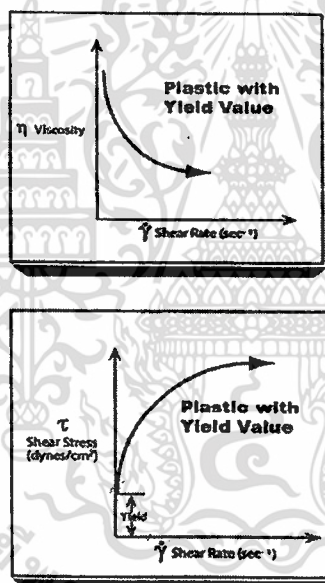
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว

2. พฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) อาหารเหลวส่วนใหญ่จะไม่มีพฤติกรรมแบบนิวโตเนียน กล่าวคือ ของเหลวมีค่าความหนืดขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) ไม่เป็นเส้นตรง หรือถ้าเป็นเส้นตรงก็ไม่ผ่านจุดกำเนิด ซึ่งจัดเป็นของเหลวแบบนอนนิวโตเนียน โดยแบ่งออกเป็นหลายชนิดได้แก่

2.1 บิงแฮมพลาสติก (Bingham plastics) ของเหลวชนิดนี้ต้องการค่าแรงเริ่มต้น (τ_0 , yield stress) จึงจะทำให้เกิดการไหล และหลังจากนั้นจะแสดงพฤติกรรมเหมือนของเหลวแบบนิวโตเนียน ได้แก่ พิวรี (puree) ของผักผลไม้ ยาสีฟัน ลิปสติก ซอสมะเขือเทศ เป็นต้น

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} + \tau_0$$



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์แบบบิงแฮมพลาสติก

2.2 ซูโดพลาสติก (Pseudoplastic or Shear thinning) เป็นของเหลวที่มีความหนืดลดลง เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เซียร์ทินนิง (Shear thinning) ของเหลวในกลุ่มนี้ได้แก่ สี ครีม แชมพู เป็นต้น เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) ไม่เป็นเส้นตรง ทำให้สมการความสัมพันธ์เขียนได้ดังนี้

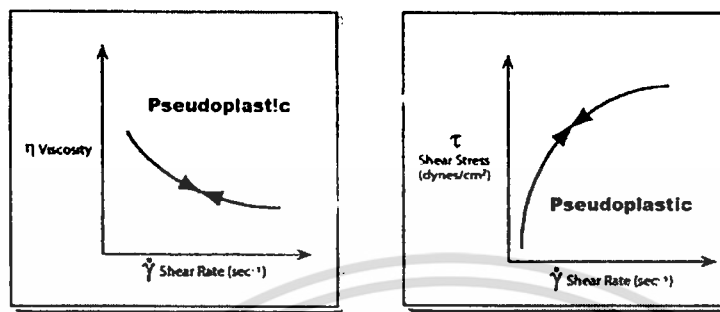
$$\tau = -m \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad \text{Power Law equation}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ m คือ consistency coefficient

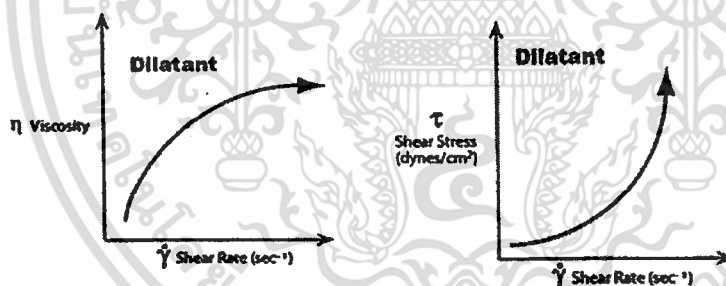
n คือ flow behavior index (dimensionless)

เมื่อ ค่า $n < 1$ จัดเป็นของเหลวแบบซูโดพลาสติก



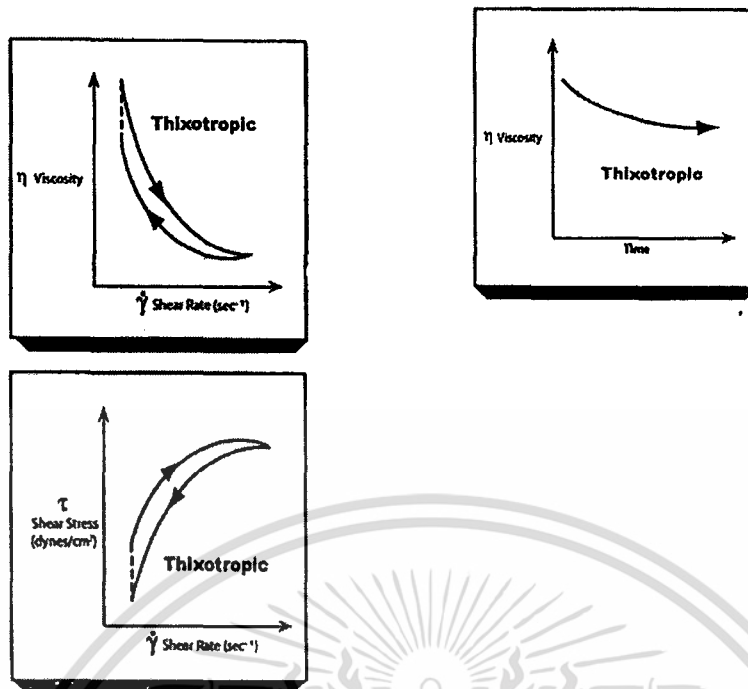
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์แบบซูโดพลาสติก

2.3 ไดลาแทน (Dilatant or Shear thickening) เป็นของไหลที่มีความหนืดสูงขึ้น เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เซียร์ทิกเคนนิง (Shear thickening) สารในกลุ่มนี้ได้แก่ แป้งข้าวโพดในน้ำ ลูกกวาด สารแขวนลอย เป็นต้น เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) ไม่เป็นเส้นตรง และค่า $n > 1$



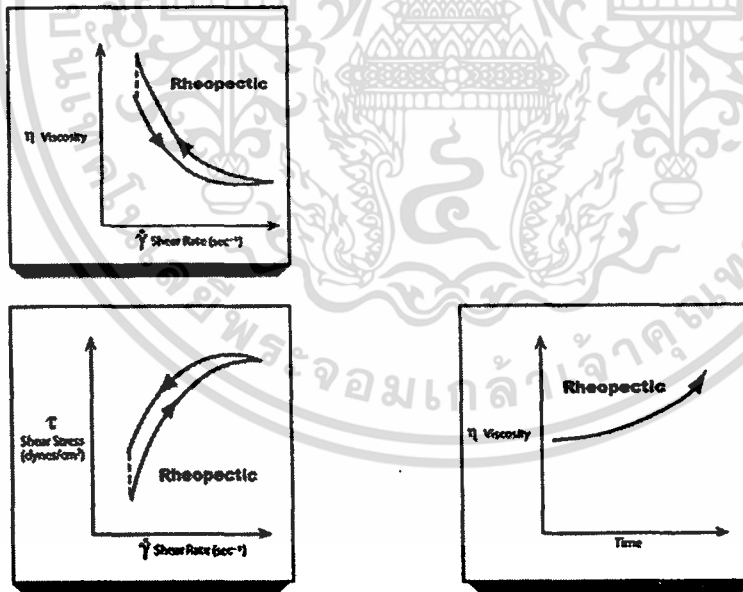
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์แบบไดลาแทน

2.4 ธิกโซโทรปี (Thixotropic) เป็นของเหลวที่มีความหนืดลดลง เมื่อเวลาผ่านไปโดยที่อัตราเฉือนคงที่ ดังแสดงในภาพ และหากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราเฉือนเพิ่มขึ้นต้องใช้แรงเฉือนที่กระทำต่อของไหลมากขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพ ค่าความหนืดที่ได้จะลดลง เนื่องจากอัตราแรงเฉือนต่ออัตราเฉือนมีค่าลดลง สารในกลุ่มนี้ได้แก่ น้ำปูน น้ำดิน เป็นต้น



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์แบบทิกโซโทรปี

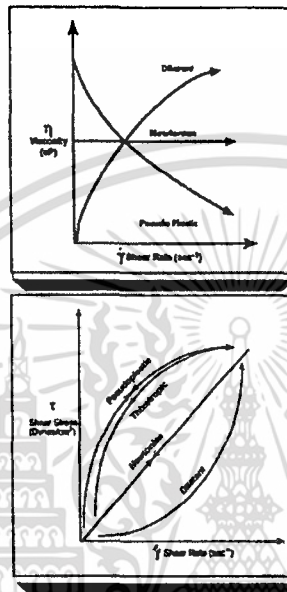
2.5 รีโอเปกซี (Rheopexy) เป็นของไหลที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยที่อัตราเฉือนคงที่ ดังแสดงในภาพ ของไหลในกลุ่มนี้จะมีอยู่น้อย ไม่พบบ่อยนัก



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์แบบรีโอเปกซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสัดส่วนระหว่าง แรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) ของของเหลวแบบนอนนิวโตเนียนจะเป็นค่าไม่คงที่ ดังนั้นค่าความหนืดจะไม่ได้มีเพียงค่าเดียวเหมือนของเหลวแบบนิวโตเนียนจึงให้ค่า apparent viscosity (μ_a) แทน สำหรับของเหลวแบบนอนนิวโตเนียนและการรายงานค่าความหนืดจะต้องระบุค่า แรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) ที่ใช้ในการทดลองด้วยเสมอ



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือน (shear stress) กับอัตราเฉือน (shear rate) ของของเหลวต่างชนิดกัน

2.7 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมคาร์ไหล

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่มีต่อพฤติกรรมทางรีโอโลยีของวัตถุ ผลของอุณหภูมิต่อความหนืดจึงจำเป็นต้องศึกษาเนื่องจากในกระบวนการแปรรูปอาหารนั้นกระทำที่อุณหภูมิต่างๆกันไป เช่น การพลาสเจอไรเซชัน กระบวนการเอกซ์ทรูชัน หรือหน่วยปฏิบัติการอื่นๆ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางรีโอโลยี จะใช้ความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius)

$$\mu = A \exp (-E/R.T)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ A คือค่าคงที่

E คือพลังงานกระตุ้นการไหล

R คือค่าคงที่ของแก๊ส

T ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์

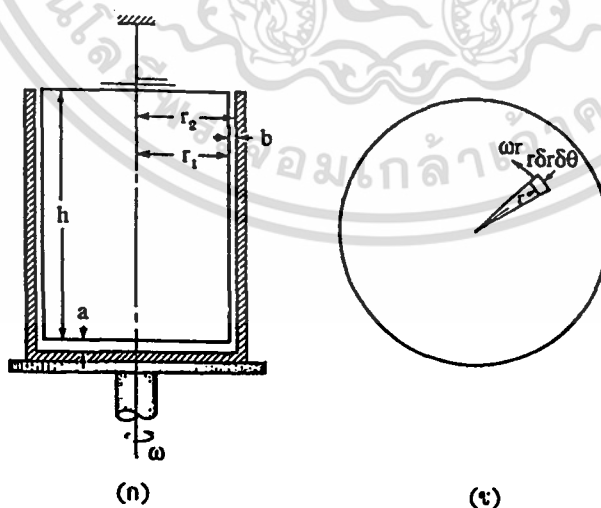
2.8 การวัดความหนืด (Measurement of viscosity)

ความหนืดนี้สามารถสามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องวัดความหนืด (viscometer) เครื่องวัดความหนืดนี้มีอยู่ด้วยกันหลายแบบแต่ทุกแบบจะต้องใช้การเงื่อนไขการไหลแบบลามินาร์ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการวัดความหนืดของของเหลวแต่เพียงอย่างเดียวน

เนื่องจากความหนืดของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นในขณะที่วัดความหนืดก็จะต้องควบคุมอุณหภูมิของของเหลวมีค่าคงที่ ซึ่งก็สามารทำได้โดยการแช่อุปกรณ์วัดความหนืดไว้ในภาชนะใส่ของเหลวที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

2.8.1 เครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน (rotational viscometer)

ประกอบด้วยภาชนะภาพทรงกระบอกสองชั้นที่มีแกนร่วมศูนย์กลางเดียวกัน และสามารถหมุนรอบแกนตัวเองได้ (ภาพที่ 16) ของเหลวที่ต้องการวัดความหนืดนั้นจะถูกนำมาใส่ไว้ในช่องว่างระหว่างภาชนะภาพทรงกระบอกทั้งสอง ความเร็วรอบและแรงบิดที่วัดได้สามารถนำไปใช้คำนวณหาความหนืดของของเหลวได้



ภาพที่ 16 เครื่องมือวัดความหนืดแบบหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 16 (ก) เป็นโครงร่างของเครื่องมือวัดความหนืดคิงกล่าว ถ้าหากความเร็วรอบ N ของภาชนะทรงกระบอกมีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm) , รัศมี (r_2) มีหน่วยเป็นเมตรแล้วความเร็วผิวของภาชนะทรงกระบอกอันนอกก็จะมีค่าเป็น $2 \pi r_2 N / 60$ และถ้าหากระยะทาง b มีหน่วยเป็น เมตร แล้วลักษณะการกระจายของความเร็วก็จะเป็น :

$$\frac{du}{dy} = \frac{2 \pi r_2 N}{60 b}$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ระยะทาง b มีค่าน้อยกว่ารัศมี r_2 มากๆเท่านั้น

สำหรับแรงบิด T_c ที่ใช้หมุนภาชนะทรงกระบอก สามารถวัดได้จากภาชนะทรงกระบอกอันในที่แขวนอยู่กับเส้นลวดที่มีสาทติดไว้สำหรับวัดแรงบิด แรงบิดบนสเกลนี้อ่านได้จากเข็มที่ยึดติดอยู่กับที่ ดังนั้นถ้าหากไม่คิดแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับก้นภาชนะแล้ว ความเค้นเฉือนก็จะมีค่าเป็น :

$$\tau = \frac{T_c}{2 \pi r_1^2 h}$$

เมื่อนำเอาไปแทนค่าในความสัมพันธ์ของ $\tau = \frac{\mu}{dy} du$ แล้วก็จะได้ค่าความหนืดเป็น :

$$\mu = \frac{15 T_c b}{\pi^2 r_1 r_2 h N}$$

แต่ถ้าหากระยะห่าง a ที่ก้นภาชนะทรงกระบอกมีค่าน้อยแล้ว ก็จะต้องคิดแรงบิดที่ต้องใช้ไปกับความเสียดทานที่ก้นภาชนะนั้นด้วย

จากภาพที่ 16 (ข) จะ ได้แรงบิดที่เกิดจากพื้นที่ δA ซึ่งเป็นพื้นที่เล็กๆเป็น :

$$\delta T = r(\tau \delta A) = r(\mu \omega r)(r dr d\theta)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน^aเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ห้องสมุดคณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง

เมื่อ : $\omega r =$ ความเร็วของพื้นที่ δA ที่กั้นภาชนะ

$$\omega = \frac{2 \pi N}{60}$$

เมื่ออินทิเกรตตลอดพื้นที่ของกั้นภาชนะแล้วก็จะได้แรงบิดเป็น :

$$T_d = \frac{\mu}{A} \frac{\pi N}{30} \int_0^{r_1} \int_0^{2\pi} r^3 dr d\theta = \frac{\mu \pi^2 N r_1^4}{60 a}$$

เมื่อนำแรงบิดที่กั้นภาชนะนี้ไปรวมกับแรงบิดที่ผิวด้านข้างแล้วให้เท่ากับแรงบิดในเส้นลวดแล้ว ก็จะได้สมการสำหรับหาความหนืด μ เป็น :

$$T = \frac{\mu \pi^2 N r_1^4}{60 a} + \frac{\mu \pi r_1 2 r_2^2 h N}{15 b}$$

$$= \frac{\mu \pi^2 N r_1^2}{15} \left[\frac{r_1^2}{4a} + \frac{r_2^2 h}{b} \right]$$

สมการข้างบนนี้จะให้ค่า μ ที่ถูกต้องได้ก็ต่อเมื่อการไหลในช่องว่างระหว่างภาชนะทรงกระบอกทั้งสองนั้นเป็นการไหลแบบลามินาร์

2.8.2 เครื่องมือวัดความหนืดแบบ (tube type viscometer) เครื่องมือวัดความหนืดแบบนี้ถือได้ว่าเป็นเครื่องวัดความหนืดที่ให้ผลถูกต้องมากที่สุด และเป็นแบบที่นิยมใช้กันในวงการอุตสาหกรรม ของเหลวที่ต้องการวัดความหนืดจะถูกนำมาใส่ในเครื่องมือนี้จนถึงระดับ M ของภาพที่ 17 (ก) จากนั้นก็จะเปิดวาล์วที่กั้นภาชนะเพื่อวัดอัตราการไหลของของเหลวที่ไหลผ่านท่อวัดเล็ก ๆ นั้น

เนื่องจากท่อวัดนี้มีขนาดเล็กมากดังนั้นลักษณะการไหลผ่านท่อก็จะเป็นการไหลแบบลามินาร์ ข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดนี้สามารถนำไปคำนวณหาความหนืดของของเหลวได้ ซึ่งมีภาพสมการเป็น :

$$Q = \frac{\pi D^4 \gamma h_L}{128 \mu L} \dots\dots\dots(2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ : h_L = ความสูงเฉลี่ยของของเหลวในระหว่างที่วัดอัตราการไหล

$$Q = V_L/t; V_L$$

เมื่อแทนค่า $Q = V_L/t$ ในสมการ (2.4) ก็จะได้ :

$$V = \frac{\pi D^4 h_L \cdot g t}{128 V_L L} \dots\dots\dots(2.5)$$

เนื่องจาก D, L, V_L และ h_L เป็นค่าคงที่ ดังนั้น :

$$V = K g t$$

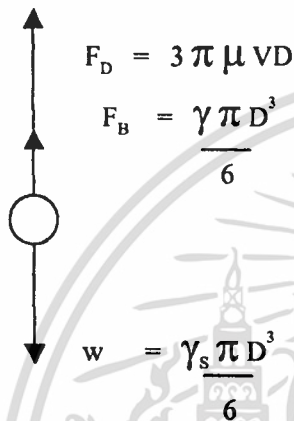
จะเห็นได้ว่าค่าความหนืดคินแมติกส์ V นี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลา ดังนั้นหากต้องการให้ V ที่คำนวณได้จากสมการ (2.5) นั้นถูกต้องจริงๆแล้วต้องใช้ท่อวัดที่มีขนาดยาวมาก ทั้งนี้เพื่อให้การไหลที่ผ่านท่อนั้นเป็นการไหลแบบลามินาร์จริงๆ แต่ถ้าหากท่อวัดสั้นจนเกินกว่าที่จะทำให้การไหลเป็นแบบลามินาร์แล้วก็จะต้องคูณด้วยตัวแก้ไข

เครื่องวัดความหนืดประเภท tube type นี้มีอยู่หลายแบบด้วยกัน เช่น

- แบบเรดวูด (Redwood) : เป็นแบบที่นิยมใช้กันในประเทศอังกฤษ
- แบบเซย์บอลต์ (Saybolt) : เป็นแบบที่นิยมใช้กันในประเทศอเมริกา
- แบบเอนเกลอร์ (Engler) : เป็นแบบที่นิยมใช้กันในประเทศเยอรมัน และประเทศอื่นในยุโรป

เครื่องมือวัดประเภท tube type viscometer นี้บางแบบจะมีท่อวัดเป็นชุดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน ดังนั้นก็จะมีช่วงวัดความหนืดที่กว้างกว่าและมีช่วงเวลาที่ใช้วัดเหมาะสมกว่า แต่เนื่องจากไม่สามารถที่จะทำท่อเล็กๆเหล่านี้ให้มีขนาดที่ถูกต้องได้จริงๆ ดังนั้นจึงต้องสอบเทียบท่อวัดเหล่านี้ โดยการเปรียบเทียบกับเวลาที่วัดได้จากของเหลวที่รู้ค่าความหนืดของเวลาที่กำหนดแน่นอนเสียก่อน

2.8.3 เครื่องมือวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งสเฟียร์ (falling sphere) วิธีวัดความหนืดแบบนี้จะนำเอาของเหลวที่ต้องการวัดความหนืดมาใส่ไว้ในท่อแก้ว จากนั้นก็นำเอาวัตถุทรงกลมที่รู้ขนาดและน้ำหนักมาปล่อยให้จมลงในของเหลวนั้น ถ้าหากวัตถุทรงกลมนี้มีขนาดเล็กเพียงพอแล้วก็จะสามารถหาแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมนั้นได้จาก กฎของสโตกส์ (Stoke Law) ซึ่งเป็นสมการที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล เมื่อสมมูลแรงต่างๆที่กระทำกับวัตถุทรงกลมดังกล่าวแล้วก็จะสามารถหาความหนืดได้



ภาพที่ 17 แผนภูมิของแรงที่กระทำกับวัตถุทรงกลมเมื่อความเร็วคงที่แล้ว

สำหรับแผนภูมิที่กระทำกับวัตถุทรงกลมดังกล่าวจะมีลักษณะดังภาพที่ 17 แรงต่างๆที่กระทำกับวัตถุทรงกลมนั้น ได้แก่ แรงดึงดูดของโลก (น้ำหนัก), แรงลอยตัว และแรงต้านการเคลื่อนที่

กฎของสโตกส์ (Stoke) มีใจความว่าเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าต่ำกว่า 1 แล้วแรงต้านจะมีค่า :

$$F_D = 3\pi\mu VD$$

เมื่อ : V = ความเร็วที่คงที่ของทรงกลม

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

เมื่อปล่อยวัตถุทรงกลมให้จมลงไปใของเหลวแล้ว มันก็จะถูกเร่งไปยังความเร็วที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่งอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในช่วงที่ความเร็วคงที่ดังกล่าวนี้แรงรวมที่กระทำกับวัตถุทรงกลมในแนวดิ่งจะมีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W - F_B - F_D = \frac{\gamma_s \pi D^3}{6} - \frac{\gamma \pi D^3}{6} - 3 \pi \mu V D = 0$$

เมื่อ : γ_s = น้ำหนักจำเพาะของวัตถุภาพทรงกลม
 γ = น้ำหนักจำเพาะของของเหลว

เมื่อรวมค่าต่างๆในสมการข้างบนแล้ว สมการก็จะเหลือเพียง

$$\mu = \frac{D^2(\gamma_s - \gamma)}{18 V} \dots\dots\dots(2.6)$$

การสร้างสมการที่ผ่านมานั้นได้สมมติว่าวัตถุภาพทรงกลมนั้น ถูกปล่อยลงไปของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัดที่โตมากและมีความลึกที่ลึกมาก แต่ในสภาพความเป็นจริงนั้นของเหลวจะถูกบรรจุอยู่ในท่อ ดังนั้นผนังของท่อก็จะมีผลกระทบต่อความเร็วของวัตถุภาพทรงกลมนั้น ผลกระทบดังกล่าวนี้ทำให้ความเร็วของวัตถุภาพทรงกลมในท่อกับในที่ที่มีพื้นที่หน้าตัดที่กว้างและลึกมากๆนั้นมีความสัมพันธ์ตามสมการ :

$$\frac{V}{V_t} = 1 + \frac{9D}{4D_t} + \frac{[9D]^2}{[4D_t]^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

เมื่อ : D_t = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ
 V_t = ความเร็วของวัตถุภาพทรงกลมภายในท่อ

สมการ (9.6) นี้ใช้ได้เฉพาะในกรณีที่ $D / D_t < 1/3$ เท่านั้น

2.9 เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิงบอล

เครื่องวัดความหนืดชนิดนี้ทำงานโดยใช้หลักการวัดเวลาที่ใช้ในการตกของลูกบอลผ่านของเหลวภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของโลก ลูกบอลที่ตกได้รับการศึกษาถึงความเร็วจำกัดเมื่อความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกถูกแทนที่ด้วยแรงเสียดทานของของเหลวบนลูกบอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สโตคส์ (1819 – 1903) เป็นหนึ่งในผู้ศึกษาความเร็วจำกัดของการตกของลูกบอลและสมการที่มีชื่อว่า “สมการของสโตคส์” เพื่อเป็นเกียรติแก่สโตคส์

$$\eta = (2/9 (\rho_s - \rho_f) g R^2) / V$$

เมื่อ η คือ ความหนืด

ρ_s คือ ความหนาแน่นของลูกบอลที่ตก

ρ_f คือ ความหนาแน่นของของเหลว

R คือ รัศมีของลูกบอลที่ตก

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

V คือ ความเร็วจำกัด

โดยเป็นเครื่องมืออย่างง่ายซึ่งใช้ประโยชน์สำหรับของเหลวแบบนิวโตเนียนแต่มีข้อจำกัดที่จะใช้กับของเหลวชนิดนอนนิวโตเนียน เครื่องมือชนิดนี้ไม่สามารถใช้กับของเหลวชนิดที่บดแสงเพราะไม่สามารถมองเห็นลูกบอลได้ กฎของสโตคส์สามารถใช้ได้เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ผ่านมากๆ เพื่อที่จะไม่ให้ผนังมีผลต่อการตกของลูกบอล เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งบอลสามารถปรับใช้ได้ง่ายๆในห้องทดลอง (ภาพที่ 18) เดิมของเหลวที่ต้องการทดสอบลงในภาชนะทรงกระบอกแก้วและหย่อนลูกบอลโลหะเบาๆตรงกลางของภาชนะทรงกระบอก กำหนดระยะทางสำหรับการตกของลูกบอลเพื่อศึกษาความเร็วจำกัด จับเวลาการตกของลูกบอลด้วยนาฬิกาจับเวลา ลูกบอลที่นำมาใช้เป็นลูกบอลที่นำมาจากตลับลูกปืน ลูกบอลที่มีขนาดใหญ่จะตกเร็วกว่าลูกบอลที่มีขนาดเล็กดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอลให้เล็กเพียงพอที่จะสามารถตรวจวัดด้วยนาฬิกาจับเวลาได้ ลูกบอลที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าจะตกได้ช้ากว่า มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ลูกบอลที่ทำจากวัสดุชนิดอื่น เช่น ลูกแก้วมีความหนาแน่นประมาณ 2.6 ลูกเหล็กมีความหนาแน่นประมาณ 7.8 ลูกแก้วจะตกได้ช้ากว่าลูกเหล็กเมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดเท่ากัน

เครื่องวัดความหนืด กิลมอนท์ เป็นเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งบอลซึ่งใช้ท่อในแนวตั้งที่มีขนาดใหญ่กว่าลูกแก้วหรือลูกเหล็กที่ใช้ในการทดลองเพียงเล็กน้อย ภายในของท่อถูก...เพื่อให้แน่ใจว่าลูกบอลยังคงอยู่ตรงกลาง กิลมอนท์ (1963) ใช้สมการ

$$\eta = K(\rho_f - \rho_s)t$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ η คือ ความหนืด

ρ_f คือ ความหนาแน่นของลูกบอล (2.53 สำหรับแก้ว และ 8.02 สำหรับลูกเหล็ก)

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว

t คือ เวลาที่ลูกบอลวิ่งผ่านระยะทางที่กำหนด

K คือ ค่าคงที่ของเครื่องมือ

$$K = \frac{8.80 D_f^2 \cdot R^{5/2} [2 + R]}{L \cdot 100}$$

เมื่อ D_f คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล

L คือ ระยะทางการตกของลูกบอลที่กำหนด

$$R = 100 (D_f - D_r) / D_r$$

เมื่อ D_r คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

ในภาคปฏิบัติ ค่า K สามารถทราบได้โดยการจับเวลาสำหรับของเหลวที่ทราบค่าความหนืดแล้วจัดภาพสมการได้ใหม่เป็น

$$K = \frac{\eta_s \cdot t}{\rho_f - \rho}$$

เมื่อ η_s คือ ความหนืดของของเหลวที่ทราบค่า

เครื่องวัดความหนืดของกิลมอนที่ใช้ตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร เหมาะสำหรับของเหลวชนิดนิวโตเนียนที่มีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 0.25 – 3.00 มิลลิ พาสคาล.วินาที (m P.s หรือ cP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

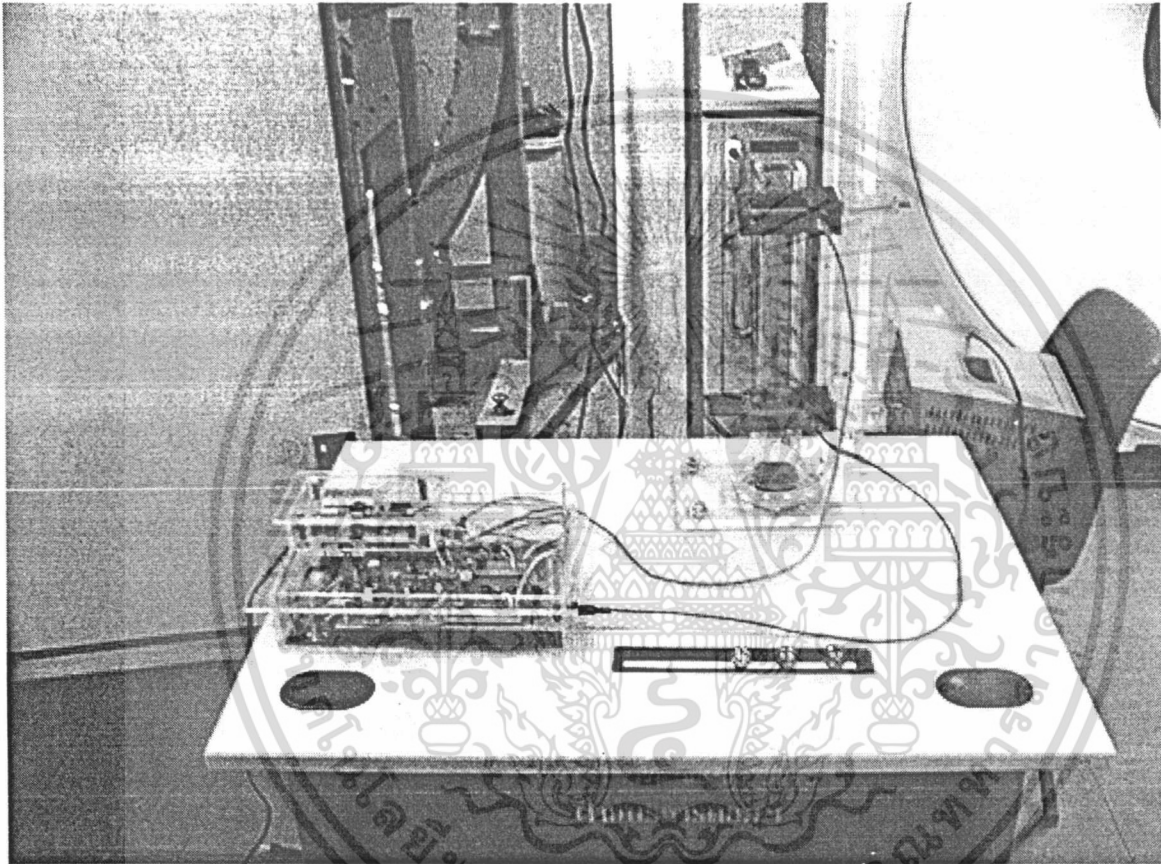


ภาพที่ 18 เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลต์ลิ่งบอลของสโตคส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 การสร้างและการทำงาน

ภาพแสดงเครื่องวัดความหนืดที่ประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็ก

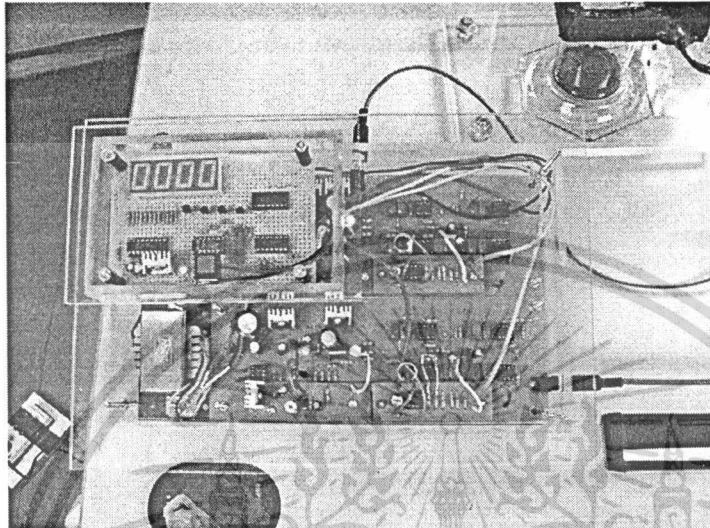


ภาพที่ 19 แสดงเครื่องวัดความหนืดที่ประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบเครื่องวัดความหนืดที่ประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็ก

1. เครื่องวัดความหนืดพร้อมนาฬิกาจับเวลาดิจิทัล หน่วย มิลลิวินาที (mS)



ภาพที่ 20 แสดงเครื่องวัดความหนืดพร้อมนาฬิกาจับเวลาดิจิทัล

2. ชุดขดลวดทองแดง 2 ชุด

ประกอบด้วยขดลวดทองแดงสายสี่ฟ้าและสี่แดง โดยสายสี่ฟ้าจะอยู่ด้านบนส่วนสายสีแดงจะอยู่ด้านล่างของฐานพลาสติกและจะต้องเสียบสายขดลวดให้ตรงกับช่องเสียบที่ตัวเครื่อง ดังภาพด้านบน

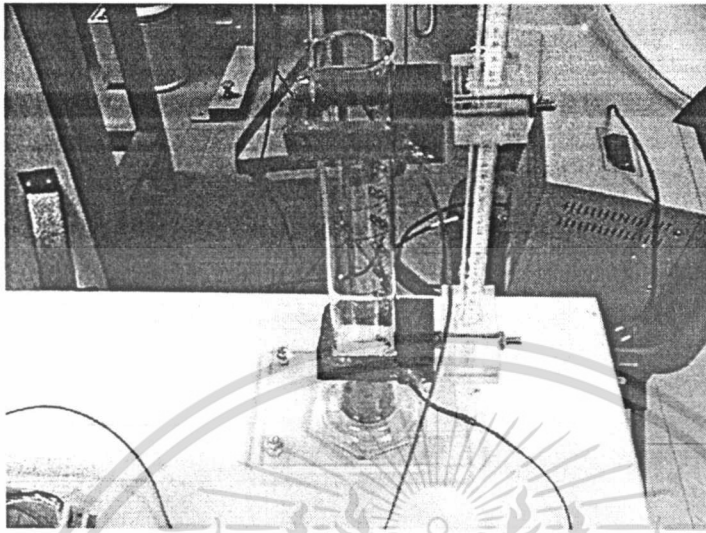


ขอบว้ระยะทางระหว่างขดลวด

ภาพที่ 21 แสดงชุดขดลวดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

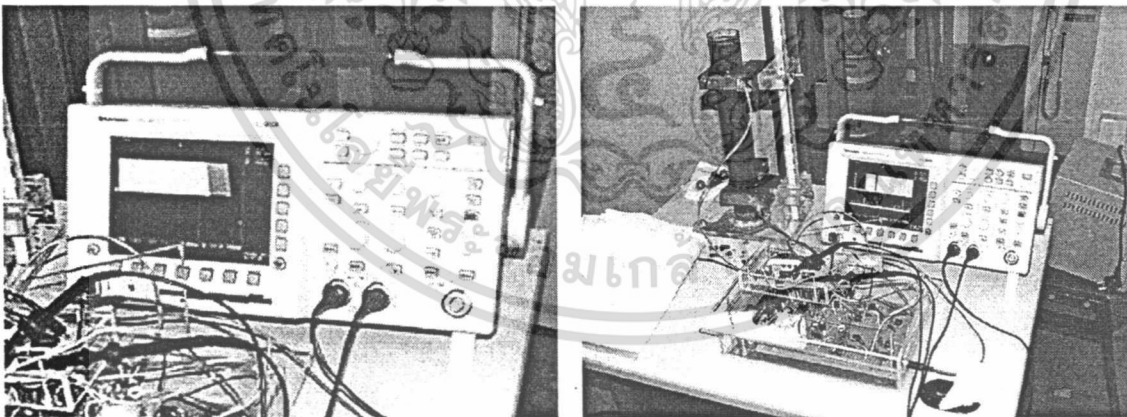
3. ครอบกวดวว ขนาด 500 มล.และฐานพลาสติก



ภาพที่ 22 แสดงครอบกวดวว ขนาด 500 มล.และฐานพลาสติก

4. เครื่องออสซิลโลสโคป

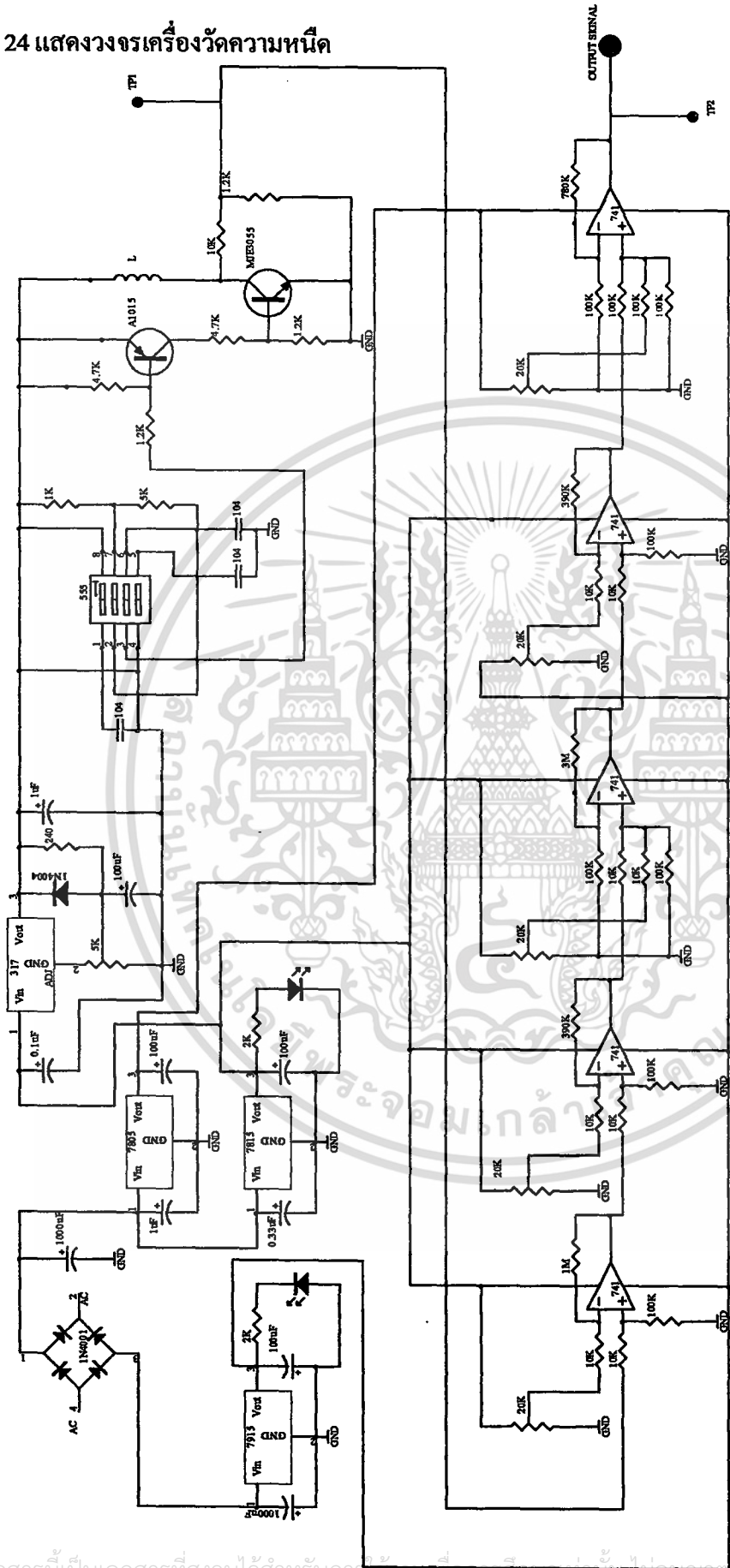
ใช้ประกอบในการทดลองในกรณีที่วงจรมีการเกิดสัญญาณที่ไม่สามารถจับเวลาของลูกเหล็กที่ตกผ่านของเหลวที่มีความหนืดน้อยได้ เช่น น้ำ



ภาพที่ 23 แสดงเครื่องออสซิลโลสโคปและการใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

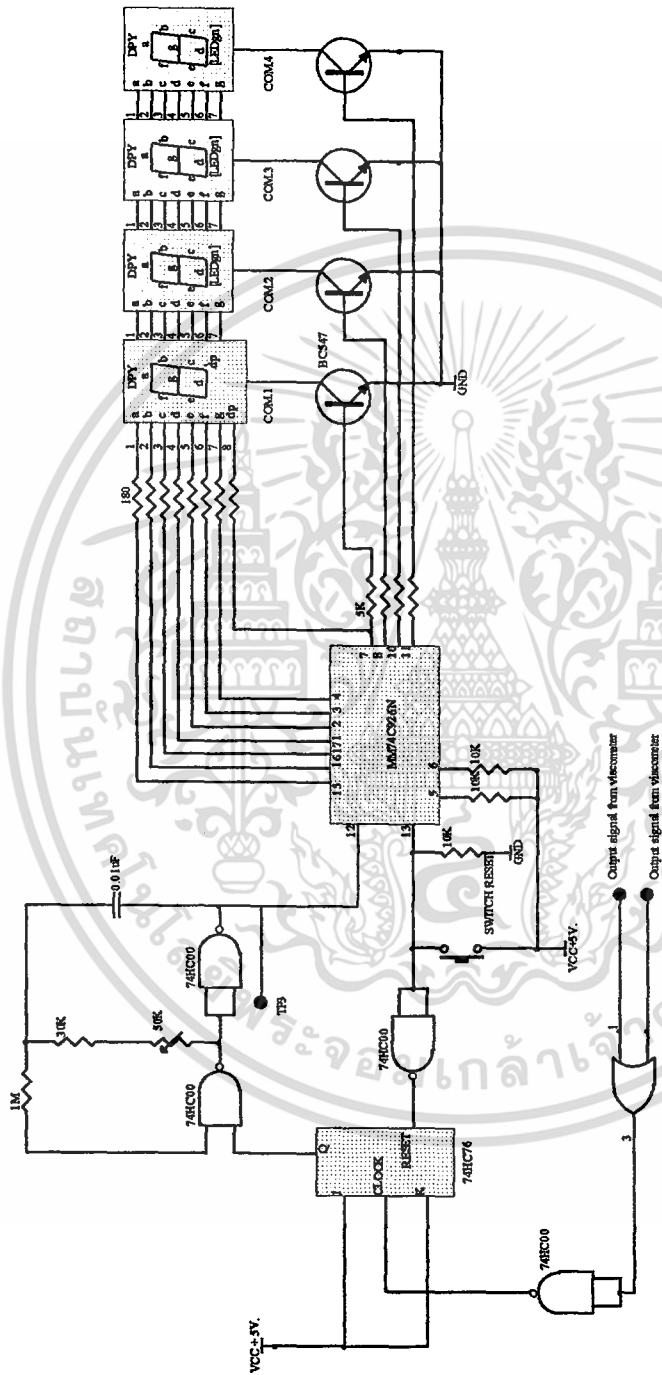
ภาพที่ 24 แสดงวงจรเครื่องวัดความหนืด



Title	Viscometer Project 2003
Size	B
Number	Revision
Drawn By	21 Aug 2003
Checked By	21 Aug 2003
Sheet of	6
File	C:\CIRCUIT\Viscometer1203

1 2 3 4 5 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 25 แสดงวงจรนาฬิกาจับเวลาดิจิทัล

Title		LED COUNTER	
Size	Number	Revision	
B			
DATE	21-Nov-00	Sheet of 6	
FILE	CORCORNA/CAL/DPR	DRAWING SUBJECT	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางาน

หลักการทํางานของเครื่อง จะประกอบด้วยวงจรหลักภาคต่างๆ 4 ภาค ได้แก่

1. ภาคออสซิลเลเตอร์
2. ภาคปริแอมป์
3. ภาคเอาต์พุทแอมป์ไฟเออร์
4. ภาคคอมพารเตเตอร์

วงจรการทํางานจะประกอบด้วยชุดวงจรที่เหมือนกัน จำนวน 2 ชุด เพื่อใช้เฉพาะกับขดลวดทองแดงแต่ละชุด ดังนั้นในการแสดงภาพวงจรจะแสดงเพียงชุดเดียว โดยมีการทำงานของวงจรดังนี้

ชุด 1N4001 ต่อแบบบริดจ์เรกติไฟร์แรงดันไฟสลับ 18 โวลต์ เป็นแรงดันไฟตรง 22 โวลต์ โดยการฟิลเตอร์ด้วย ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตไลต์ ขนาด 1000 μF เพื่อที่จะทำให้แรงดันเรียบ โดยแรงดันอินพุทบวก 22 โวลต์ ป้อนเข้าที่ขา 1 ของ ไอซี 7805 และ ไอซี 7815 เพื่อให้ได้เป็นแรงดัน เอาต์พุท 5 โวลต์และ 15 โวลต์ ตามลำดับ สำหรับเอาต์พุท 5 โวลต์ จะนำไปจ่ายให้กับไอซี 741 ตัวที่ 5 ในภาคคอมพารเตเตอร์ ส่วนเอาต์พุท 15 โวลต์ จะนำไปจ่ายให้กับ ไอซี 317 ซึ่งทำหน้าที่เป็นโวลต์เดจเรกูเรเตอร์ และไอซี741 ตัวที่ 1 ถึง 4 ในภาคคอมพารเตเตอร์ ส่วนแรงดันอินพุทลบ 22 โวลต์ ป้อนเข้าที่ขาอินพุทของ ไอซี 7915 เพื่อให้ได้แรงดันเป็นเอาต์พุทลบ 15 โวลต์ โดยจะนำไปจ่ายให้กับไอซี741 ทั้ง 5 ตัว ในภาคคอมพารเตเตอร์ต่อไป

ภาคออสซิลเลเตอร์ ประกอบด้วย ไอซีโทร์เมอร์ 555 R 1K, R 5K, C104 ทำการออสซิลเลทเป็นพัลส์คลื่นสี่เหลี่ยม พัลส์ลบ

ภาคปริแอมป์ ประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ A1015, R 1.2K, R 4.7K โดย R 1.2K เป็นไบอัสให้ A1015 ส่วนพัลส์คลื่นสี่เหลี่ยมจากภาคออสซิลเลเตอร์ จะเข้าขาเบสของ A1015 ที่เป็นแบบ PNP และเอาต์พุทออกที่ขาคอลเลคเตอร์ โดยมีเฟสตรงกันข้ามกับอินพุท 180 องศา คือเป็นพัลส์บวก ส่วนขาอิมิตเตอร์จะต่อเข้ากับแรงดันไฟตรงจากขาเอาต์พุทของ ไอซี 317 ในระดับแรงดันที่ปรับไว้เหมาะสม (ประมาณ 7 โวลต์)

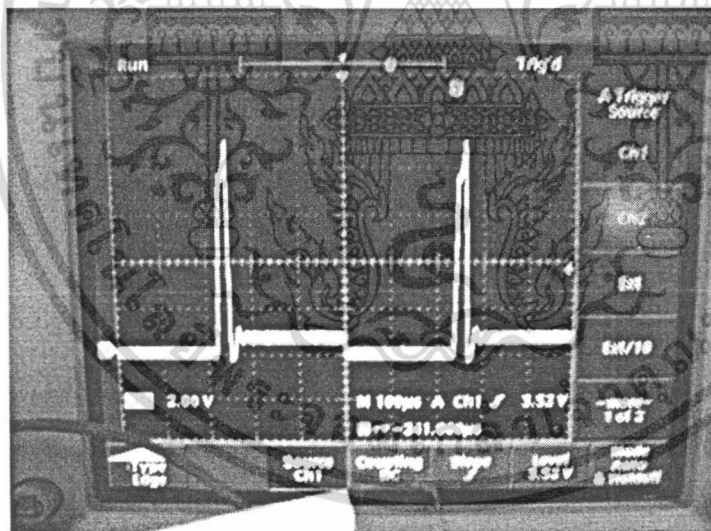
ภาคเอาต์พุทแอมป์ไฟเออร์ ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ MJE3055, R 4.7K, R 1.2K เมื่ออินพุทเป็นพัลส์บวกเข้ามาที่ขาเบสของ MJE3055 ทำให้ทรานซิสเตอร์นำกระแสจากแหล่งจ่าย ของไอซี 317 ที่มีแรงดันประมาณ 7 โวลต์ ผ่านขดลวด (L) ทำให้ขดลวดเกิดการเหนี่ยวนำแรงดันเป็นพัลส์บวกที่มีขนาดแรงดันสูงถึง 120 โวลต์ แต่จะทำการลดแรงดันให้เหลือประมาณ 9 โวลต์ ด้วยตัวต้านทาน 10 K ดังแสดง ณ จุด TP1 ภาพที่ 26

ภาคคอมพารเตเตอร์ จะทำหน้าที่ ขยายความแตกต่างของสัญญาณที่ส่งเข้ามา โดยประกอบด้วย ไอซี 741 ซึ่งเป็น ไอซีออปแอมป์ จำนวน 5 ชุด เรียงต่อกัน ในขณะที่ยังไม่มีลูกเหล็กผ่าน สัญญาณก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

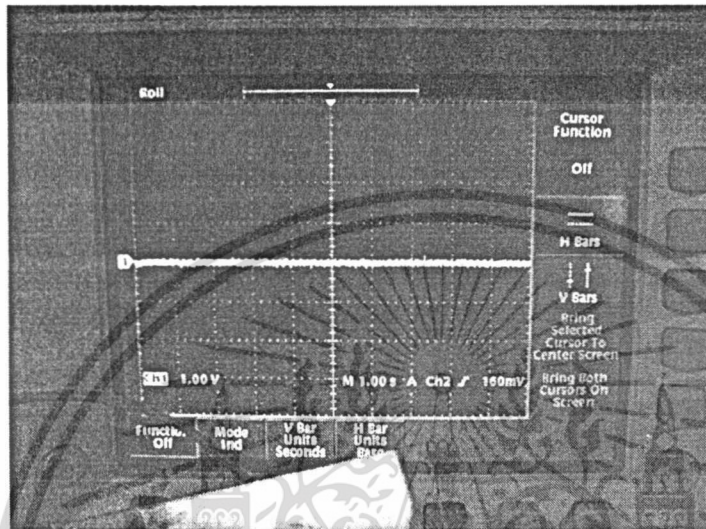
ภาคคอมพิวเตอร์ จะทำหน้าที่ ขยายความแตกต่างของสัญญาณที่ส่งเข้ามา โดยประกอบด้วย ไอซี 741 ซึ่งเป็น ไอซีออปแอมป์ จำนวน 5 ชุด เรียงต่อกัน ในขณะที่ยังไม่มีลูกเหล็กผ่าน สัญญาณก่อนเข้าสู่ภาคคอมพิวเตอร์จะแสดง ณ จุด TP1 ดังภาพที่ 26 เมื่อมีลูกเหล็กผ่าน สัญญาณจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ก็จะนำสัญญาณนี้ผ่านเข้าสู่ภาคคอมพิวเตอร์ เพื่อไปขยายความแตกต่าง เมื่อผ่านไอซี 741 ตัวที่ 5 ณ จุด TP2 ในขณะที่ไม่มีลูกเหล็กสัญญาณจะเป็นดังภาพที่ 27 เมื่อมีลูกเหล็กจะทำให้มีพัลส์เกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกส่งต่อไปยังวงจรมานาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล

วงจรมานาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล จะอาศัยการทำงานโดยการ อาศัยสัญญาณการเปลี่ยนแปลงจากวงจรถ่วงความหนืดข้างต้น โดยสัญญาณเอาต์พุตจะมี 2 ชุดคือจากขดลวดทองแดงชุดบน และขดลวดทองแดงชุดล่าง เมื่อลูกเหล็กผ่านขดลวดทองแดงชุดบน พัลส์ที่เกิดขึ้นก็จะเป็นสัญญาณที่ส่งไปกระตุ้นให้วงจรมานาฬิกาเริ่มนับเวลา เมื่อใช้ออสซิลโลสโคป จับการเปลี่ยนแปลง ณ จุด TP3 จะเป็นดังภาพที่ 29 คือขอบขาขึ้น จะเป็นสัญญาณที่ลูกเหล็กผ่านขดลวดชุดบน นาฬิกาจะเริ่มนับ เมื่อลูกเหล็กผ่านขดลวดชุดล่างสัญญาณที่เกิดขึ้นก็จะทำให้เกิดขอบขาลง ทำให้นาฬิกาหยุดเดิน ภาพสัญญาณที่ได้จึงเป็นลักษณะแท่งสี่เหลี่ยม

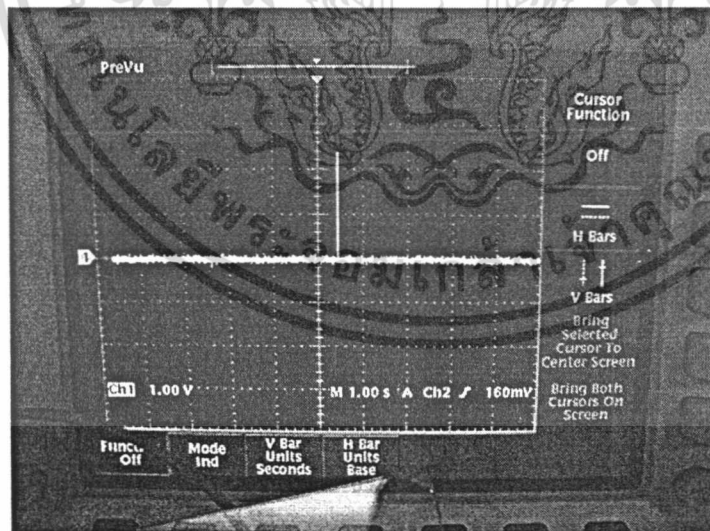


ภาพที่ 26 แสดงสัญญาณ ณ จุด TP1 ที่ $t = 100 \mu s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

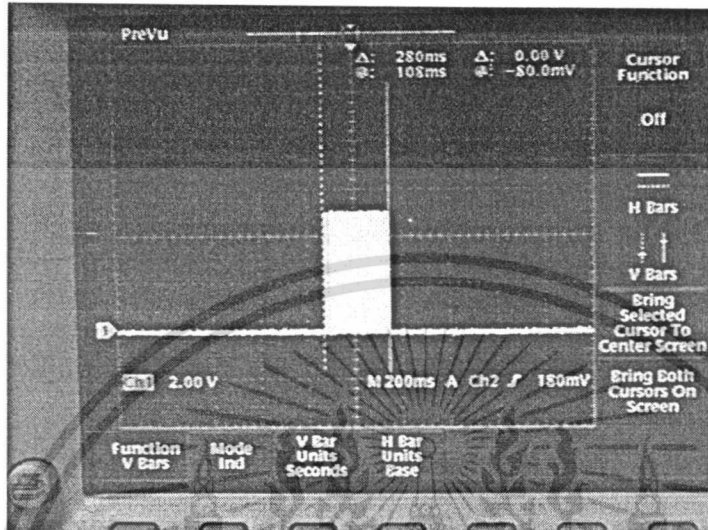


ภาพที่ 27 แสดงสัญญาณ ณ จุด TP 2 ในขณะที่ไม่มีลูกเหล็ก



ภาพที่ 28 แสดงสัญญาณ ณ จุด TP 2 ในขณะที่มีลูกเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 29 แสดงสัญญาณ ณ จุด TP3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลอง

เนื่องจากเครื่องวัดความหนืดที่นำตัวรับสัญญาณแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้ มีขีดความสามารถจำกัดในการจับระยะเวลาการเลื่อนที่ของลูกเหล็กในของเหลวที่มีความหนืดน้อย จึงได้นำเครื่อง ออสซิลโลสโคปมาใช้ร่วมในการทดลองเพื่อใช้เป็นเครื่องมือจับเวลาแทนนาฬิกาดิจิตอล

ชุดที่ 1: เป็นการทดลองหาค่าความหนืด โดยใช้เครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer รุ่น LV DVIII +

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer รุ่น LV DVIII +
บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
น้ำมันพืช

ชุดที่ 2: เป็นการทดลองหาค่าความหนืด โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลติงบอลในที่นี้ทำการจับเวลาสองแบบด้วยกัน ได้แก่ นาฬิกาดิจิตอล และออสซิลโลสโคป (ซึ่งมีความแม่นยำในการจับเวลามากกว่า) การทดลองแบ่งเป็นการใช้ออสซิลโลสโคป จับเวลาอย่างเดียว และการใช้ออสซิลโลสโคปจับเวลาเปรียบเทียบกับวงจรมานาฬิกาดิจิตอลของเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลติงบอล

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวัดความหนืดชนิดฟอลติงบอล
นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล
ออสซิลโลสโคป
ลูกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.25, 2.11, 1.88 เซนติเมตร
ขดลวดทองแดง 2 ขด
ขาตั้งพลาสติกสำหรับยึดขดลวดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบอกตวงแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร

แท่งแก้วคนสาร

น้ำมันพืช, น้ำ, น้ำเชื่อมที่ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์

วิธีการทดลอง

ชุดที่ 1

ใส่ตัวอย่างประมาณ 500 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร

เลือกเข็ม (spindle) ที่เหมาะสมและความเร็ว

ใส่เข็มเข้ากับเครื่องวัดความหนืด และจุ่มลงในบีกเกอร์

ปรับระดับเข็มให้จุ่มเข็มในตำแหน่งที่กำหนด

ใส่รหัสเข็มและความเร็วที่ต้องการ

เปลี่ยนความเร็วของการหมุนที่ค่าต่างๆกัน ประมาณ 4-5 ค่า

บันทึกค่า เปอร์เซ็นต์ทอร์ค (Torque %) รอบต่อนาที (rpm) และค่าความหนืด

ชุดที่ 2

ใส่ตัวอย่างประมาณ 500 มิลลิลิตร กระบอกตวงแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร

นำกระบอกตวงแก้วไปสวมขดลวด ขดลวดที่ 1 ห่างจากขดลวดที่ 2 เป็นระยะทาง

ไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร

เปิดสวิตช์เครื่องวัดความหนืดแบบฟอลติงบอล

ค่อยๆ หย่อนลูกเหล็กลงไปยังตรงกลางกระบอกตวง

เครื่องมือเริ่มจับและหยุดเวลา โดยกดปุ่ม Reset ทุกครั้งก่อนทำการทดลองครั้งต่อไป

นำเวลาที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเร็ว

นำค่าความเร็วไปแทนค่าในสมการของสโตคส์

ค่าความหนาแน่นของลูกเหล็ก คือ 8329.18 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ค่าความหนาแน่นของน้ำมันพืช คือ 871.54 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก คือ 9.81 เมตร / วินาที²

รัศมีของลูกเหล็ก

2.1 1.125 เซนติเมตร

2.2 1.055 เซนติเมตร

2.3 0.940 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ

อุณหภูมิ		ความหนาแน่น	ความหนืดสัมบูรณ์	ความหนืดคิเนแมติกส์
t	T	ρ	μ	ν
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{K}$	kg/m^3	$\times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
0	273.15	999.9	1793.636	1.789
5	278.15	1000.0	1534.741	1.535
10	283.15	999.7	1296.439	1.300
15	288.15	999.1	1135.610	1.146
20	293.15	998.1	993.414	1.006
25	298.15	997.1	880.637	0.884
30	303.15	995.7	79.808	0.805
35	308.15	994.1	65.026	0.725
40	313.15	992.2	605.070	0.658
45	318.15	990.2	555.056	0.611
50	323.1	988.1	509.946	0.556
55	328.15	985.7	471.650	0.517
60	333.15	983.2	435.415	0.478
65	338.15	980.6	404.034	0.444
70	343.15	977.8	376.575	0.415
75	348.15	974.9	352.059	0.366
80	353.15	971.8	328.523	0.364
85	358.15	968.7	308.909	0.339
90	365.15	965.3	292.238	0.326
95	368.15	961.9	277.528	0.310
100	373.15	958.4	254.973	0.294

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดลอง

ผลการทดลองชุดที่ 1

ตัวอย่าง: น้ำมันพืช

อุณหภูมิ: 26.5 องศาเซลเซียส

เข็มหมายเลข 1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองชุดที่ 1

จำนวนรอบต่อนาที (RPM)	ค่าเปอร์เซ็นต์ทอร์ก (Torque %)	ค่าความหนืด (Viscosity , มิลลิ พาสคาล . วินาที)
90	80.2	53.7
92	82.3	53.6
94	83.6	53.5
96	85.5	53.4
98	87.7	53.4
100	89.2	53.4
102	90.5	53.4
104	92.0	53.2

ผลการทดลองชุดที่ 2

ตัวอย่าง: น้ำมันพืช, น้ำ, น้ำเชื่อมที่ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์

อุณหภูมิ: 26.5 องศาเซลเซียส

$$\text{คำนวณค่า } V = S/t \quad (\text{เมตร/วินาที})$$

$$\eta = (2/9 (\rho_s - \rho_l) g R^2) / V \quad (\text{พาสคาล . วินาที})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองชุดที่ 2 (การทดลอง โดยใช้ออสซิลอสโคปในการจับเวลา)

ที่ระยะทาง 24.6 เซนติเมตร

5.2.1 รัศมีของลูกเหล็ก 1.125 เซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _{ที่} (พาสคาล.วินาที)
200	1.644688
160	1.315751
192	1.578901

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _{น้ำมันพืช} (พาสคาล. วินาที)
264	2.208
288	2.408
296	2.476

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _{น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์} (พาสคาล. วินาที)
584	4.579398
624	4.893055
600	4.704861

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 รัศมีของลูกเหล็ก 1.055 เซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _ร (พาสคาล. วินาที)
208	1.504239
216	1.562094
192	1.388528

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _{น้ำมันพืช} (พาสคาล. วินาที)
328	2.412690
344	2.530382
328	2.412690

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _{น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์} (พาสคาล. วินาที)
688	4.744428
696	4.772012
640	4.413421

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 รัศมีของลูกเหล็ก 0.94 เซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _ร (พาสคาล. วินาที)
ตรวจจับได้ยาก	-

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _{น้ำมันพืช} (พาสคาล. วินาที)
408	2.382531613
416	2.429247919
424	2.535789623

เวลาที่ใช้ในการตกของลูกเหล็ก (มิลลิ วินาที)	η _{น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 60 เปอร์เซนต์} (พาสคาล. วินาที)
944	5.167949
1002	5.485471
1001	5.479997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองโดยใช้ออสซิลอสโคปจับเวลาเปรียบเทียบกับวงจรมานาฬิกาดิจิตอลของเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลดิงบอล

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความหนืดของน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 % ระหว่างการจับเวลาโดยใช้ออสซิลอสโคป กับนาฬิกาดิจิตอล ที่ระยะทาง 24.6 เซนติเมตร

รัศมีลูกเหล็ก (เซนติเมตร)	อุปกรณ์จับเวลา	ระยะเวลา (วินาที)				ค่าความหนืดเฉลี่ย (พาสคาล. วินาที)	เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่าง
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย		
1.125	ออสซิลอสโคป	0.584	0.624	0.600	0.603	4.725	18.63
	วงจรมานาฬิกา	0.744	0.736	0.744	0.741	5.807	
1.055	ออสซิลอสโคป	0.704	0.736	0.744	0.728	5.017	10.79
	วงจรมานาฬิกา	0.846	0.793	0.809	0.816	5.624	
0.940	ออสซิลอสโคป	0.944	1.002	1.001	0.982	5.373	33.29
	วงจรมานาฬิกา	1.38	1.255	1.293	1.309	7.162	

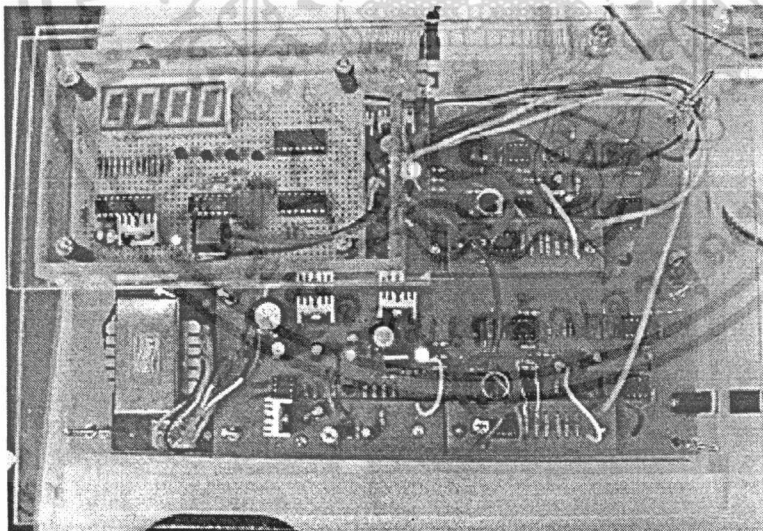
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาที่พบ

1. จะต้องเปิดเครื่องทิ้งไว้ ประมาณ 15 นาที จึงจะสามารถทำการทดลองได้
2. ในระหว่างการทดลองอาจจะต้องมีการปรับแต่งวงจรบ่อยครั้ง
3. จะตรวจจับสัญญาณในของเหลวที่มีความหนืดน้อยได้ยาก เช่น น้ำ
4. ระยะห่างระหว่างขดลวดไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร ทำให้เหลือระยะหย่อนลูกเหล็กน้อย จึงควรใช้กระบอกตวงที่มีความยาวมากกว่านี้
5. พื้นที่หน้าตัดของภาชนะที่ใช้ควรมีความกว้างเพื่อลดแรงเสียดทาน

การปรับแต่งวงจร

ในกรณีที่มีการเปิดเครื่องทิ้งไว้ 15 นาที เมื่อกดปุ่ม Reset แล้วนาฬิกาดิจิตอลยังทำงาน (ไม่หยุดที่เลข 0000) แสดงว่าวงจรเครื่องวัดความหนืดเกิดความคลาดเคลื่อนจะต้องทำการปรับตั้งเครื่องใหม่ โดยจะปรับเฉพาะ ตัวต้านทานปรับค่า ขนาด 20 K ที่ตั้งอยู่ตรงกับรูที่เจาะไว้บนเครื่อง (ตัวทางขวา มีข้อความ แสดง 203)



ภาพที่ 30 แสดงจุดที่จะทำการปรับแต่งเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับแต่งทำโดย

1. ใช้ไขควงปรับตัวด้านทานทั้งสองตัว ทิศตามเข็มนาฬิกา ประมาณ 1-2 รอบเพื่อให้สัญญาณที่จุด TP2 ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีลูกเหล็กผ่านทั้ง ขดลวดทองแดง ทั้ง 2 ชุด ในขณะที่เมื่อกดปุ่ม Reset นาฬิกาจะแสดงหน้าปัดเป็น ตัวเลข
2. ทำการปรับตั้งทีละชุด โดยทดสอบกับขดลวดชุดบน(สายสีฟ้า)ก่อน คือนำลูกเหล็กหย่อนผ่านขดลวดขึ้นและลงสลับกัน พร้อมกับปรับตัวด้านทาน (ตรงกับวงกลมสีแดงด้านบน ซึ่งเป็นวงจรของขดลวดชุดบน) ทิศทวนเข็มนาฬิกาทีละน้อยจนกว่านาฬิกาดิจิตอลจะเริ่มเดิน หลังจากนั้นทำการหย่อนลูกเหล็กขึ้นและลงและดูความเสถียรอีกครั้ง
3. เมื่อปรับวงจรให้เหมาะกับขดลวดชุดบนเรียบร้อยแล้วต่อไปทำการปรับให้เหมาะกับขดลวดชุดล่าง (สายสีแดง) ทำการปรับเช่นเดียวกับข้อที่ 2 เพียงแต่เปลี่ยนตัวด้านทานเป็นตัวที่ตรงกับชุดล่าง (วงกลมสีแดงด้านล่าง) เมื่อปรับเรียบร้อยแล้วให้ทำการทดลองกับขดลวดทั้ง 2 ชุด โดย เมื่อกดปุ่ม Reset นาฬิกาจะแสดงผลเป็น 0000 หลังจากนั้นให้หย่อนลูกเหล็ก ผ่านขดลวดชุดบน นาฬิกาจะเริ่มเดิน และเมื่อลูกเหล็กผ่านขดลวดชุดล่าง นาฬิกาก็จะหยุด เมื่อ ได้ผลที่เสถียรก็สามารถทำการทดลองได้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองนำตัวรับสัญญาณแม่เหล็กมาประยุกต์ในเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งบอล ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องในการที่สามารถจับเวลาของของเหลวที่ขุ่นได้ แต่จากการทดลองยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ประการแรกคือเหมาะสมที่จะใช้ในการวัดของเหลวชนิดนิวโตเนียนที่มีความหนืดมาก เนื่องจากของเหลวที่มีความหนืดน้อย เช่น น้ำ หรือน้ำมันพืช โอกาสที่จะจับเวลาได้มีน้อยมากเนื่องจากถูกเหล็กเคลื่อนที่เร็วเกินกว่าตัวรับสัญญาณแม่เหล็กจะตรวจวัดได้ ส่วนในน้ำเชื่อมเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ เครื่องมือสามารถที่จะจับเวลาได้แต่ก็ต้องมีการปรับแต่งเครื่องบ่อยครั้ง ประการที่สองระยะห่างระหว่างขดลวดตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ไม่ควรมีน้อยกว่า 20 เซนติเมตร เนื่องจากจะทำให้สนามแม่เหล็กจากขดลวดเกิดการรบกวนกันขึ้น จากการทดลองวัดค่าความหนืด จะได้ว่าน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ มีความหนืดมากกว่าน้ำมันพืชและเวลาในการเคลื่อนมากกว่าของเหลว และการใช้ลูกเหล็กที่มีขนาดเล็กจะใช้ระยะเวลาการเคลื่อนที่ที่มากกว่าลูกเหล็กที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ตัวรับสัญญาณแม่เหล็กในเครื่องวัดความหนืดแบบฟอลลิ่งบอลนี้จึงเหมาะกับของเหลวชนิดนิวโตเนียนที่มีความหนืดมาก และสามารถใช้กับของเหลวที่มีลักษณะขุ่นได้

เอกสารอ้างอิง

- กฤษดา วิสวธีรานนท์. เรียน/เล่น/ใช้ ไอซีดีจิตอล. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2537.
- บริษัท ไชแอนทีฟิค โปรโมชัน จำกัด. Viscosity measurement. กรุงเทพฯ: 1759 ซอยวชิรธรรม
สาริต 57 ถนนสุขุมวิท 101/1 แขวงบางจาก เขตพระโขนง กรุงเทพฯ 10260.
- รุจิรา ตาปราบ และ พอใจ ถามาตร, สนธิสุข ชีระชัยชยดี. 2545. บทปฏิบัติการวิศวกรรมแปรรูปอาหาร 1. 1. กรุงเทพฯ: โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร.
- สุนันท์ ศรีนนิศย์. 2544. กลศาสตร์ของไหล. 3. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น).
- สมภพ วรพันธุ์ และ สามารถ เขียรไทย. 2532. เครื่องตรวจจับโลหะ. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเทคนิค
อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Bourne, Malcolm C. 2000. Food texture and viscosity: concept and measurement. 2. San
diego: Academic press, c2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้จัดทำ

นายสุรศักดิ์ ว่องธีรกิจโกศล เกิด 28 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524

ที่อยู่ 3 หมู่ 5 ตำบลบ่อตรุ อำเภอระโนด จังหวัดสงขลา 90140 จบชั้นประถมจากโรงเรียนวัดเจดีย์งาม จบชั้นมัธยมจากโรงเรียนมหาวชิราวุธ จังหวัดสงขลา ปริญญาตรีศึกษาใน โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542-2546

กิจกรรม สมาชิกสภานักศึกษาฝ่ายพิจารณางบประมาณ ปีการศึกษา 2545

นายกสโมสรนักศึกษาโครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร ปีการศึกษา 2546

นางสาวอภิญญา ผลทิพย์ เกิด 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2525

ที่อยู่ 76/2 หมู่ 5 ตำบลหมากแข้ง ซอยพรหมประกาย ถนนศรีชมชื่น อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000 จบชั้นประถมจากโรงเรียนเทศบาล ๑ โพนศรี จบชั้นมัธยมจากโรงเรียนสตรีราชินูทิศ จังหวัดอุดรธานี ปริญญาตรีศึกษาใน โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542-2546

กิจกรรม นักกีฬาบาสเกตบอลโครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร