



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้หลักการคาปิลลารีในการหา DRC ของน้ำยางสด
Application of Capillary in DRC Determination of Natural Rubber Latex

โดย นายภาณุ ด่านวานิชกุล และคณะ

เมษายน พ.ศ. 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้หลักการคาปิลลารีในการหา DRC ของน้ำยางสด
Application of Capillary in DRC Determination of Natural Rubber Latex

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|------------------------------|---|
| 1. นายภาณุ ดำนวนิชกุล | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 2. นายราชธรรม วิวัฒน์ธนศิษฐ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. นายไพฑูรย์ เลิศสุรศักดิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 4. นาย ปฎิยุทธ์ ปันทะ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การใช้หลักการคาปิลลารีในการหา DRC ของน้ำยางสด
(ภาษาอังกฤษ) Application of Capillary in DRC Determination of Natural Rubber Latex

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่

ชื่อ-สกุล	รศ. ดร. ภาณุ ด่านวานิชกุล
หน่วยงาน	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ที่อยู่	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120
โทรศัพท์/ โทรสาร	02-5643001-9 ext. 3123 FAX. Ext. 3123
E-mail	dpanu@engr.tu.ac.th

นักศึกษา/ผู้ร่วมทำวิจัย

ชื่อ-สกุล	นายราชธรรม วิวัฒน์ธนศิษฐ์
ชื่อ-สกุล	นายไพฑูรย์ เลิศสุรศักดิ์
ชื่อ-สกุล	นายปฏิยุทธ์ ปันทะ

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม 2552 ถึงวันที่ 15 เมษายน 2553

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ในปัจจุบันวิธีมาตรฐานในการหาค่าปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content หรือ DRC) และ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content หรือ TSC) อ้างอิงจากมาตรฐาน ISO 126:2005 Natural Rubber Latex Concentrate – Determination of dry rubber content และ ISO 124:2008 Latex-Rubber – Determination of solids content ตามลำดับซึ่งต้องใช้เวลาในการทดสอบนาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการหาค่าปริมาณเนื้อยางแห้ง โดยพิจารณาจากค่าความหนืดของน้ำยาง

ความหนืดเป็นสมบัติที่ต้านการไหลของของไหล ซึ่งขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ขนาดของโมเลกุลของของไหล ขนาดและปริมาณของตัวถูกละลาย ขนาดและปริมาณของอนุภาคที่แขวนลอยสำหรับสารแขวนลอย รวมถึงแรงกระทำระหว่างโมเลกุลเช่น แรงผลักรหรือแรงดึงดูด งานวิจัยนี้จึงต้องการนำหลักการของการหาค่าความหนืดด้วยวิธีง่าย ๆ อย่างเช่น การไหลในคาปิลลารี เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบอกปริมาณของเนื้อยางในน้ำยาง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการหาความหนืดของน้ำยาง ทั้งชนิดยางข้น และน้ำยางสด ด้วยวิธีคาปิลลารี
2. เปรียบเทียบวิธีการหาความหนืด กับการหาค่า DRC ด้วยวิธีมาตรฐาน

ผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้เบื้องต้นนี้ใช้หลักการหาค่าความหนืดของของไหลโดยใช้คาปิลลารีในแนวนอน ต่อกับท่อในแนวตั้งซึ่งส่งผลต่อการปรับค่าความดันก่อนเข้าท่อคาปิลลารี เมื่อทำการทดสอบพบว่าจากพฤติกรรมการไหลของน้ำยางสดและน้ำยางสดที่เจือจางพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและ DRC ในลักษณะ exponential ซึ่งจากงานวิจัยในการทำวารสารปริทัศน์พบว่า หากสารแขวนลอยมีความเข้มข้นมากจะเกิดผลเนื่องจากแรงกระทำของอนุภาคด้วยกันเอง และอาจเกิดผลจากการไหลเบียดกันทำให้รูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนไปจากทรงกลม ซึ่งเป็นรูปร่างที่สมมติตามทฤษฎีไปอย่างมาก ทำให้สมการอธิบายได้คลาดเคลื่อน นอกจากนี้หากน้ำยางข้นเกินไป การไหลผ่านคาปิลลารีจะทำให้เกิดเนื้อยางติดที่ข้างหลอดส่งผลต่อค่าที่คลาดเคลื่อน และต้องทำความสะอาดหลอดอย่างยากลำบาก ดังนั้นการเจือจางน้ำยางอาจเป็นส่วนสำคัญสำหรับการตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้สำหรับการหาค่า DRC ด้วยวิธีการจับก้อนด้วยกรดนั้นพบว่า ใช้กรด HCl ให้ผลดีและจับก้อนได้ง่ายกว่าใช้กรดซัลฟิวริกดังในมาตรฐาน ASTM และกรดอะซิติกดังในมาตรฐาน ISO และการจับก้อนที่ DRC ทำให้ความผิดพลาดมากกว่าการจับก้อนที่ DRC สูง

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าการเจือจางน้ำยางจะทำให้เกิดความผิดพลาดมากยิ่งขึ้นหากเจือจางมากขึ้น เนื่องจาก ความผิดพลาดจากการเตรียมน้ำยางปริมาณน้อยๆ เมื่อผิดพลาดก็จะส่งผลต่อค่าที่ได้อย่างมาก และพบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนืดและ DRC จะอยู่ในช่วงที่เจือจางน้ำยางลงมาถึง 8% และต่ำกว่า ดังนั้นในการตรวจวัดที่เหมาะสมน่าจะใช้ค่า DRC ที่มากที่สุดที่ยังคงให้พฤติกรรมเป็นเส้นตรงอยู่ เพื่อลดผลจากความผิดพลาดจากการเจือจางและความหนืดของของแข็งละลายน้ำ ซึ่งพบว่าเมื่อเจือจางให้ DRC เป็น 8% ผลของกระแทกของของแข็งละลายน้ำสามารถตัดทิ้งได้ โดยยืนยันผลด้วยการวัดความหนืดด้วย rotational viscometer และจากความสัมพันธ์ของความหนืดกับ DRC สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของความหนืดกับเวลาในการไหลผ่านจุดสองจุด หรือ Efflux time ได้ จึงสะดวกที่ในการใช้ในการตรวจวัดเพราะเพียงแค่จับเวลาการไหลผ่านจุดสองจุดตั้งเช่นอุปกรณ์วัดความหนืดแบบคาปิลลารีชนิดอื่น เช่น Cannon-Fenske Routine

นอกจากนี้ ยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (หรือเวลา Efflux time) กับ DRC คืออุณหภูมิของอากาศ ซึ่งจะทำได้กราฟเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากอายุของน้ำยางอีกด้วย จึงจำเป็นต้องหาวิธีในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

สรุปผลการวิจัย

พฤติกรรมการไหลของน้ำยางสดและน้ำยางข้นมีความคล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันที่น้ำยางข้นหากเจือจางได้ DRC ในระดับเดียวกับน้ำยางสดจะได้ค่าความหนืดสูงกว่า ซึ่งแสดงถึงผลของขนาดของอนุภาคยางต่อความหนืด การเจือจางในระดับ DRC ตั้งแต่ 8% ลงไป สามารถตัดผลกระทบของของแข็งละลายน้ำได้ และได้กราฟเป็นเส้นตรงระหว่าง DRC และความหนืด (หรือ efflux time) ในการพัฒนาชุดตรวจสอบนี้ยังต้องศึกษาผลของอุณหภูมิ ผลของขนาดอนุภาค ผลของประจุ และต้องระมัดระวังในการเตรียมการเจือจางน้ำยางให้ถูกต้องที่สุด

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัย และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

จากการศึกษาพบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง DRC และความหนืดในการหาปริมาณ DRC ในน้ำยางสด อย่างไรก็ตามพบว่า ปัจจัยเรื่องอุณหภูมิของอากาศที่ทำการตรวจวัด และอายุของน้ำยางมีผลต่อการหาปริมาณดังกล่าว จึงควรต้องมีการศึกษาที่ครอบคลุมและรัดกุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาในพื้นที่ที่ใช้งานจริง เพราะจะได้น้ำยางสดที่สดจริง และมีตัวอย่างน้ำยางสดให้ทำการทดลองทุกวัน

เพื่อเก็บเป็นสถิติถึงผลของอุณหภูมิของอากาศ และนำมาสร้างเป็นกราฟมาตรฐานในการแปลค่า DRC ตามอุณหภูมิ

นอกจากนี้อาจจำเป็นต้องศึกษาโดยละเอียดถึงผลของขนาดของอนุภาคอย่างต่อความหนืด ซึ่งในแต่ละสายพันธุ์จะให้ลักษณะของยางแตกต่างกัน รวมถึงการตรวจสอบผลของการเจือจางต่อค่า zeta potential ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกประจุของอนุภาคยาง ควรตรวจสอบดูว่ามีผลของประจุต่อค่าความหนืดหรือไม่อย่างไร หากนำอุปกรณ์ไปใช้เฉพาะที่ ซึ่งจะเป็นการตัดตัวแปรของขนาดอนุภาค หรือทราบค่า zeta potential มีความสัมพันธ์กับ DRC หรือปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางเช่นไร น่าจะสามารถตัดแปลงอุปกรณ์ให้ใช้งานเฉพาะบริเวณนั้นได้

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ยังไม่มีผลงานวิชาการเกิดขึ้น ณ เวลานี้ คาดว่าจะเขียนบทความลงในวารสารทางวิชาการ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยเบื้องต้นนี้ ได้ใช้หลักการหาค่าความหนืดของของไหลโดยใช้คาปิลลารีในแนวนอน ต่อกับท่อในแนวตั้งซึ่งส่งผลต่อการปรับค่าความดันก่อนเข้าท่อคาปิลลารี เมื่อทำการทดสอบพบว่าจากพฤติกรรมการไหลของน้ำยางสดและน้ำยางสดที่เจือจางพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและ DRC ในลักษณะ exponential เนื่องจากมีผลกระทบของแรงกระทำระหว่างอนุภาคมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการเจือจางน้ำยางอาจเป็นส่วนสำคัญสำหรับการตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้ สำหรับการหาค่า DRC ด้วยวิธีการจับก้นด้วยกรดนั้นพบว่า ใช้กรด HCl ให้ผลดีและจับก้นได้ง่ายกว่าใช้กรดซัลฟิวริกดังในมาตรฐาน ASTM และกรดอะซิติกดังในมาตรฐาน ISO และการจับก้นที่ DRC ต่ำให้ความผิดพลาดมากกว่าการจับก้นที่ DRC สูง

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าการเจือจางน้ำยางจะทำให้เกิดความผิดพลาดมากยิ่งขึ้นหากเจือจางมากขึ้น เนื่องจาก ความผิดพลาดจากการเตรียมน้ำยางปริมาณน้อยๆ เมื่อผิดพลาดก็จะส่งผลต่อค่าที่ได้อย่างมาก และพบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนืดและ DRC จะอยู่ในช่วงที่เจือจางน้ำยางลงมาถึง 8% และต่ำกว่า ดังนั้นในการตรวจวัดที่เหมาะสมน่าจะใช้ค่า DRC ที่มากที่สุดที่ยังคงให้พฤติกรรมเป็นเส้นตรงอยู่ เพื่อลดผลความผิดพลาดจากการเจือจางและความหนืดของของแข็งละลายน้ำ ซึ่งพบว่าเมื่อเจือจางให้ DRC เป็น 8% ผลของกระทบของของแข็งละลายน้ำสามารถตัดทิ้งได้ โดยยืนยันผลด้วยการวัดความหนืดด้วย rotational viscometer และจากความสัมพันธ์ของความหนืดกับ DRC สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของความหนืดกับเวลาในการไหลผ่านจุดสองจุด หรือ Efflux time ได้ จึงสะดวกที่ในการใช้ในการตรวจวัดเพราะเพียงแค่จับเวลาการไหลผ่านจุดสองจุด

นอกจากนี้ ยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (หรือเวลา Efflux time) กับ DRC คืออุณหภูมิของอากาศ ซึ่งจะให้ได้กราฟเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังมีผลกระทบจากอายุของน้ำยางอีกด้วย และขนาดของอนุภาค จึงจำเป็นต้องหาวิธีในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

คำสำคัญ คาปิลลารี ความหนืด สารแขวนลอย น้ำยางธรรมชาติ คอลลอยด์

ABSTRACT

In this preliminary study, the viscosity was determined with the horizontal capillary viscometer connected to the vertical reservoir tube. The height of the liquid in the vertical tube could adjust the pressure of the liquid at the inlet of the horizontal capillary. The flow behavior shows that viscosity of field rubber latex and those of diluted latexes exponentially increased with DRC. The higher concentration of latex particles leads to higher degree of interactions influencing the increase in viscosity. Therefore, the dilution was needed to implement this technique. Usually, DRC is determined by acid coagulation according to standard methods, i.e. acetic acid solution is for ISO standard and sulfuric acid solution is for ASTM standard. It was found that using HCl is more convenient and yields more correct values than other two acids. Therefore, it was used throughout. The study showed that it was more difficult to coagulate low DRC latex and it yielded less correct value.

It was found that the linear relation was obtained between viscosity and DRC when the DRC is less than 8%. However, dilution seems to give more discrepancies because of experimental errors. Therefore, the maximum DRC which is still on the linear relation should be applied in this technique in order to optimize the experimental errors and make the effect of dissolved solids negligible. The viscosity of diluted latex was also checked with rotational viscometer which gave the confirmation that dilution down to 8% DRC could shield the effect of dissolved solids. Moreover, it was proved that the linear relation was also obtained from the efflux time between two points and the DRC. This yields a more convenient way to measure DRC.

In addition, other factors seemed to affect the validity of the measurement, which were temperature of the atmosphere, age of field latex, and size of rubber particles. Those need to be thoroughly studied.

Keywords: Capillary, viscosity, suspension, natural rubber latex, colloid

1) ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ในปัจจุบันวิธีมาตรฐานในการหาปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content หรือ DRC) และ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid content หรือ TSC) อ้างอิงจากมาตรฐาน ISO 126:2005 Natural Rubber Latex Concentrate – Determination of dry rubber content และ ISO 124:2008 Latex-Rubber – Determination of solids content ตามลำดับ ซึ่งต้องใช้เวลาในการทดสอบนาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการหาปริมาณเนื้อยางแห้ง โดยพิจารณาจากค่าความหนืดของน้ำยาง

ความหนืดเป็นสมบัติที่ต้านการไหลของของไหล ซึ่งขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ขนาดของโมเลกุลของของไหล ขนาดและปริมาณของตัวถูกละลาย ขนาดและปริมาณของอนุภาคที่แขวนลอยสำหรับสารแขวนลอย รวมถึงแรงกระทำระหว่างโมเลกุลเช่น แรงผลักรหรือแรงดึงดูด งานวิจัยนี้จึงต้องการนำหลักการของการหาความหนืดด้วยวิธีง่าย ๆ อย่างเช่น การไหลในคาปิลลารี เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบอกปริมาณของเนื้อยางในน้ำยาง

2) วัตถุประสงค์

- (1) ศึกษาการหาความหนืดของน้ำยาง ทั้งชนิดน้ำยางข้น และน้ำยางสด ด้วยวิธีคาปิลลารี เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณเนื้อยาง ของแข็งที่ละลายน้ำได้ และน้ำ ที่เป็นองค์ประกอบ
- (2) เปรียบเทียบวิธีการหาความหนืดกับการหาค่า DRC ด้วยวิธีมาตรฐาน

3) ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษารายละเอียดในหนังสือ Transport Phenomena ของ Bird, Stewart และ Lightfoot (2002) ได้มีรายละเอียดเกี่ยวกับสมการหาความหนืดของสารแขวนลอยดังอธิบายต่อไปนี้ แนวคิดเรื่องการวิเคราะห์สมบัติการไหลของของไหลได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของน้ำตาลที่ละลายในน้ำมาก่อนโดย อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ ในงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกของเขา จนเกิดสมการการประมาณค่าความหนืดของสารละลาย โดยขึ้นกับความหนืดของตัวทำละลายและสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวถูกละลาย และต่อมาจึงได้มีการพัฒนาสมการเพิ่มเติมมากขึ้น เพื่ออธิบายความหนืดของสารแขวนลอยที่มีอนุภาคของแข็งแขวนลอยอยู่ รวมถึงเมื่อสารแขวนลอยนั้นมีความเป็นประจุร่วมด้วย

ทฤษฎีที่ใช้ในการหาความหนืดที่พัฒนาโดยไอน์สไตน์ (Einstein) นั้นเขาสมมติให้สารที่แขวนลอยเป็นของแข็งทรงกลม มีความเข้มข้นเจือจางดังนั้นการเคลื่อนที่ของทรงกลมหนึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อทรงกลมอื่น ดังนั้นจึงเป็นการเคลื่อนที่ของของไหลรอบของแข็ง Einstein equation สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_o} = 1 + \frac{5}{2} \phi \quad (1)$$

เมื่อ μ_{eff} คือความหนืดของสารแขวนลอยและอิมัลชัน และ μ_o คือความหนืดของของเหลวที่ไม่มีของแข็ง และ ϕ คือสัดส่วนปริมาตรของของแข็ง สมการ (1) ได้ถูกดัดแปลงให้เหมาะสมสำหรับกรณีต่างๆ เช่น สารแขวนลอยที่มีของแข็งรูปทรงอื่น ค่าสัมประสิทธิ์จะเปลี่ยนจาก 5/2 เป็นค่าอื่นขึ้นอยู่กับรูปร่างเฉพาะ และพบว่าหากรูปร่างเป็นทรงยาวหรือโมเลกุลที่ยับได้ จะมีพฤติกรรมเป็นแบบนอนนิวโตเนียน

สำหรับความหนืดของทรงกลมที่แขวนลอยและมีความเข้มข้นมาก นั่นคือเมื่อ ϕ มีค่ามากกว่า 0.05 แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของของแข็งจะส่งผลเป็นอย่างมาก มีสมการมากมายถูกพัฒนาขึ้น แต่ที่อยู่ในรูปที่ง่ายที่สุดคือสมการของมูนนี่ (Mooney equation)

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_o} = \exp\left(\frac{\frac{5}{2}\phi}{1 - \phi/\phi_o}\right) \quad (2)$$

ค่า ϕ_o เป็นค่าที่หาได้จากการทดลอง มีค่าประมาณ 0.74 ถึง 0.52 ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบ close packing และ cubic packing ตามลำดับ อีกทฤษฎีหนึ่งสำหรับประมาณความหนืดของสารแขวนลอยที่ความเข้มข้นสูงคือ cell theory ซึ่งสนใจ dissipation energy ของของไหลเมื่อเกิดการไหลผ่านอนุภาคหลายๆ อนุภาคที่อยู่ชิดกัน (squeezing flow) ตัวอย่างหนึ่งของทฤษฎีนี้คือ Graham equation

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_o} = 1 + \frac{5}{2}\phi + \frac{9}{4}\left(\frac{1}{\psi\left(1 + \frac{1}{2}\psi\right)(1 + \psi)^2}\right) \quad (3)$$

โดยฟังก์ชัน $\psi = 2\left[\left(1 - \sqrt[3]{\phi/\phi_{max}}\right)/\sqrt[3]{\phi/\phi_{max}}\right]$ เมื่อ ϕ_{max} คือสัดส่วนปริมาตรซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างแบบ close packing สมการนี้จะลดรูปเป็น Einstein equation เมื่อ $\phi \rightarrow 0$ และสมการของ Frankel-Acrivos เมื่อ $\phi \rightarrow \phi_{max}$

สำหรับสมการของสารแขวนลอยที่ของแข็งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม สามารถใช้สมการของ Krieger-Dougherty ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_o} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{max}}\right)^{-A\phi_{max}} \quad (4)$$

สำหรับค่าคงที่ A และ ϕ_{max} ที่ใช้ในสมการนี้จะแตกต่างกันตามแต่ชนิดของแข็งดังแสดงในตารางในหนังสือ Transport Phenomena (2003) สำหรับสารแขวนลอยของทรงกลมที่มีประจุที่ผิว และมีความเข้มข้นเจือจาง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Smoluchowski equation

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_o} = 1 + \frac{5}{2}\phi\left(1 + \frac{(D\zeta/2\pi R)^2}{\mu_o k_e}\right) \quad (5)$$

เมื่อ D คือค่าคงที่ dielectric ของของเหลวที่ไม่มีสารแขวนลอย, k_e คือค่าการนำไฟฟ้าเฉพาะของสารแขวนลอย (specific electrical conductivity), ζ คือ electrokinetic potential ของอนุภาค และ R คือรัศมีของอนุภาค แรงที่ผิวของอนุภาคมักทำให้เกิดการรวมกลุ่มแบบหลวมๆ ซึ่งทำให้เกิดการไหลในแบบนอนนิวโตเนียน

จากคำอธิบายที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าสมบัติการต้านทานการไหลหรือความหนืดนั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุล แรงกระทำระหว่างโมเลกุล ในกรณีของสารละลายจะขึ้นกับปริมาณของตัวถูกละลาย ในกรณีของสารแขวนลอย จะขึ้นกับสัดส่วนของของแข็งที่แขวนลอยด้วย ด้วยแนวคิดดังกล่าว จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปริมาณของแข็งที่เป็นของแข็งแขวนลอยในน้ำยาง การวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด (viscometer) ซึ่งมีหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบการไหลในท่อ

(capillary) แบบหมุน (rotational viscometer) และแบบใช้ของแข็งตกตะกอนในของไหล (sedimentation) อย่างไรก็ตาม ชนิดที่เป็นที่น่าจะสะดวกในการใช้งานนอกสถานที่มากที่สุด แนวคิดในการทำวิจัยจึงมุ่งศึกษาความหนืดในตัวอย่างต่างๆ โดยใช้สมการ Hagen Poiseuille ที่ใช้อธิบายการไหลในท่อคาปิลลารี ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการทำการทดลอง การหาค่าความหนืดจะทำได้โดยการจับเวลาในการไหลในท่อนั้นเอง หากสารมีความหนืดสูงเวลาที่ใช้ในการไหลก็จะนานไปด้วย อย่างไรก็ตาม สมการดังกล่าวพัฒนามาจากสมมติฐานว่าของไหลเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน แต่น้ำยางหากมีความเข้มข้นสูงน่าจะมีพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียน ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้สมการอื่นที่เหมาะสมกว่าต่อไป

มีรายงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาการไหลของสารแขวนลอยอนุภาคคอลลอยด์โดยใช้สมการซับซ้อนในการอธิบายค่าความหนืด ตัวอย่างเช่น การวัดความหนืดของสารแขวนลอยเจือจางของ SiO_2 , Al_2O_3 และ TiO_2 ในน้ำที่ค่า pH ต่างๆ โดยมีการเสนอสมการสำหรับอธิบายค่าความหนืดซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่า pH เนื่องจาก pH ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนไป จึงมีผลต่อค่าความหนืดด้วย (Hernandez และคณะ, 2006) นอกจากนี้ ผลของค่าความหนืดยังถูกนำมาตีความถึงขนาดของการเกาะกลุ่มกันของสายเจลาติน (gelatin) ในสารละลายเจือจาง โดยใช้ท่อคาปิลลารีในแนวนอน ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่า shear rate โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อการเกาะกลุ่มกันของเจลาติน (Olivares และคณะ, 2006) วิธีการวัดค่าความหนืดยังเป็นที่นิยมสำหรับสารไฮโดรคอลลอยด์อื่นๆ เช่น สารสกัดจากใบมะลเบอรี่ เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารนี้ในน้ำต่อค่าความหนืด พบว่ามีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นแต่เป็นแบบเลขยกกำลัง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโพลีเมอร์ขึ้น นอกจากนี้ผลของความหนืดยังเป็นตัวบ่งชี้สภาวะมีประจุของสายโพลีเมอร์ในน้ำได้อีกด้วย (Lin และคณะ, 2008) งานวิจัยของ Snabre และ Mills (1999) ได้เสนอทฤษฎีการหาค่าความหนืดเมื่อรูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นขณะไหล ซึ่งเกิดขึ้นได้ในกรณีที่สารมีความหนาแน่น หรือมีความเข้มข้นสูง สำหรับการไหลของโพลีเมอร์พร้อมกับอนุภาคของแข็งนั้น มีผู้ศึกษาเช่นกัน โดยใช้อนุภาคของโพลีสไตรีนไหลไปพร้อมกับโพลีเอทิลีนออกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้ในไมโครคาปิลลารี พบว่าถ้าไม่มีโพลีเอทิลีนออกไซด์ละลายในน้ำจะทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคโพลีสไตรีนช้ากว่า ซึ่งพบว่าการที่อนุภาคของโพลีสไตรีนใหญ่ขึ้นเพราะมีโพลีเอทิลีนมาเกาะทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น (Amnuaypanich และคณะ, 2007)

จากงานวิจัยเหล่านี้ พบว่าการวัดความหนืดสามารถบ่งชี้ปริมาณสารหรือความเข้มข้นของสารในน้ำได้ และบ่งบอกความเป็นประจุของอนุภาค รวมถึงผลของขนาดของอนุภาคอีกด้วย

4) วิธีการทำการทดลอง

(1) การหาค่า TSC ของน้ำยางข้นและน้ำยางสด (ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง; Total Solid Content)

น้ำยางสดและน้ำยางข้น ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานยางวี เอ. จังหวัดตรัง ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง หมายถึงปริมาณยางส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยาง รวมกับสารอื่นๆ ที่เป็นของแข็งและส่วนที่ไม่ใช่ยาง ซึ่งจะคงเหลืออยู่หลังจากการทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิทดสอบและบรรยากาศที่กำหนด (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>) ในงานวิจัยนี้หาค่า TSC ของน้ำยาง ตามวิธีการจากมาตรฐาน ISO 124:1997 โดยชั่งน้ำหนักน้ำยางบนจานเพาะเชื้อประมาณ 2 กรัม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C จนกระทั่งแห้ง แล้วบันทึกน้ำหนักแห้ง ซึ่งใช้น้ำยางจำนวน 3 ตัวอย่าง ค่า TSC ได้จากการนำค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยจากทั้ง 3 ตัวอย่างมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการ (6)

$$\text{TSC} = \frac{\text{dried total solid weight}}{\text{actual skim latex weight}} \times 100 \quad (6)$$

(2) การหาค่า DRC ของน้ำยางข้นและน้ำยางสด (ปริมาณเนื้อยางแห้ง; Dry Rubber Contents)

ปริมาณเนื้อยางแห้ง หมายถึงปริมาณส่วนที่เป็นเนื้อยางทั้งหมดในน้ำยางซึ่งได้จากการทำให้น้ำยางจับตัวด้วยกรดอะซิติก ภายใต้การควบคุมสภาพการจับตัวอย่างแน่นอน เป็นค่าบ่งชี้ปริมาณของเนื้อยางจริงๆ ซึ่งมีความสำคัญในการซื้อขายและการนำยางไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง (<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>) มาตรฐานหนึ่งที่ใช้ในการหาปริมาณเนื้อยางแห้งคือ ISO 126:2005 Natural Rubber Latex Concentrate – Determination of dry rubber content ซึ่งใช้การจับก้อนยางด้วยสารละลายกรดอะซิติกพร้อมกับการใช้เอธิลแอลกอฮอล์ในกรณีที่เดิมอะซิติกแล้วยังทำให้น้ำยางขุ่นอยู่ อีกวิธีหนึ่งคือวิธีการจากมาตรฐาน ASTM D1076-06 โดยการชั่งน้ำหนักน้ำยางประมาณ 20 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2% จนกระทั่งค่า pH = 4.5 จากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำเนื้อยางที่กรองได้เข้าอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนกระทั่งแห้ง บันทึกค่าน้ำหนักแห้ง ซึ่งใช้น้ำยางจำนวน 3 ตัวอย่าง ค่า DRC ได้จากนำค่าน้ำหนักแห้งเฉลี่ยจากทั้ง 3 ตัวอย่างมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการ (7)

$$\text{DRC} = \frac{\text{dried rubber weight}}{\text{actual skim latex weight}} \times 100 \quad (7)$$

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองทั้งแบบ ISO และ ASTM อีกทั้งได้ทดลองใช้กรด HCl ความเข้มข้น 2% ในการจับก้อนยางอีกด้วย ซึ่งพบว่าการใช้กรด HCl ยางจับก้อนได้เช่นเดียวกับกรดอะซิติกและการใช้กรดซัลฟิวริก และพบว่าเมื่อมีการเจือจางน้ำยางเมื่อใช้น้ำสัดส่วนมากๆ นั้น การใช้กรดซัลฟิวริกหรือกรดอะซิติกในการจับก้อนยางต้องใช้ในปริมาณมากขึ้น แต่เมื่อได้ทดลองกับ HCl ที่ความเข้มข้น 2% สามารถใช้กรดปริมาณที่น้อยกว่าและรวมตะกอนเล็กๆ เข้าด้วยกันได้ดีกว่า

(3) การออกแบบคาปิลลารีในแนวนอน (horizontal capillary) และการวัดความหนืด

ในเบื้องต้นได้ทดลองโดยใช้ Burette เป็นที่บรรจุน้ำยางไว้ ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.845 เซนติเมตร เป็นท่อในแนวตั้ง และมีวาล์วเปิดปิดที่ปลายท่อต่อกับท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร แล้วจึงปล่อยให้ของไหลไหลผ่านคาปิลลารีที่เป็นท่อในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการจัดอุปกรณ์วัดความหนืดแบบคาปิลลารีในแนวนอน

ดังนั้นการไหลจึงเกิดขึ้นได้โดยใช้ gravity head ใน Burette เปลี่ยนเป็นความดันตามความสัมพันธ์ของเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation) แรงดันจะดันให้ของไหลไหลในท่อแนวนอนได้ ระดับของน้ำยางที่บรรจุในท่อใหญ่ จะเป็นตัวกำหนด

ความดัน ณ ทางเข้าของคาปิลลารี ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนด shear rate ของการไหลผ่านท่อคาปิลลารีนั่นเอง จึงต้องมีการคำนวณหาค่า shear rate ที่เป็นไปได้ในการปรับให้น้ำยางไหลเข้าท่อ การคำนวณหาความหนืดจะสัมพันธ์กับการจับเวลา ซึ่งสามารถพัฒนาสมการ ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ต่างๆ อันได้แก่สมการ Hagen-Poiseuille สำหรับของไหลนิวโตเนียนในท่อทรงกระบอก และสมการสมดุลพลังงานกล (เบอร์นูลลี) โดยสมมติว่าไม่มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากข้อต่อและวาล์ว รวมถึงจากแรงเสียดทานที่ผิว Burette และสมการสมดุลมวลซึ่งสมมติว่าเป็นการไหลแบบคงตัว (steady flow) สมการที่พัฒนาได้จะอยู่ในรูปของ

$$H = H_0 \exp\left(\frac{-t\rho g R_c^4}{4\eta L R_o^2}\right) \quad (8.1)$$

หรือในรูปของลอการิทึม

$$\ln\left[\frac{H}{H_0}\right] = -\frac{\rho g R_c^4}{4\eta L R_o^2} t \quad (8.2)$$

เมื่อ R_c คือรัศมีของคาปิลลารี และ R_o คือรัศมีของ Burette เมื่อเราวาดกราฟระหว่าง $\ln(H)$ และ t จะสามารถหาค่าความหนืดได้ ในเบื้องต้นจะทดสอบหาความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิห้องก่อน แล้วจึงทดลองกับน้ำยางสดและน้ำยางข้นต่อไป จากนั้นจึงออกแบบชุดอุปกรณ์ที่จะทำดริคชั่น โดยใช้ขนาดของท่อเป็นไปตามเดิม แต่ท่อที่เก็บน้ำยางในแนวตั้งมีขนาดสั้นกว่า

(4) การหาความสัมพันธ์ของความหนืดจากคาปิลลารีในแนวนอนและค่า DRC

4.1 การหาความหนืดของน้ำยางสดและน้ำยางข้นที่เจือจาง

ในงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องศึกษาปริมาณของยางต่างๆ ซึ่งอาจทำได้โดยการเจือจางน้ำยางลง โดยใช้การผสมน้ำยางกับน้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ที่สัดส่วนต่างๆ ได้แก่ 1:0, 1:1, 1:3, 1:15, และ 1:31 เป็นต้น และทดสอบความหนืดโดยการไหลในชุดอุปกรณ์ที่จัดไว้ในข้อ (3) โดยการจับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ 5 ตำแหน่ง โดยทำการทดลองซ้ำสามครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย แล้วนำค่า $\ln(H)$ กับเวลามาวาดกราฟ คำนวณหาความชันของสมการเส้นตรง และนำค่าความชันไปคำนวณหาความหนืดได้ แล้วจึงนำค่าความหนืดมาวาดกราฟกับปริมาณ DRC ที่ได้จากการทำการทดลองจับเนื้อยางด้วยกรด ในที่นี้จะมีการหาค่า DRC ของน้ำยางสด และเมื่อเจือจางแล้ว ก็จะมีการหา DRC ของน้ำยางสดเจือจางด้วยเช่นกัน และเปรียบเทียบกับปริมาณ DRC ที่ควรจะเป็นจริงตามสัดส่วนการเจือจางข้างต้น จึงขอเรียก DRC ในแบบแรกว่า DRC จากการจับด้วยกรด และ เรียกค่า DRC ในแบบหลังว่า DRC จากการคำนวณ

เนื่องจากในน้ำยางนั้นประกอบด้วยส่วนที่เป็นเนื้อยาง ของแข็งที่ละลายน้ำได้ และน้ำ ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำยางจึงเป็นผลของทั้งสามส่วนประกอบกัน ดังนั้นในการทดสอบหาค่าความหนืดของน้ำยางที่มีการเจือจางให้ปริมาณของเนื้อยางแตกต่างกันไปนั้น จึงทำให้มีปริมาณของของแข็งที่ละลายน้ำได้แตกต่างกันไปด้วย เราจึงได้ทดลองจับเนื้อยางออกจากตัวอย่างน้ำยางทั้งที่มีการเจือจางและไม่มีการเจือจาง และตรวจสอบความหนืดของน้ำเซรัมที่เหลือด้วยดองอริบายในหัวข้อถัดไป

4.2 การหาความหนืดของน้ำเซรั่มเจือจาง

เริ่มจากการใช้กรดจับเนื้อเยื่อออกทั้งหมด เพื่อศึกษาเพียงความหนืดของน้ำเซรั่มเพียงอย่างเดียว ในเซรั่มประกอบด้วยของแข็งอื่นๆ ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งก็ต้องมีการปรับความเข้มข้นโดยการเจือจางและทดสอบความหนืดเช่นกัน เมื่อได้ผลของความหนืดแต่ละอย่าง จะนำมาเปรียบเทียบรวมกันว่า ผลของของแข็งที่ละลายน้ำได้ ผลของเนื้อเยื่อที่แขวนลอยในน้ำ และผลของของปริมาณน้ำ จะทำให้ค่าของความหนืดเปลี่ยนแปลงอย่างไร

(5) การทดสอบการหาค่า DRC ของ unknown โดยใช้ความสัมพันธ์ที่หาได้

เมื่อได้ความสัมพันธ์ของความหนืดและค่า DRC ในข้อ (4) แล้วจึงนำมาทดสอบหาปริมาณ DRC โดยทดสอบการเจือจางน้ำยางของตัวอย่าง unknown (ที่ทราบค่าการเจือจางที่แน่นอน) และพิจารณาผลความผิดพลาดที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งเสนอข้อเสนอแนะ

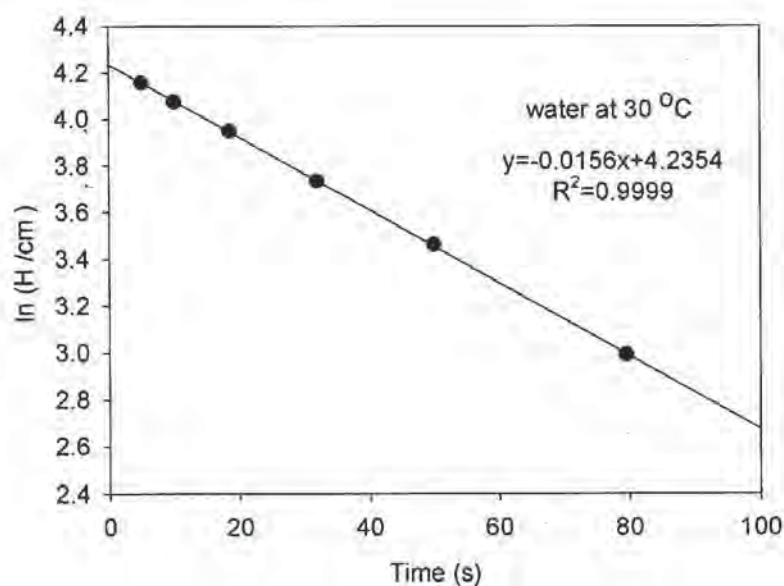
(6) การวัดความหนืดของน้ำยางข้นและน้ำยางสด ด้วยวิธี rotational flow

การหาค่าความหนืดของสารที่เตรียมไว้ วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดความหนืด ยี่ห้อ BROOKFIELD รุ่น DV- II plus Programmable ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ซึ่งเป็นวิธีวัดความหนืดของของเหลวโดยทั่วไปเพราะสามารถปรับ shear rate ได้ง่ายโดยการปรับความเร็วรอบของการหมุน จะทำให้ทราบว่าน้ำยางมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบใด เป็นนิวโตเนียนหรือนอนนิวโตเนียน ในช่วง shear rate ประมาณเท่าไร

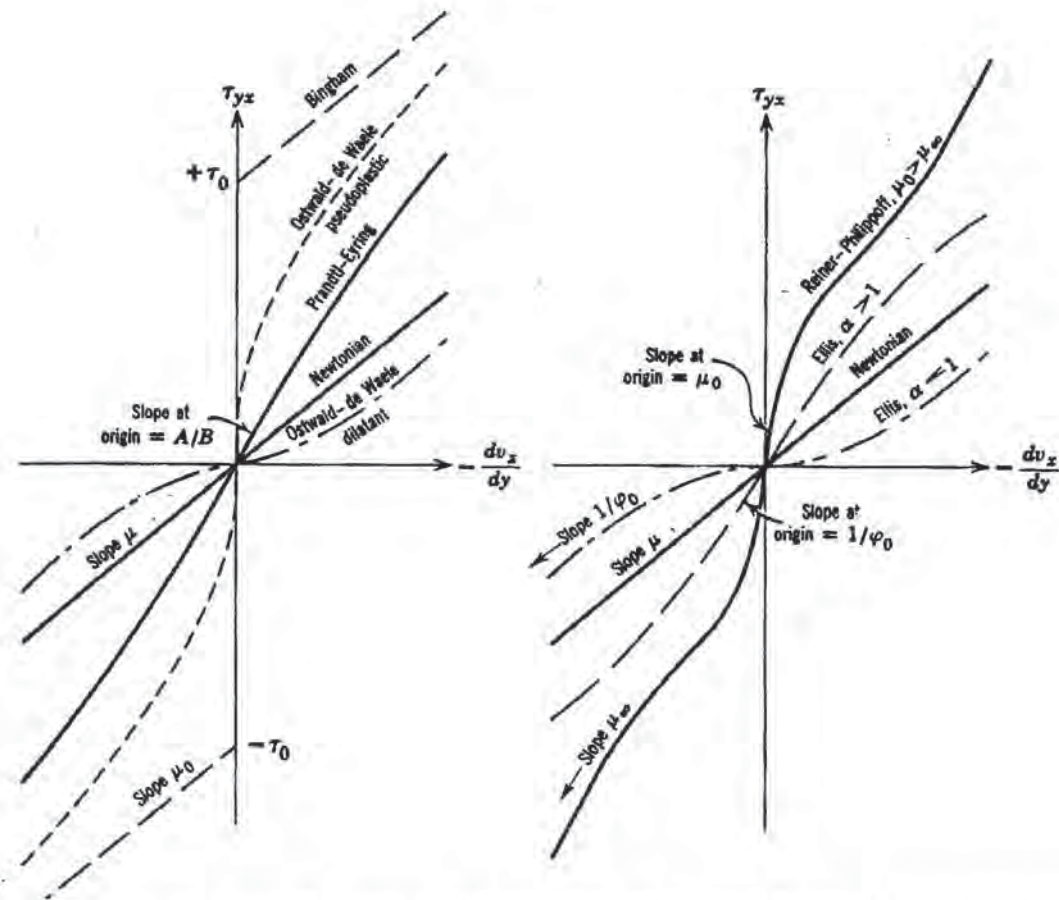
5) ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

5.1 ตัวอย่างการหาความหนืดของน้ำ

ที่อุณหภูมิ 30 °C เมื่อจับเวลาขณะที่น้ำไหลผ่านตำแหน่งต่างๆ แล้วนำค่า $\ln(H)$ กับ เวลา มาวาดกราฟได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของ $\ln(H)$ กับ เวลา สำหรับการไหลของน้ำผ่านชุดทดลองวัดความหนืด



รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองการไหลแบบนอนนิวโตเนียน ซึ่งจะเห็นว่าความหนืดเปลี่ยนไปตาม shear rate

เมื่อนำค่าความชันมาคำนวณหาความหนืดจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (8) พบว่าความหนืดของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.8054 cP ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากในหนังสือ Transport Phenomena ของ Bird และคณะ (2003) พบว่ามีค่าประมาณ 0.8088 cP ดังนั้นการวัดความหนืดโดยเครื่องมือนี้จึงให้ค่าใกล้เคียง และเนื่องจากน้ำยังเป็นสารแขวนลอยของอนุภาคยางในน้ำจึงเป็นสารนอนนิวโตเนียน ดังนั้นลำดับต่อไปจึงพิจารณาว่าอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถวัดความหนืดของสารแขวนลอยได้หรือไม่ โดยพิจารณาจากค่า Shear rate ซึ่งมีผลจากขนาดของเครื่องมือ จากขนาดที่เลือกใช้นี้สามารถคำนวณ shear rate ได้จาก

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_z}{dr} = \frac{R_c \Delta P}{2L\eta} \quad (9)$$

จะพบว่า shear rate ในการทดลองนี้มีค่าประมาณ 7540 s^{-1} หากให้ระดับน้ำสูงถึง 75 cm และมีค่าประมาณ 2010 s^{-1} เมื่อระดับน้ำสูง 20 cm จากงานวิจัยของ Olivares และคณะ (2006) ได้เสนอไว้ว่า shear rate ควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 50 ถึง 2500 s^{-1} เพื่อให้แน่ใจว่าการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน ดังนั้นในการทดลองนี้จึงน่าจะยังสมมติว่าการไหลเป็นแบบนิวโตเนียนได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อ shear rate มีค่าต่างๆ จะเห็นว่าความชันของกราฟมีค่าคงที่ ซึ่งหมายถึงความหนืดมีค่าคงที่ ดังนั้นในช่วงนี้การไหลจึงเป็นแบบนิวโตเนียน

5.2 การวัดความหนืดของน้ำยางสด

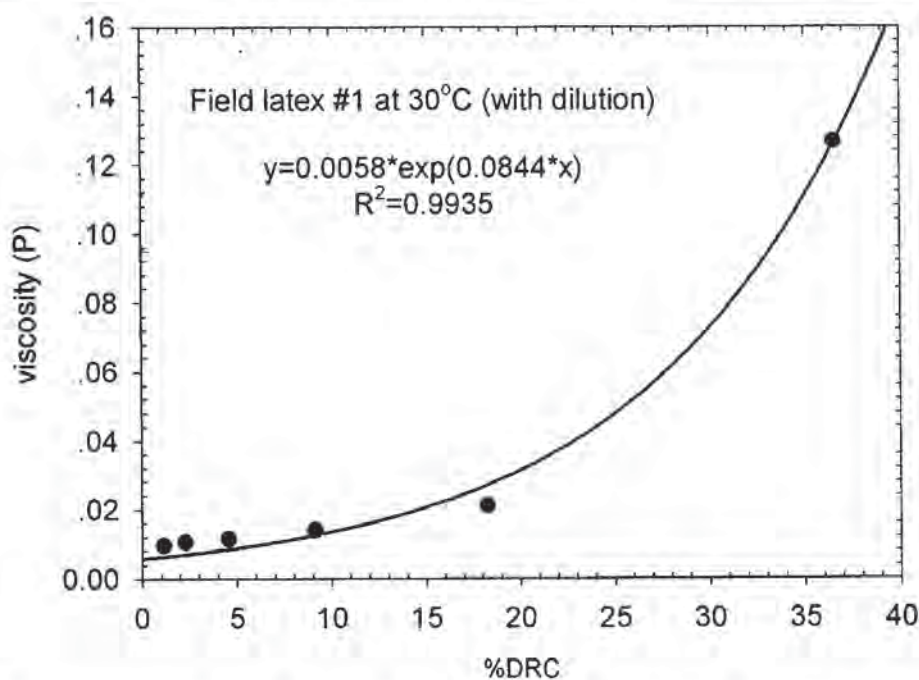
(1) การทดลองครั้งที่ 1 ใช้กรดซัลฟิวริกในการจับก้อนยาง

ได้ผลของ DRC จากการจับด้วยกรดและจากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการเจือจางน้ำยางมากขึ้นจะทำให้ %ความแตกต่างมีมากยิ่งขึ้น การคิดเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างคิดจาก ผลต่างของ %DRC ที่ได้จากการคำนวณกับ %DRC จากการจับด้วยกรดหารด้วย %DRC จากการคำนวณแล้วคูณด้วย 100 ดังนั้นในการจับด้วยกรดนั้น หากใช้การเจือจางในการทำนายค่า DRC เมื่อคูณค่ากลับ จะได้ค่า DRC ที่ผิดพลาดมากขึ้น ดังนั้นการหาความสัมพันธ์ของ DRC กับความหนืดจึงน่าจะใช้ผล DRC ของน้ำยางสดแล้วคำนวณการเจือจาง จะดีกว่าเพราะความผิดพลาดจากการเจือจางน่าจะน้อยกว่าความผิดพลาดจากการทำการทดลองจับด้วยกรด ซึ่งรวมถึงการจับก้อนยางทั้งหมด ไม่ตกหล่นสูญเสีย หรือมีฝุ่นผงอื่นติดไปด้วย การทำให้แห้งสนิท การชั่งน้ำหนัก และการหักลบกับน้ำหนักกระดาษกรอง

ตารางที่ 1 แสดงผลของ DRC จากการจับกรดและจากการคำนวณการเจือจางในการทดลองครั้งที่ 1

สัดส่วน น้ำยาง:น้ำ	Viscosity (P) ของ latex	Viscosity (P) ของน้ำเซรัม	%DRC จากการ จับด้วยกรด	%DRC จาก การคำนวณ	% ความแตกต่าง
100:0	0.1267	0.0158	36.53	36.53	-
50:50	0.0211	-	17.88	18.27	+2.11
25:75	0.014	0.014	10.37	9.13	-13.55
12.5:87.5	0.0115	-	6.59	4.57	-44.32
6.25:93.75	0.0105	0.014	2.76	2.28	-20.89
3.125:96.825	0.0097	-	1.98	1.14	-73.45

เมื่อนำผลของ DRC จากการคำนวณมาวัดความสัมพันธ์กับความหนืดที่คำนวณได้ จะได้กราฟรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงความหนืดของน้ำยางสดเจือจางเปรียบเทียบกับ DRC (%) ในการทดลองครั้งที่ 1

จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณเนื้อยางมีมากขึ้น ทำให้ความหนืดของน้ำยางเพิ่มสูงขึ้น มีความสัมพันธ์เป็นแบบ exponential ดังอธิบายในทฤษฎี ดังเช่นสมการที่ (2) ซึ่งเป็นสมการของมูนนี่ (Mooney equation) ใช้สำหรับอธิบายความหนืดของทรงกลมที่แขวนลอยและมีความเข้มข้นมาก นั่นคือเมื่อ ϕ มีค่ามากกว่า 0.05 หรือหากกรณีนี้คิดว่าความหนาแน่นของยางใกล้เคียงกับน้ำจะได้ DRC มีค่ามากกว่า 5% นั่นเอง จะเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของของแข็ง ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความหนืดเป็นอย่างมาก และหากพิจารณาสมการที่ (1) ของไอส์ไตน์จะเห็นว่าเหมาะสำหรับที่ความเข้มข้นของสารน้อยๆ จึงได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ในกรณีนี้คือเมื่อ DRC มีค่าน้อย สมการที่เทียบกับการทดลองในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปของ

$$\eta = \eta_0 \exp(k * \%DRC) \quad (10)$$

ในที่นี้ η_0 จึงหมายถึงความหนืดเมื่อค่า $\%DRC=0$ หรือความหนืดของน้ำนั้นเอง และค่า k นั้นจะขึ้นกับสภาวะของสารแขวนลอย เช่น อุณหภูมิ สภาวะความเป็นกรดต่างของน้ำยาง ขนาดของอนุภาคยาง รวมถึง ความเสถียรของอนุภาคยางในทางน้ำยาง เป็นต้น ซึ่งยากในการตีความในการทดลองต่างๆ

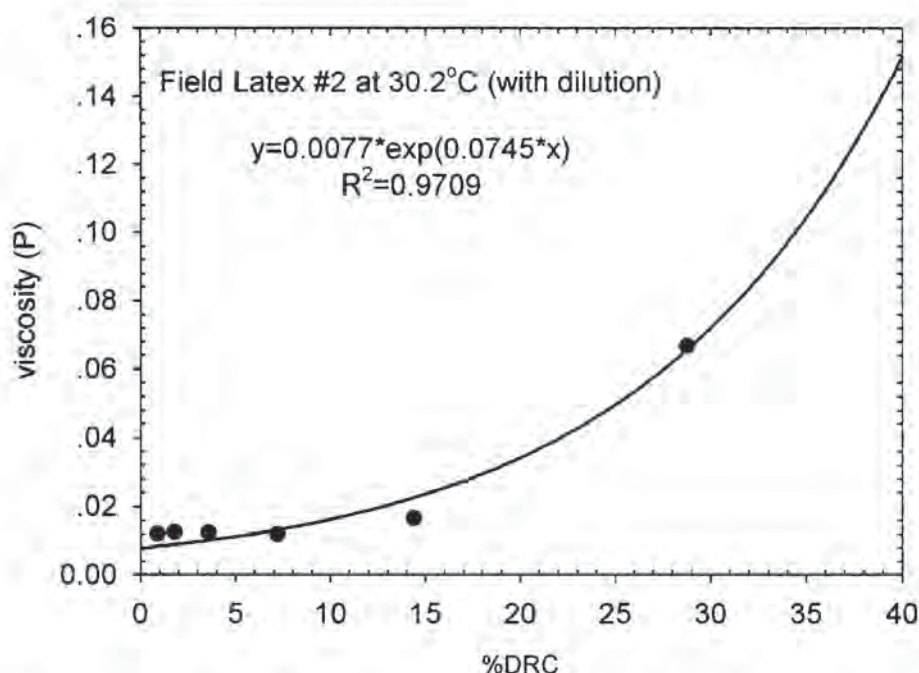
ในตารางที่ 1 ยังได้แสดงผลของความหนืดของน้ำเซรัมที่ได้หลังจับเนื้อยางจากน้ำยางสดออกไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเซรัมที่ได้จากการจับเนื้อยางในน้ำยางสดเจือจาง 25% จะเห็นว่าความหนืดของเซรัมจากน้ำยางสด 100% มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากยังมีผลของของแข็งที่ละลายในน้ำยางสดอยู่ด้วย เมื่อตรวจสอบค่าของ TSC ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 38.168% ในขณะที่ DRC ของน้ำยางสดมีค่าเท่ากับ 37.152% ดังนั้นจึงมีของแข็งละลายน้ำเพียงแค่ 1.016% เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดของเซรัมจากน้ำยางสดที่เจือจางเป็น 6% ได้ค่าเท่ากับที่ 25% จึงตรวจสอบกับความหนืดของกรดซัลฟิวริกที่ใช้จับยาง ปรากฏว่าเป็นค่าเดียวกันคือ 0.014 P ดังนั้นการตรวจสอบความหนืดของเซรัมจึงเป็นการแสดงให้เห็นว่าการเจือจางน้ำยางสดในระดับหนึ่งจะทำให้ผลของของแข็งละลายน้ำหมดไป และจากการเปรียบเทียบจะเห็นว่าความหนืดของน้ำเซรัมส่วนใหญ่มาจากความหนืดของกรดที่ใช้ในการจับก้อนยางนั่นเอง

(2)การทดลองครั้งที่ 2 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 2% ในการจับก้อนยาง

เมื่อเปลี่ยนการจับก้อนยางโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกแทนจะได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลของ DRC จากการจับกรดและจากการคำนวณการเจือจางในการทดลองครั้งที่ 2

สัดส่วนน้ำยาง: น้ำ	Viscosity (P)	%DRC จากการ จับด้วยกรด	%DRC จากการ คำนวณ	% ความ แตกต่าง
100:0	0.0667	28.78	28.78	-
50:50	0.0166	14.41	14.39	-0.14
25:75	0.0118	7.28	7.20	-1.18
12.5:87.5	0.0123	3.47	3.60	3.54
6.25:93.75	0.0125	1.80	1.80	-0.07
3.125:96.825	0.012	0.78	0.90	13.27



รูปที่ 5 แสดงความหนืดของน้ำยางสดเจือจางเปรียบเทียบกับ DRC (%) ในการทดลองครั้งที่ 2

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่า เมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกจับก้อนยางได้ค่า %ความแตกต่างระหว่าง DRC ทั้งสองน้อยลงกว่าเมื่อใช้กรดซัลฟิวริก และจากการทำการทดลองพบว่าสามารถจับก้อนยางเมื่อมีการเจือจางน้ำในสัดส่วนมากๆ ได้ดีกว่า ผลความสัมพันธ์ของความหนืดและ DRC แสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่าได้ความสัมพันธ์เป็น exponential เช่นเดียวกัน แต่การทดลองกับน้ำยางสดในคราวนี้ให้กราฟที่แตกต่างไป (ดังสมการที่แสดงในกราฟ) และมีค่า DRC ของน้ำยางสดเริ่มต้นแตกต่างไปด้วย ความแตกต่างอาจมาจาก ปริมาณเนื้อยางเริ่มต้นที่มีความแตกต่างกันและมีการเจือจางน้อยเกินไป

(3)การทดลองครั้งที่ 3 ใช้กรดไฮโดรคลอริก 2% ในการจับก้อนยาง

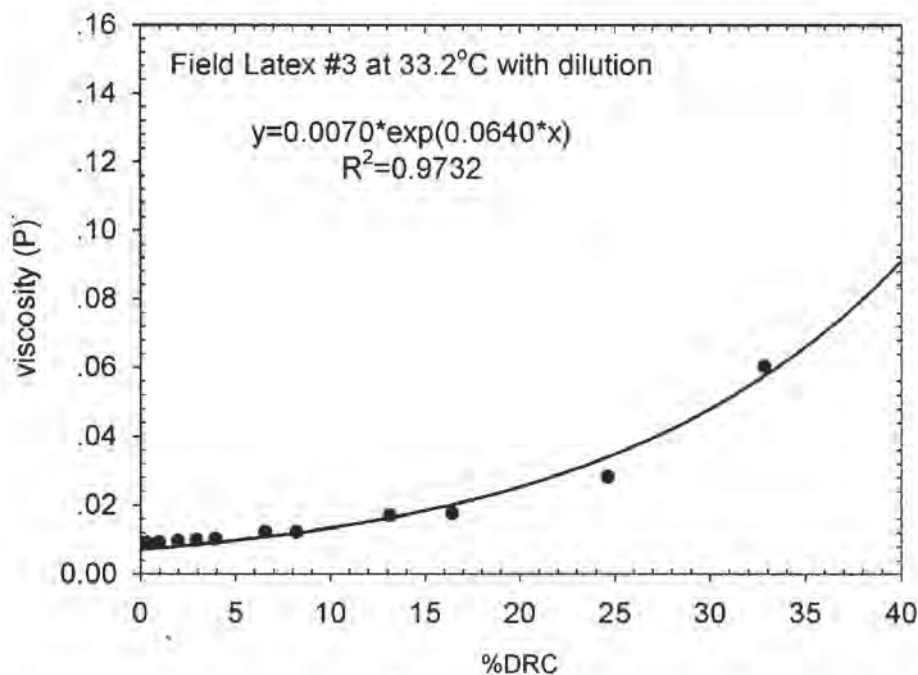
การทดลองสำหรับน้ำยางคราวนี้ ได้มีการเจือจางตัวอย่างเพิ่มขึ้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลของ DRC จากการจับกรดและจากการคำนวณการเจือจางในการทดลองครั้งที่ 3

สัดส่วน น้ำยาง:น้ำ	Viscosity(P)	%DRC จากการ จับด้วยกรด	%DRC จากการ เจือจาง	% ความ แตกต่าง
100:0	0.0604	32.85	32.85	-
75:25	0.0282	25.42	24.64	-3.20
50:50	0.0176	16.01	16.42	2.49
40:60	0.0169	12.87	13.14	2.03
25:75	0.0121	7.44	8.21	9.35
20:80	0.0121	6.41	6.57	2.44
12:88	0.0101	3.26	3.94	17.18

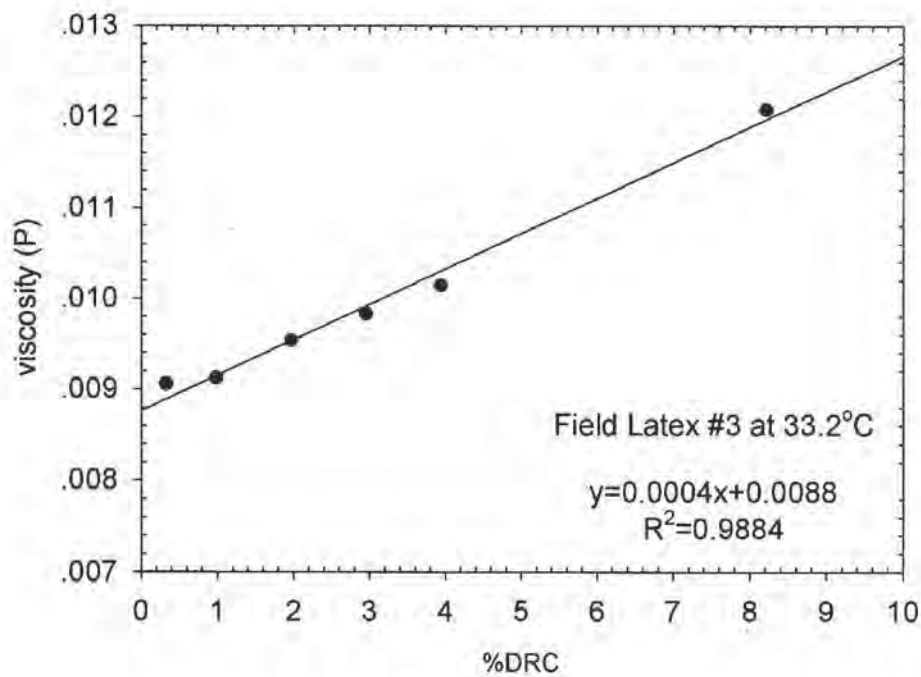
สัดส่วน น้ำยาง:น้ำ	Viscosity(P)	%DRC จากการ จับด้วยกรด	%DRC จากการ เจือจาง	% ความ แตกต่าง
9:91	0.0098	2.84	2.96	4.02
6:94	0.0095	1.63	1.97	17.21
3:97	0.0091	0.77	0.99	21.49
1:99	0.0091	0.25	0.33	22.65

เมื่อนำความสัมพันธ์ของความหนืดและ DRC มาวาดกราฟ ได้ดังรูปที่ 6 พบว่าได้กราฟแตกต่างไปจากเดิมเช่นกัน คราวนี้ได้ปริมาณ DRC เริ่มต้นของน้ำยางสดใกล้เคียงกับคราวแรก แต่การทดลองทำที่อุณหภูมิสูงกว่า (เป็นอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการที่ไม่ได้ติดเครื่องปรับอากาศ) จะเห็นว่าความหนืดมีค่าต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของของเหลวที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดลดต่ำลง



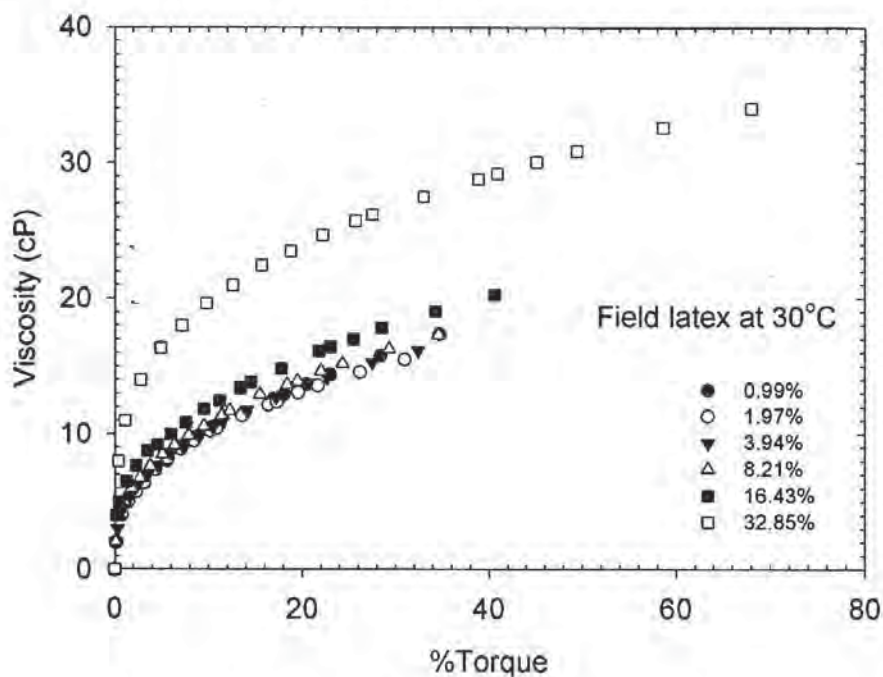
รูปที่ 6 แสดงความหนืดของน้ำยางสดเจือจางเปรียบเทียบกับ DRC (%) ในการทดลองครั้งที่ 3

เมื่อนำผลในช่วงการเจือจางน้ำยางต่อน้ำตั้งแต่ 1:3 ถึง 1:99 มาแสดง จะได้ผลเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงความหนืดในช่วงการเจือจาง 25% ถึง 1%

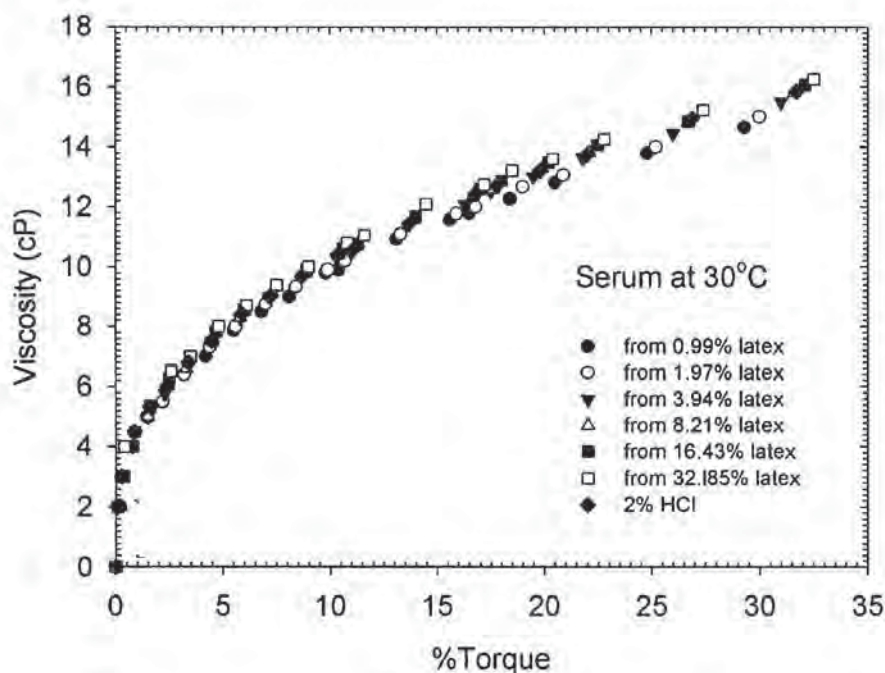
ได้มีการทดสอบความหนืดสำหรับน้ำยางที่มีการเจือจางเปรียบเทียบกับน้ำยางสดโดยใช้ rotational viscometer โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8 ในการทดสอบจะมีการเพิ่มความเร็วจนถึง 200 rpm และวัดความหนืดของน้ำยางเปรียบเทียบกับ %Torque ของเครื่องมือ



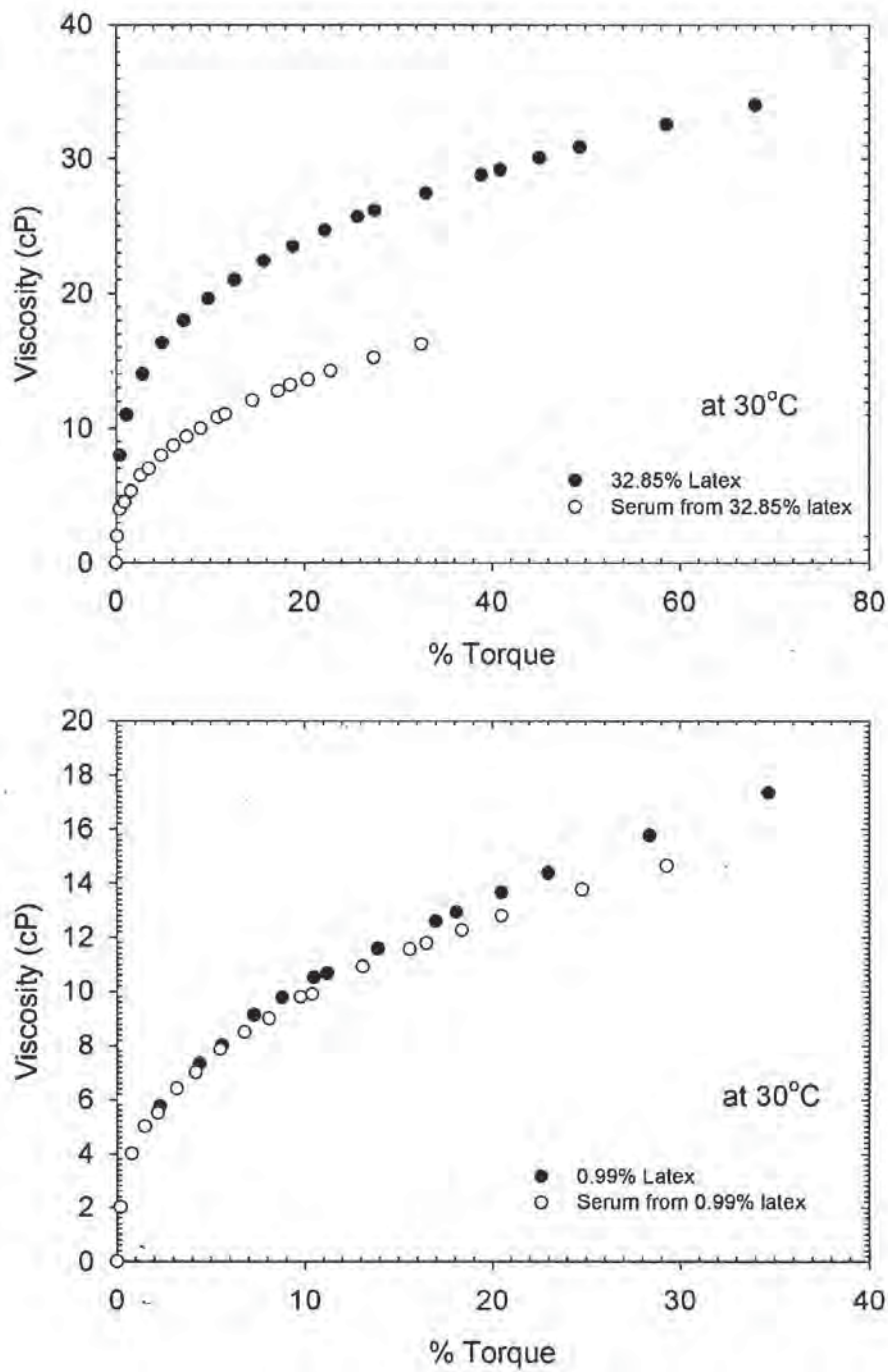
รูปที่ 8 แสดงความหนืดของน้ำยางสดและน้ำยางที่มีการเจือจางโดยเครื่อง rotational viscometer

รูปที่ 8 แสดงให้ชัดเจนว่า ความหนืดของน้ำยางสดมีค่ามากขึ้นเมื่อออกแรงหมุนมากขึ้น (shear stress หรือ torque เพิ่มขึ้น) ซึ่งแสดงพฤติกรรมของของไหลแบบนอนนิวโตเนียน แบบชนิด shear thickening เนื่องจากในการทดสอบ มีการให้ shear rate ที่สูงจึงทำให้น้ำยางแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียนซึ่งจะไม่สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดความหนืดด้วยคาปิลลารีได้ ความหนืดต่ำสุดของน้ำยางสดที่วัดได้ที่ 5 rpm มีค่าเท่ากับ 8 cP หรือ 0.08 P เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ 2 ซึ่งมีค่า DRC ใกล้เคียงกับการทดลองนี้ แต่ทำที่ 30°C ได้ค่าความหนืดเท่ากับ 0.067 P ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน การวัดด้วยวิธีการไหลในท่อคาปิลลารีจึงน่าจะยอมรับได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเจือจางน้ำยางสดจะเห็นว่า เมื่อเจือจางมากยิ่งขึ้น ความหนืดจะลดลง และมีค่าเข้าใกล้กันมากขึ้น ตั้งแต่ DRC ที่ 8.21% ลงไป (หรือการเจือจางด้วยสัดส่วนน้ำยางต่อน้ำเท่ากับ 1:3 ลงไป)

เมื่อนำน้ำเซรัมที่ได้จากการจับยางด้วยกรดสำหรับตัวอย่างที่นำไปทดสอบในรูปที่ 8 ไปวัดความหนืดด้วยวิธีเดียวกันนี้ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 9 จะเห็นว่า น้ำเซรัมซึ่งประกอบไปด้วยของแข็งละลายน้ำกับกรดไฮโดรคลอริกมีพฤติกรรมเป็นแบบนอนนิวโตเนียน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสารละลายนั้นมีความเข้มข้นสูงๆ สำหรับการจับก้อนยางในน้ำยางที่มีการเจือจางในระดับต่างๆ กันพบว่า น้ำเซรัมให้ค่าความหนืดใกล้เคียงกัน ยืนยันผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 1 เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกในการจับก้อนยาง และน้ำเซรัมมีความหนืดใกล้เคียงกับความหนืดของกรดไฮโดรคลอริกนั่นเอง จึงเป็นการยืนยันว่าความหนืดของน้ำเซรัมน่าจะมาจากความหนืดของกรดที่เติมเพื่อจับก้อนยางมากกว่าความหนืดของของแข็งละลายน้ำได้ ซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อย เมื่อนำไปเจือจางยังมีผลของของแข็งละลายน้ำต่อความหนืดน้อยลง



รูปที่ 9 แสดงความหนืดของน้ำเซรัมที่จับก้อนยางด้วยกรดไฮโดรคลอริก



รูปที่ 10 แสดงความหนืดของน้ำยางเปรียบเทียบกับความหนืดของน้ำเซรัมที่ไม่มีการเจือจาง (ภาพบน) และที่มีการเจือจางที่สุด (ภาพล่าง)

รูปที่ 10 เปรียบเทียบความหนืดของน้ำยางสดและน้ำยางที่ผ่านการเจือจางมากที่สุดในกับน้ำเซรัม พบว่าความหนืดของน้ำยางสดมีค่าแตกต่างจากน้ำเซรัมเป็นอย่างมาก และเมื่อเจือจางน้ำยางสดลงทำให้ความหนืดของน้ำยางสดเข้าใกล้ความหนืดของน้ำเซรัมมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงพบว่าความหนืดของกรดไฮโดรคลอริกเจือจางจึงมีค่าใกล้เคียงกับน้ำ ซึ่งได้รายงานไว้ว่ามีค่าประมาณ 0.8088 cP ที่อุณหภูมิ 30°C

(4)การลดขนาดของเครื่องมือ

เพื่อความสะดวกในการทำการทดลอง จึงทำการลดขนาดความสูงของท่อแนวตั้ง แต่ใช้หลอดคาปิลลารีขนาดเท่าเดิม และกำหนดการจับเวลาเพียงสองจุดเท่านั้น จากสมการที่ 8 จะได้ว่า

$$\ln H = \ln H_0 - \frac{t \rho g R_c^4}{4 \eta L R_o^2} \quad (10)$$

หากกำหนดจุดสองจุด คือ H_1 และ H_2 จะได้ความสัมพันธ์กับเวลาดังนี้

$$\ln H_1 = \ln H_0 - \frac{t_1 \rho g R_c^4}{4 \eta L R_o^2} \quad (11)$$

และ

$$\ln H_2 = \ln H_0 - \frac{t_2 \rho g R_c^4}{4 \eta L R_o^2} \quad (12)$$

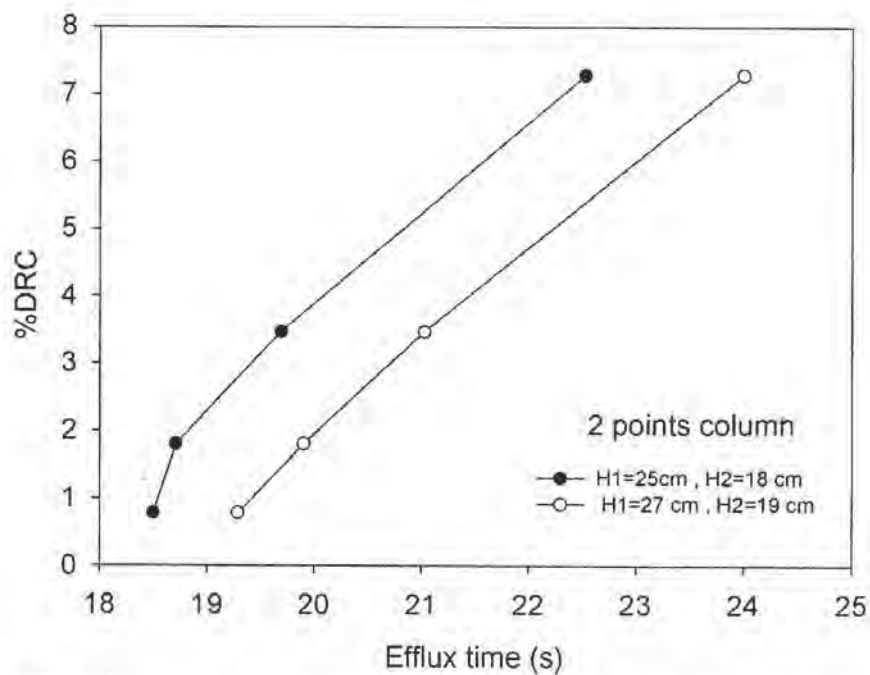
สมการ (11) เมื่อนำมาลบกับสมการ (12) จะได้

$$\ln \frac{H_1}{H_2} = (t_2 - t_1) \frac{\rho g R_c^4}{4 \eta L R_o^2} \quad (13)$$

หรือ

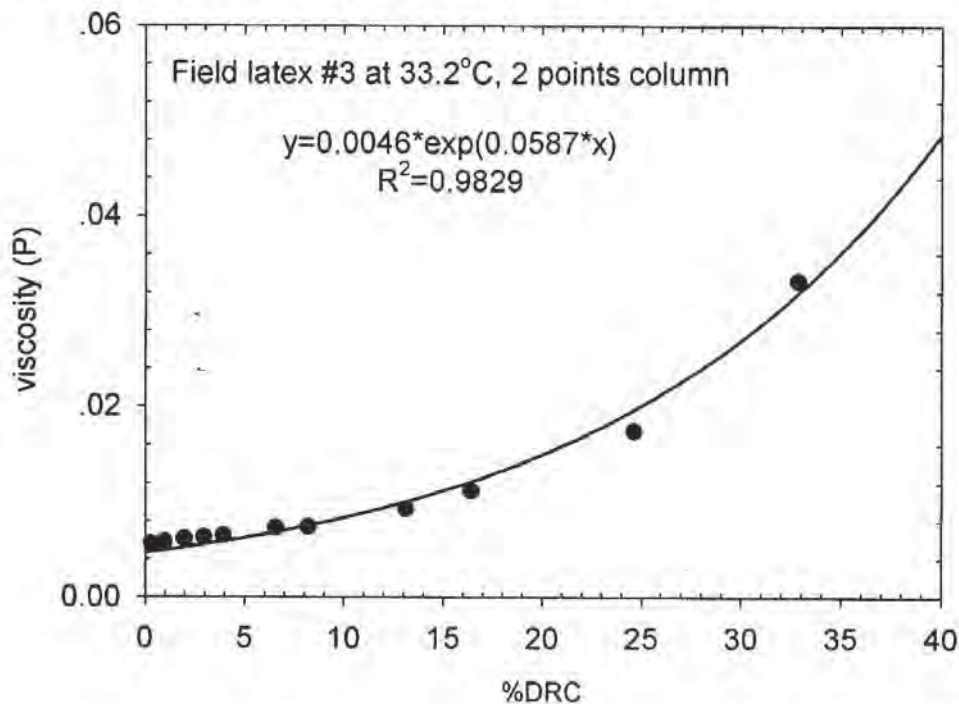
$$\eta = \frac{(t_2 - t_1) \rho g R_c^4}{\ln \frac{H_1}{H_2} 4 L R_o^2} \quad (14)$$

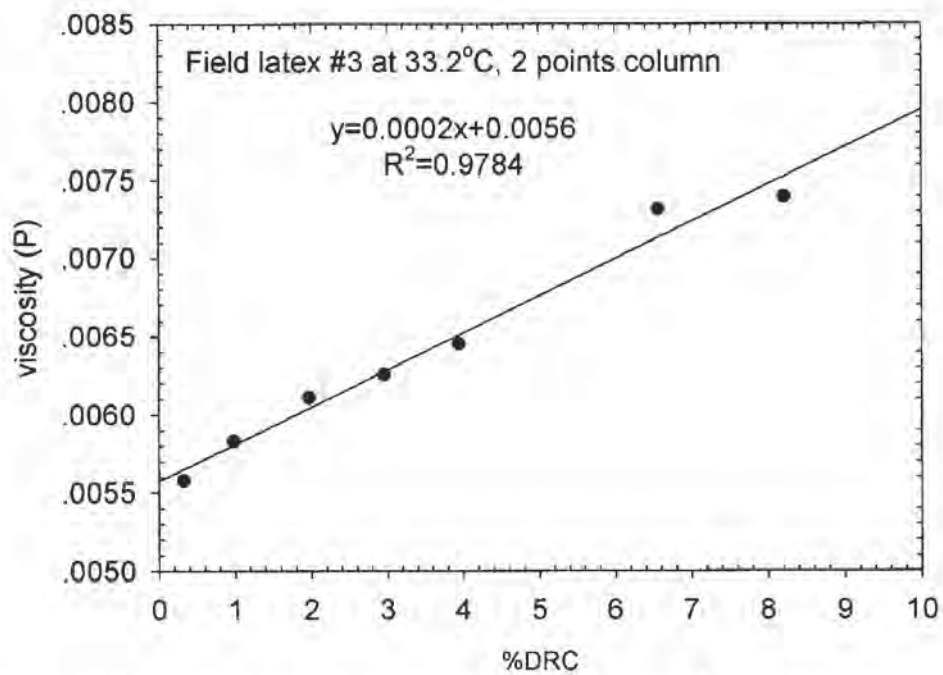
จากสมการที่ (14) แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้การจับเวลาระหว่างจุดสองจุดหรือที่เรียกว่า Efflux time เพื่อใช้หาความหนืดได้ และจากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าความหนืดกับ DRC แปรผันตรงในช่วงของ DRC ต่ำๆ (น้อยกว่า 8%) ดังนั้น Efflux time จึงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับ DRC ได้ในช่วง DRC น้อยกว่า 8% จึงได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่า H_1 และ H_2 และหาความสัมพันธ์ของ Efflux time กับ DRC ดังแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงไม่ว่าจะใช้ระยะเป็นเท่าไรก็ตาม ความเบี่ยงเบนอาจเกิดขึ้นได้จากความผิดพลาดในการเจือจาง ดังจะเห็นจากในรูปสำหรับผลการทดลองที่ $H_1=25$ cm และ $H_2= 18$ cm พบว่าที่จุดที่ DRC ต่ำที่สุดมีความผิดพลาด เบี่ยงเบนจากเส้นตรง



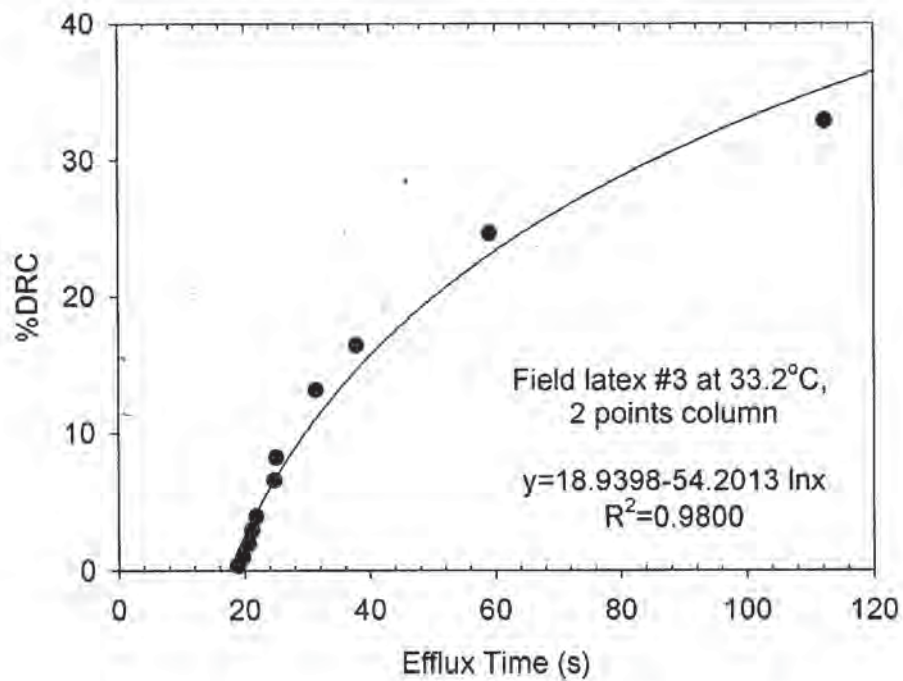
รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของDRC กับ efflux time ในเครื่องวัดความหนืดสองจุด

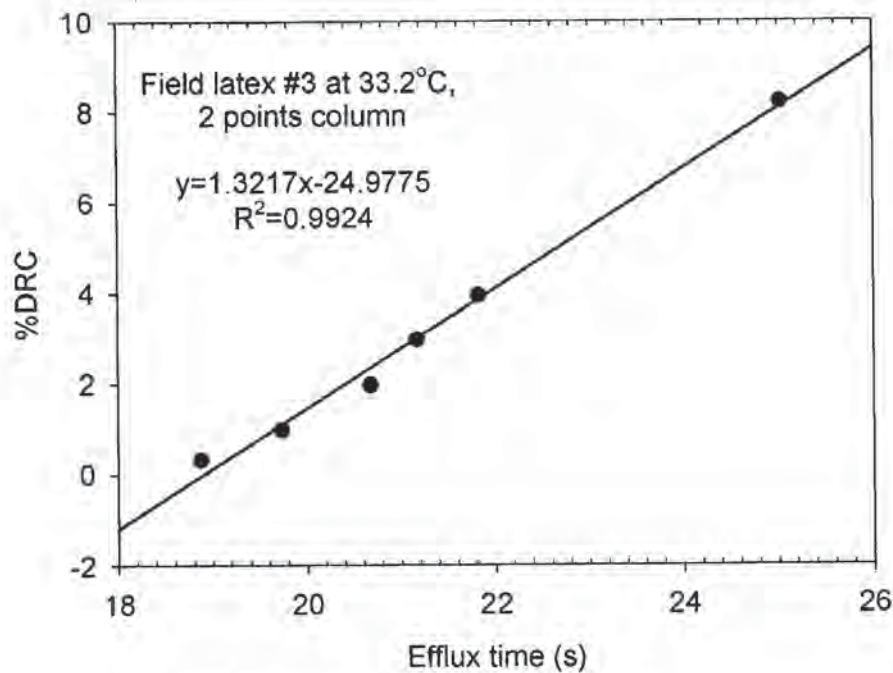
ได้เลือกขนาดของเครื่องมือตั้งนี้คือ $H_1=26$ และ $H_2=18$ แล้วจึงนำไปทดสอบหาความสัมพันธ์ของความหนืดกับ DRC ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 12 ด้านซ้าย และเมื่อตัดผลที่ DRC ที่สูงเกิน 8% ออกไปจะได้ผลดังด้านขวา ได้ผลในทิศทางเดียวกับเมื่อใช้การจับเวลา 5 จุดตลอดช่วงความยาวของท่อในแนวตั้ง ในที่นี้ใช้เพียงสองจุด และจับเวลาของ efflux time ดังนั้นจึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ของ efflux time กับ DRC ได้ดังแสดงในรูปที่ 13





รูปที่ 12 (a) รูปบน แสดงความสัมพันธ์ของความหนืดกับ DRC ของน้ำยางสดและน้ำยางที่เจือจาง (b) รูปล่าง ตัดกราฟให้เหลือเพียงแค่การเจือจางที่ได้ DRC ตั้งแต่ 8% ลงไป





รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของ DRC และ efflux time

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DRC และ Efflux time เพื่อใช้เป็น calibration curve ในการประมาณค่า DRC ของตัวอย่างน้ำยางสดอื่นๆ และเพื่อตัดผลของของแข็งละลายน้ำ จึงการใช้การเจือจางตั้งแต่ 8% ลงไป ซึ่งได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังแสดง

(5) การทดสอบวัดความหนืดของน้ำยางข้น

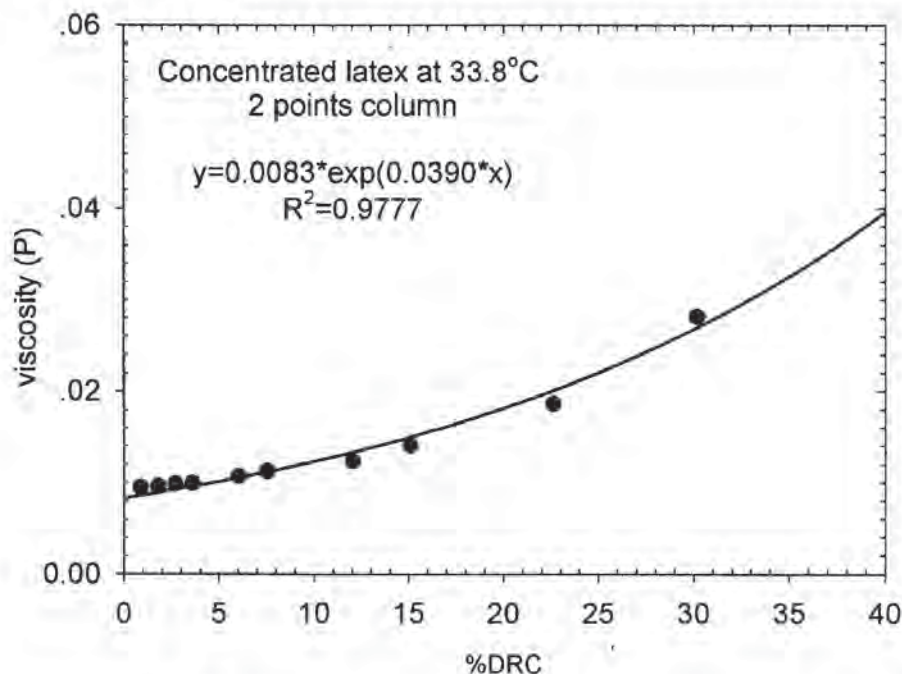
ได้ทดสอบการวัดความหนืดของน้ำยางข้น โดยได้ทดสอบกับน้ำยางข้นซึ่งมี DRC เท่ากับ 60.34% เนื่องจากน้ำยางข้นมีความหนืดสูงมากและเกิดการไหลติดข้างแก้ว จึงไม่สามารถอ่านค่าความสูงได้ถูกต้อง ดังนั้นจึงไม่สามารถทดลองที่ความเข้มข้นของน้ำยางข้นที่ได้รับมาได้ ได้ทดลองเจือจางน้ำยางข้นลงมาให้ใกล้เคียงกับน้ำยางสด และเจือจางด้วยสัดส่วนต่างๆ ดังที่ทดลองกับน้ำยางสด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลของ DRC จากการจับกรตและจากการคำนวณการเจือจางของน้ำยางข้น

สัดส่วน น้ำยาง:น้ำ	Viscosity(P)	%DRC จากการ จับด้วยกรต	%DRC จากการ เจือจาง	% ความ แตกต่าง
100:0	0.0282	30.17	30.17	-
75:25	0.0186	21.48	22.63	5.10
50:50	0.0141	14.74	15.09	2.31
40:60	0.0123	11.29	12.07	6.49
25:75	0.0112	7.37	7.54	2.28
20:80	0.0107	6.20	6.03	-2.69

สัดส่วน น้ำยาง:น้ำ	Viscosity(P)	%DRC จากการ จับด้วยกรด	%DRC จากการ เจือจาง	% ความ แตกต่าง
12:88	0.0099	3.33	3.62	8.11
9:91	0.0098	2.34	2.72	13.67
6:94	0.0096	1.58	1.81	12.46
3:97	0.0095	0.73	0.91	19.25
1:99	0.0094	0.35	0.30	-16.37

เมื่อนำผลของ DRC และความหนืดมาวาดกราฟความสัมพันธ์ ได้ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างน้ำยางชั้นที่เจือจางให้ใกล้เคียงน้ำยางสดและน้ำยางสดในรูปที่ 12

รูปที่ 14 แสดงผลการทดลองของน้ำยางชั้นที่มีการเจือจางความเข้มข้นให้ใกล้เคียงกับน้ำยางสด โดยทดลองวัดความหนืดด้วยการจับเวลาไหลผ่านจุดสองจุดบนท่อแนวตั้ง การทดลองทั้งสองทำที่อุณหภูมิห้องใกล้เคียงกัน หากเปรียบเทียบที่ DRC เท่ากัน จะพบว่าความหนืดของน้ำยางชั้นมีค่าสูงกว่าน้ำยางสด ทั้งนี้เพราะน้ำยางสดเมื่อถูกการปั่นเหวี่ยงจนได้น้ำยางชั้นและหางน้ำยางนั้น อนุภาคขนาดใหญ่จะเป็นส่วนประกอบในน้ำยางชั้นและอนุภาคขนาดเล็กจะเป็นส่วนประกอบในหางน้ำยาง Rippel และคณะ (2003) ได้ศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติที่อยู่ในน้ำยางชั้น (cream rubber) และที่อยู่ในหางน้ำยาง (skim rubber) พบว่าอนุภาคยางในน้ำยางชั้นมีขนาดประมาณ 467 nm ใหญ่กว่าอนุภาคยางในหางน้ำยางคือ 297 nm ดังนั้นในน้ำยางสดจึงมีการกระจายตัวของอนุภาคยางในแบบ bimodal ซึ่งก็ให้ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคน้อยกว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคในน้ำยางชั้นแน่นอน อย่างไรก็ตามพฤติกรรม的增加ของความหนืดเมื่อ DRC เพิ่มขึ้นในแบบ exponential ได้แสดงให้เห็นทั้งในน้ำยางชั้นและน้ำยางสด และสามารถตัดกราฟในช่วง DRC ต่ำกว่า 8% เพื่อให้ได้กราฟเส้นตรงได้เช่นเดียวกัน

(6)การทดสอบการหา DRC ของตัวอย่างน้ำยางสดที่เจือจางโดยใช้ความสัมพันธ์ที่หาได้

ได้ทดสอบการเจือจางตัวอย่างน้ำยางและหาค่าโดยใช้กราฟรูปที่ 13 ด้านขวา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 33.8° C ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้ข้อมูลของกราฟรูปที่ 13 จึงน่าจะใช้ในการประมาณได้ถูกต้อง ได้เตรียมการเจือจางไว้ที่ 5%-10% และได้ทดลองตรวจสอบกลับว่าได้ค่า DRC ใกล้เคียงกับที่เตรียมไว้หรือไม่ ได้ผลดังตารางที่ 5 ซึ่งจะเห็นว่ามีเพียง 3 ตัวแรกเท่านั้นที่ใกล้เคียง นอกนั้นค่าที่ประมาณได้ห่างไกลจาก DRC ที่คาดว่าจะได้ เป็นจึงเป็นการตรวจสอบให้เห็นถึงข้อจำกัดของการเจือจาง ดังนั้นในการนำไปใช้งาน ควรจะใช้สัดส่วนการเจือจางที่สูงที่สุดที่ยังคงทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง DRC และ เวลาเป็นกราฟเส้นตรงได้

ตารางที่ 5 แสดงการทำนาย DRC เปรียบเทียบกับค่าที่เตรียม

Efflux time (s)	Standard deviation	Predicted %DRC	Prepared %DRC	% Difference
26.52	0.27	10.078	10.000	-0.78
25.80	0.44	9.127	9.500	3.93
25.71	0.11	8.999	9.000	0.01
24.54	0.15	7.461	8.500	12.22
24.52	0.19	7.426	8.000	7.17
23.17	0.26	5.651	7.500	24.66
22.43	0.31	4.664	7.000	33.37
21.99	0.06	4.087	6.500	37.13
21.98	0.21	4.069	6.000	32.18
21.77	0.16	3.800	5.500	30.90
20.68	0.21	2.351	5.000	52.98

หากวิเคราะห์ผลของความผิดพลาด จะพบว่าค่าการเจือจางที่มากขึ้น จะทำให้ค่าที่ประมาณได้แตกต่างจาก DRC ที่ควรจะเป็นมากยิ่งขึ้นได้ เนื่องจากความผิดพลาดในการทดลองจะมีผลกระทบมากกว่า เช่น การเตรียมน้ำยางปริมาณน้อยๆ เพื่อการเจือจาง หากผิดพลาดจะทำให้ค่า DRC ที่ได้ผิดพลาดมากกว่าเมื่อต้องการเตรียมให้ได้ DRC สูง เมื่อวิเคราะห์ค่า standard deviation ของการจับเวลา 3 ครั้งในตารางที่ 5 พบว่า หากค่า efflux time เบี่ยงเบนไปในช่วง 0.06 s ถึง 0.44 s จะทำให้ค่า DRC เปลี่ยนแปลงไป 0.08-0.58% และในการทำ calibration ของกราฟรูปที่ 13 เองก็มีค่า standard deviation ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่า standard deviation ของการสร้างกราฟ calibration

DRC	efflux time เฉลี่ย	standard deviation
32.85	112.32	1.86
25.42	59.14	1.07
16.01	37.83	1.52
12.87	31.36	0.07
7.44	25.03	0.35
6.41	24.75	0.04
3.26	21.83	0.06
2.84	21.17	0.03
1.63	20.68	0.29
0.77	19.74	0.02
0.25	18.88	0.09

นอกจากนี้ยังพบว่าอายุของน้ำยางมีผลต่อค่า DRC โดย โดยทดสอบกับน้ำยางชุดเดียวกัน แต่ทั้งน้ำยางไว้สอง สัปดาห์พบว่าค่า DRC เปลี่ยนไปจาก 37.152 เป็น 36.53% ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่โปรตีนหรือฟอสโฟไลปิดที่เคลือบอนุภาค ยางอยู่สลายตัวมาอยู่ในน้ำแทนทำให้ค่า DRC ลดต่ำลง ซึ่งจะมีผลต่อค่าความถูกต้องของการทำการทดลอง

นอกจากนี้ได้ลองทดสอบการไหลของน้ำผสมแป้งข้าวโพดโดยเตรียมแป้งข้าวโพดปริมาณเท่ากับน้ำยางสดคือ 28.78% และเปรียบเทียบกับน้ำผสมน้ำแป้งข้าวโพดกับน้ำยางสดในสัดส่วน 1:1 โดยปริมาตร ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7 โดยใช้เครื่องวัดความหนืดที่จับเวลาในการไหลผ่าน 5 จุด

ตารางที่ 7 ผลเปรียบเทียบเวลาที่ไหลผ่าน 5 จุดของน้ำยางสดและน้ำยางสดผสมน้ำแป้งข้าวโพด

H (cm)	Time (s)		
	น้ำยางสด	น้ำแป้ง	น้ำยางผสมน้ำแป้ง
54.2	38.4	10.32	9.5
49.2	77.22	21.25	19
44.2	138.81	37.47	34.65
37.2	251.34	65.93	62.97
27.2	444.72	105.28	101.09

จากผลการทดลองในตารางที่ 7 พบว่า การไหลของน้ำยางสดกับน้ำแป้งที่สัดส่วนของแข็งใกล้เคียงกันนี้ให้ผลของ ความหนืดแตกต่างกันชัดเจน เมื่อคำนวณโดยสมการที่ 8 แล้วพบว่าความหนืดของน้ำยางสดมีค่าเท่ากับ 0.1268 P ส่วน ความหนืดของน้ำแป้งมีค่าเท่ากับ 0.0179 P ซึ่งใกล้เคียงกับความหนืดของน้ำยางสดผสมน้ำแป้งที่สัดส่วน 1:1 คือ 0.0174 P ดังนั้นอาจมีความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคนี้ไปตรวจการผสมแป้งในน้ำยาง

6) สรุปผลการวิจัย

จากพฤติกรรมการไหลของน้ำยางสดและน้ำยางสดที่เจือจางพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและ DRC ในลักษณะ exponential ซึ่งจากงานวิจัยในการทำวารสารปริทัศน์พบว่า หากสารแขวนลอยมีความเข้มข้นมากจะเกิดผลเนื่องจากแรงกระทำของอนุภาคด้วยตัวเอง และอาจเกิดผลจากการไหลเบียดกันทำให้รูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนไปจากทรงกลม ซึ่งเป็นรูปร่างที่สมมติตามทฤษฎีไปอย่างมาก ทำให้สมการอธิบายได้คลาดเคลื่อน นอกจากนี้หากน้ำยางข้นเกินไป การไหลผ่านคาปิลลารีจะทำให้เกิดเนื้อยางติดที่ข้างหลอดส่งผลต่อค่าที่คลาดเคลื่อน และต้องทำความสะอาดหลอดอย่างยากลำบาก ดังนั้นการเจือจางน้ำยางอาจเป็นส่วนสำคัญสำหรับการตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่า การเจือจางน้ำยางจะทำให้เกิดความผิดพลาดมากยิ่งขึ้นหากเจือจางมากขึ้น เนื่องจาก ความผิดพลาดจากการเตรียมน้ำยางปริมาณน้อยๆ เมื่อผิดพลาดก็จะส่งผลต่อค่าที่ได้อย่างมาก และพบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนืดและ DRC จะอยู่ในช่วงที่เจือจางน้ำยางลงมาถึง 8% และต่ำกว่า ดังนั้นในการตรวจวัดที่เหมาะสมน่าจะใช้ค่า DRC ที่มากที่สุดที่ยังคงให้พฤติกรรมเป็นเส้นตรงอยู่ เพื่อลดผลความผิดพลาดจากการเจือจางและความหนืดของของแข็งละลายน้ำ ซึ่งพบว่าเมื่อเจือจางให้ DRC เป็น 8% ผลของกระแทกของของแข็งละลายน้ำสามารถตัดทิ้งได้ โดยยืนยันผลด้วยการวัดความหนืดด้วย rotational viscometer และจากความสัมพันธ์ของความหนืดกับ DRC สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ของความหนืดกับเวลาในการไหลผ่านจุดสองจุด หรือ Efflux time ได้

นอกจากนี้ ยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (หรือเวลา Efflux time) กับ DRC คือ อุณหภูมิของอากาศ ซึ่งจะทำให้ได้กราฟเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังมีผลของการ preserve น้ำยางด้วยแอมโมเนีย ซึ่งมีผลต่ออายุของน้ำยางตามมา จึงจำเป็นต้องหาวิธีในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

7) ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง DRC และความหนืดในการหาปริมาณ DRC ในน้ำยางสด อย่างไรก็ตามพบว่า ปัจจัยเรื่องอุณหภูมิของอากาศที่ทำการตรวจวัด และอายุของน้ำยางมีผลต่อการหาปริมาณดังกล่าว จึงควรต้องมีการศึกษาที่ครอบคลุมและรัดกุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาในพื้นที่ที่ใช้งานจริง เพราะจะได้ น้ำยางสดที่สดจริง และมีตัวอย่างน้ำยางสดให้ทำการทดลองทุกวัน เพื่อเก็บเป็นสถิติถึงผลของอุณหภูมิของอากาศ และนำมาสร้างเป็นกราฟมาตรฐานในการแปลค่า DRC ตามอุณหภูมิ

นอกจากนี้อาจจำเป็นต้องศึกษาโดยละเอียดถึงผลของขนาดของอนุภาคยางต่อความหนืด ซึ่งยางแต่ละสายพันธุ์จะให้ลักษณะของยางแตกต่างกัน รวมถึงการตรวจสอบผลของการเจือจางต่อค่า zeta potential ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกประจุของอนุภาคยาง ควรทดสอบดูว่ามีผลของประจุต่อค่าความหนืดหรือไม่อย่างไร หากนำอุปกรณ์ไปใช้เฉพาะที่ ซึ่งจะเป็นการตัดตัวแปรของขนาดอนุภาค หรือทราบค่า zeta potential มีความสัมพันธ์กับ DRC หรือปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางเช่นไร น่าจะสามารถดัดแปลงอุปกรณ์ให้ใช้งานเฉพาะบริเวณนั้นได้

สำหรับการทดสอบการเจือจางนั้น ไม่ควรทำเฉพาะจุดที่เจือจางลงมา แต่ควรคำนวณกลับไปหาน้ำยางสดตั้งต้น เพื่อเปรียบเทียบกับค่าเดิม

8) เอกสารอ้างอิง

Amnuaypanich, S., El-Aasser, M. S., Daniels, E.S., and Silebi, C.A., "Effects of dissolved polymer on the transport of colloidal particles through a microcapillary", J. Colloid and Interface Sci. 311, 77-88 (2007)

Bird, R.B., Stewart, W.E., and Lightfoot, E.N., "Transport Phenomena", second edition, John Wiley and Sons, Inc, New York

Hernandez, F.J., Ayacar-Rubio, M.F., Velazquez-Navarro, J.F., and Galindo-Rosales, F.J., "intrinsic viscosity of SiO_2 , Al_2O_3 and TiO_2 aqueous suspensions", *J. Colloid and Interface Sci.* 298, 967-972 (2006)

Lin, H-Y., and Lai, L.-S., "Isolation and viscometric characterization of hydrocolloids from mulberry (*Morus alba* L.) leaves", *Food Hydrocolloids* 23, 840-848 (2009)

Olivares, M.L., Peirotti, and M.B., Deiber, J.A., "Analysis of gelatin chain aggregation in dilute aqueous solutions through viscosity data", *Food Hydrocolloids* 20, 1039-1049 (2006)

Rippel Marcia M., Lee Lay-Theng, Leite Carlos A. P., Galembeck Fernando. (2003) Skim and cream natural rubber particles: colloidal properties, coalescence and film formation. *Journal of Colloids and Interface Science*, 268, 330-340

Snarbe, P., and Mills, P., "Rheology of concentrated suspensions of viscoelastic particles", *Colloids and Surfaces A*. 152, 79-88 (1999)

ภาคผนวก

คำชี้แจงรายละเอียดโดยนักวิจัย ต่อข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

ความเห็นด้านการพิมพ์

ได้ทบทวนและเรียบเรียงลำดับการนำเสนอใหม่ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

ความเห็นด้านวิชาการ

1. ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำหนังสือ Polymer Latex Science and Technology 2nd Vol.2 ของ Blackley เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง แต่ผู้วิจัยยังไม่สามารถหาหนังสือเล่มนี้ได้ในห้องสมุดของมหาวิทยาลัย ในอนาคตจะดำเนินการปรับปรุงเพื่อใช้ในการเขียนบทความวิชาการที่มีประโยชน์ต่อการนำทางต่อไป
2. ได้แก้ไขการใช้คำผิดทั่วทั้งรายงานและรูปภาพแล้ว
3. แก้ไขในช่องแรกของทุกตารางเป็น สัดส่วนของน้ำยางต่อน้ำ
4. การเขียนข้อมูลในตารางได้แก้ไขแล้ว น้ำยาง 1:0 หมายถึงน้ำยางทั้งหมด ไม่ได้มีส่วนผสมของน้ำเลย
5. ได้เพิ่มเติมวิธีการเจือจางที่เสนอโดยผู้ทรงคุณวุฒิในรายงานหน้า 22 แล้ว
6. เหตุผลของการหาความหนืดของน้ำเซรัมได้ให้ไว้ในหน้า 9 เนื่องจากน้ำยางประกอบด้วยของแข็งที่ละลายน้ำด้วยการหาความหนืดของน้ำเซรัมเพื่อยืนยันว่าการเจือจางมีผลต่อความหนืดอันเกิดจากส่วนที่เป็นของแข็งที่ละลายน้ำอย่างไร พบว่าเมื่อมีการเจือจางน้ำยางลง ความหนืดของน้ำเซรัมที่ได้จะใกล้เคียงกับความหนืดของกรดที่ใช้มากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นความหนืดของของแข็งที่ละลายน้ำน่าจะมีผลน้อยเมื่อเทียบกับความหนืดของอนุภาคยาง
7. ในเบื้องต้นนั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองหา %DRC ด้วยวิธีมาตรฐาน แต่เมื่อเจือจางน้ำยางลง กรดซัลฟิวริก หรือ กรดอะซิติกกลับจับยางได้ไม่ดีนัก ยางไม่รวมตัวเป็นก้อนใหญ่ทำให้กรองเก็บเนื้อยางได้ยาก จึงเปลี่ยนไปใช้กรด HCl แทน
8. ได้ตรวจสอบ ISO ที่ใช้หา DRC แล้ว มีการระบุว่าหากเติมกรดอะซิติกแล้วยังพบว่ายางไม่รวมเป็นก้อนและน้ำยางยังมีลักษณะขุ่นให้เติมเอธิลแอลกอฮอล์ลงไป ผู้คุณวุฒิแนะนำให้อ้างอิงจากคู่มือการทดสอบคุณภาพน้ำยางของกรมวิชาการเกษตรที่ในวงการอุตสาหกรรมน้ำยางทั่วไปใช้กัน และให้ศึกษาข้อมูลกรดที่แนะนำให้ใช้ในการจับตัวยางเพื่อหา DRC ด้วยเพื่อให้ทราบเหตุผลของการใช้กรดเหล่านั้น เป็นคำแนะนำที่ควรนำไปปฏิบัติเพื่อปรับเปลี่ยนวิธีการทดลองในอนาคต
9. เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกและกรดอะซิติกจับก้อนยางในน้ำยางที่เจือจางด้วยสัดส่วนของน้ำมากๆ ไม่สามารถจับก้อนยางชิ้นเล็กๆ รวมกันได้ และกรองลำบาก แต่เมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกแทนสามารถทำได้ง่ายกว่า
10. สมการที่วาดเทียบกับผลการทดลองนั้น ใช้การ fit ด้วยสมการเอ็กโพเนนเชียลซึ่งได้แนวคิดมาจากการพัฒนาสมการความหนืดที่กล่าวถึงในส่วนของทฤษฎี อย่างไรก็ตาม นั่นคือ $\eta = \eta_0 \exp(k * \%DRC)$ เมื่อ ในที่นี้ η_0 จึงหมายถึงความหนืดเมื่อค่า %DRC=0 หรือความหนืดของน้ำนั่นเอง และค่า k นั้นจะขึ้นกับสภาวะของสารแขวนลอย เช่น อุณหภูมิ สภาวะความเป็นกรดด่างของน้ำยาง ขนาดของอนุภาคยาง รวมถึง ความเสถียรของอนุภาคยางในทางน้ำยาง เป็นต้น ซึ่งยากในการตีความในการทดลองต่างๆ
11. เห็นด้วยกับผู้ทรงคุณวุฒิที่ว่าการแปร %DRC ลงไปที่ค่าต่ำๆ จะเกิดความผิดพลาดได้ง่าย และได้อภิปรายในผลการทดลองแล้ว
12. ได้ทำเครื่องมือให้มีขนาดเล็กลงเพื่อสะดวกในการทำการทดลองมากยิ่งขึ้น

13. ได้ทดสอบเบื้องต้นถึงความแตกต่างของค่าความหนืดของน้ำยางสด และน้ำแป้ง รวมถึงเมื่อนำน้ำแป้งและน้ำยางสดผสมเท่าๆ กัน พบว่ามีความเป็นไปได้ในการบอกความแตกต่างระหว่างน้ำยางสดกับน้ำแป้ง
14. จากการสอบถามกับทางโรงงานพบว่า น้ำยางสดที่นำมาทดลองนี้มีการเติมแอมโมเนียประมาณ 12-15% แต่ไม่ได้มีการตรวจสอบก่อนทำการทดลองในแต่ละครั้ง ตามความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิการ preserve ด้วยแอมโมเนียแตกต่างกันน่าจะมีผลต่อการวัดความหนืด ผู้วิจัยเห็นพ้องด้วยจึงได้ใส่ไว้ในข้อเสนอแนะแล้ว
15. ผู้วิจัยคาดว่าอายุของน้ำยางจะมีผลต่อการทำการทดลอง ตามความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิเกี่ยวกับการ preserve ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของน้ำยางน่าจะเป็นเหตุเบื้องต้น ซึ่งเป็นคำแนะนำที่มีประโยชน์มากในการควบคุมน้ำยางก่อนทำการทดสอบความหนืด สำหรับการปรับปรุงการทดลองต่อไปในอนาคต