

# ความหนืดกับการควบคุมคุณภาพงาน หล่อสำลิตทางเซรามิก

ดร. ลดา พันธุ์สุขุมธนา

**ค**วามหนืด (viscosity) ของน้ำสลิตคือความสามารถของน้ำสลิตในการต้านทานการไหล (flow) เมื่อมีแรงกระทำจากภายนอก ความหนืดของน้ำสลิตจึงเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของการศึกษาทางด้านรีโอโลยี (rheology) ซึ่งสะท้อนถึงสมบัติของตัวอย่างในสภาพรวมอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากสมบัติในระดับอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างนั้น สมบัติในระดับอนุภาคที่สำคัญดังกล่าวได้แก่ ปริมาณ รูปร่าง ขนาด และปฏิกริยาระหว่างกันของอนุภาค เนื่องจากสมบัติเหล่านี้มีผลต่อเนื่องถึงการจัดเรียงตัวของอนุภาคระหว่างการหล่อสำลิตขึ้นรูปหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่หล่อ ในอุตสาหกรรมเซรามิกจึงได้มีการวิเคราะห์หรือทดสอบความหนืดเพื่อควบคุมคุณภาพการขึ้นรูปโดยวิธีหล่อสำลิต เพื่อเป็นการชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการวิเคราะห์และการทดสอบความหนืด จึงได้รวบรวมความหมายเบื้องต้นและตัวอย่างสมบัติของอนุภาคที่มีผลเกี่ยวข้องกับความหนืดไว้ในบทความนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการนำข้อมูลไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานผลิตหรืองานวิจัยต่อไป

วิธีการพื้นฐานในการหาค่าความหนืดของน้ำสลิต ได้แก่ ใส่แรงกระทำในลักษณะของแรงเฉือนไปในทิศทางเดียวกันลงในตัวอย่างแล้วประเมินหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแรงเฉือน (shear stress) และอัตราการเฉือน (shear rate) คูรูปประกอบที่ 1 ความหนืดของสลิตคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ความหนืด} = \frac{\text{แรงเฉือน}}{\text{อัตราการเฉือน}}$$

หรือหาได้จากความลาดชัน (slope) ของกราฟระหว่างแรงเฉือนและอัตราการเฉือน

ในเชิงปฏิบัติวิธีการวิเคราะห์และการทดสอบความหนืดสามารถกระทำได้หลายวิธี โดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการวัด เช่น การวัดความหนืดที่อัตราการเฉือนหรือแรงเฉือนคงที่และไม่คงที่ และการวัดความหนืดที่เวลาต่างๆ กัน การวิเคราะห์และทดสอบความหนืดของน้ำสลิตด้วยวิธีที่แตกต่างกันจักให้ข้อมูลที่ต่างกันออกไป สามารถนำมาใช้ประกอบกันเพื่อศึกษาหาสมบัติของน้ำสลิตที่มีผลกระทบต่อการขึ้นรูปดังตัวอย่างที่จะได้กล่าวต่อไป

การทดสอบความหนืดที่อัตราการเฉือนไม่คงที่ ได้แก่การทดสอบความหนืดที่อัตราการเฉือนต่างๆ กัน อัตราการเฉือนมีผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคในน้ำสลิตซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าความหนืด การทดสอบโดยวิธีนี้สามารถใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมไหล (flow behavior) ของน้ำสลิต โดยทั่วไปพฤติกรรมไหลของน้ำสลิตสามารถจำแนกได้ 4 ประเภทใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 คือ

1. นิวโตเนียน (Newtonian)
2. ซูโดพลาสติก (Pseudoplastic)
3. ไดลาแทนต์ (Dilatant)
4. บิงแฮมพลาสติก (Bingham plastic)

การไหลแบบนิวโตเนียนคือ การไหลที่ความหนืดมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือนน้ำซึ่งเป็นตัวกลางสำคัญสำหรับการเตรียมน้ำสลิตที่มีพฤติกรรมไหลในลักษณะนี้ การเติมดินหรือวัตถุดิบอื่นลงไปในน้ำเพื่อเตรียมน้ำสลิตทำให้พฤติกรรมไหลเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและปริมาณของอนุภาคที่ถูกเติมลงไป

การไหลแบบซูโดพลาสติกคือ การ

ไหลในลักษณะที่ความหนืดมีค่าไม่คงที่และแปรตามอัตราการเฉือนกล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน ความหนืดของน้ำสลิตจะลดลง การไหลชนิดนี้พบโดยทั่วไปในน้ำสลิตที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีรูปร่างไม่สมมาตร (asymmetric) มีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีทิศทางที่แน่นอน (random) หรือมีการรวมตัวเกาะกันเป็นกลุ่มอนุภาค (agglomerate) ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้อนุภาคมีการจัดเรียงตัวใหม่ มีผลทำให้ปริมาณน้ำจำนวนหนึ่งซึ่งเดิมถูกกักเก็บ (immobilize) ให้อยู่ภายในกลุ่มอนุภาคถูกปลดปล่อยออกมา ช่วยหล่อลื่นในการไหลของระบบเป็นผลให้ความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนการแตกตัวของกลุ่มอนุภาคมีเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดสามารถลดลงได้อีก พฤติกรรมไหลประเภทนี้เป็นที่ต้องการสำหรับน้ำสลิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก เนื่องจากช่วยให้การถ่ายเทน้ำสลิตเพื่อการหล่อขึ้นรูปทำได้ด้วยดี การไหลอีกประเภทที่มีลักษณะคล้าย ซูโดพลาสติก แต่เนื่องจากโครงสร้างเบื้องต้นของน้ำสลิตมีความแข็งแรงมากกว่า แรงที่มากระทำจึงต้องสูงถึงปริมาณหนึ่งก่อนจึงจะทำให้เกิดการไหล การไหลประเภทนี้เรียกว่า บิงแฮมพลาสติก

การไหลแบบไดลาแทนต์คือ การไหลที่ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น การไหลชนิดนี้มักพบในน้ำสลิตที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (มากกว่า 10 ไมโครเมตร) อนุภาคมีรูปร่างกลม และมีการกระจายตัวในระบบดี ดังนั้นในระบบนี้อนุภาคมีการจัดเรียงตัวค่อนข้างหนา (well pack) ระบบจึงมีปริมาณน้ำในจำนวนจำกัดซึ่งเพียงพอสำหรับการไหล เมื่อมีแรงมากระทำอนุภาคเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่มีความหนาแน่นลดลง ทำให้มี



ปริมาณน้ำจำนวนหนึ่งถูกกักอยู่ในกลุ่มอนุภาค เป็นผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น น้ำสลิปที่มีการไหลแบบไบลาเทนต์ไม่เป็นที่ต้องการในงานหล่อน้ำสลิปเพราะจะทำให้เกิดปัญหาในการถ่ายเทน้ำสลิปได้

พฤติกรรมกรการไหลที่อัตราการเฉือนต่าง ๆ ยังให้ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการขึ้นรูปชนิดอื่นที่เกี่ยวข้องกับน้ำสลิป ดังเช่นการ เติร์มเม็ด วัตดูติบ (granule) สำหรับงานอัดด้วยวิธีสเปรย์ แล้วทำให้แห้ง (spraydrying) น้ำสลิปจะถูกพ่นกระจายออกเป็นเม็ดโดยจะถูกกระทำด้วยแรงเฉือนที่สูงถึง  $10^3 - 10^5$  วินาที<sup>-1</sup> ดังนั้นน้ำสลิปที่ใช้ไม่ควรมีความหนืดไบลาเทนต์ที่แรงเฉือนดังกล่าว เนื่องจากการเพิ่มความหนืดเมื่อแรงเฉือนสูงขึ้นอาจทำให้เกิดการอุดตันของหัวฉีด เกิดเป็นปัญหาในการผลิตได้

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่าคุณลักษณะและขนาดของอนุภาคมีผลต่อการจัดเรียงตัวและทำให้พฤติกรรมกรการไหลของน้ำสลิปเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการคัดเลือกรูปร่าง ขนาด และปริมาณของวัตดูติบ จาก การเลือกชนิดหรือประเภท และขบวนการ เติร์มวัตดูติบที่มีผลกระทบต่อคุณลักษณะ หรือขนาดของอนุภาคดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงพฤติกรรมกรการไหลของน้ำสลิปได้ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลง ส่วนผสมของวัตดูติบดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาด้วย นอกจากการปรับปรุงทางด้านวัตดูติบแล้ว การเพิ่มสารชนิดอื่นที่มีผลต่อปฏิกิริยาระหว่างกันของอนุภาคและการจัดเรียงตัวของอนุภาค เช่น สารช่วยลอยตัว (deflocculant) ก็สามารถทำให้พฤติกรรมกรการไหลเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นการเลือกชนิดและ ปริมาณสารช่วยลอยตัวที่เหมาะสมก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงพฤติกรรมกรการไหลตัวของน้ำสลิป

การทดสอบความหนืดที่อัตราการเฉือนคงที่ เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจหา บัญญัติต่างๆ ที่มีผลต่อการไหลของน้ำสลิป ดังเช่นการใช้วิธีการทดสอบนี้เพื่อการศึกษาหา ชนิดและปริมาณของสารช่วยลอยตัวที่ เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป การทดสอบนี้ ทำได้โดยการวัดความหนืดที่อัตราการเฉือนที่ ตั้งไว้คงที่ โดยบันทึกค่าความหนืดแบบจุด

เดียวภายในเวลาที่กำหนด ความหนืดจะถูก บันทึกที่ปริมาณสารช่วยลอยตัวต่างๆ กัน ตัวอย่างผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3 เรียก การทดสอบนี้ว่าการทำ deflocculation curve การเพิ่มปริมาณสารช่วยลอยตัวในน้ำสลิปจะ ลดความหนืดของน้ำสลิปลงตามลำดับจนถึง จุดหนึ่ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารช่วยลอยตัว จะมีผลต่อความเสถียร (stable) หรือสมบัติ การกระจายตัวของอนุภาค กล่าวคือหาก สารช่วยลอยตัวที่ใช้เป็นประเภทที่สามารถ แยกตัวให้ประจุในตัวกลางที่ใช้ เช่น น้ำ การเพิ่มสารช่วยลอยตัวจะเพิ่มปริมาณประจุไฟฟ้า รวมของระบบ โดยปกติอนุภาคของวัตดูติบจะ เกิดปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดเป็นประจุบนผิว ประจุบนผิวอนุภาคนี้สามารถดึงดูด ไอออน หรือโมเลกุลของประจุที่ต่างกันในระบบเข้ามา ใกล้ ในขณะที่เดียวกันก็จะผลักไอออนหรือ โมเลกุลของประจุที่เหมือนกันให้ห่างออกไป จากผิว เป็นผลทำให้เกิดความต่างศักย์ ระหว่างประจุบริเวณรอบๆ กับบริเวณ ใกล้เคียงกับอนุภาค เมื่ออนุภาคเคลื่อนเข้า ใกล้กันจะเกิดการซ้อนกันของประจุเหมือน เกิดเป็นแรงผลักทำให้อนุภาคแยกออกจากกัน ในขณะที่เดียวกันตัวอนุภาคเองก็มีแรงดึงดูดซึ่ง กันและกัน แรงดูดที่สำคัญเป็นผลจากแรง แวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) แรงดูด จะมีอิทธิพลสูงขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนเข้าใกล้ ประชิดกัน อนุภาคมีการกระจายตัวดีมาก หรือน้อย ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์ของแรงดูดและ แรงผลัkdังกล่าว การเพิ่มสารลอยตัวในระยะ แรก ทำให้แรงผลัkmีอิทธิพลสูงขึ้น อนุภาคมี ความเสถียรเพิ่มขึ้นหรือมีการเกาะกลุ่มน้อยลง ทำให้มีปริมาณน้ำที่ช่วยหล่อลื่นในการไหลสูง เป็นผลให้ความหนืดลดลง แต่ในทางตรงข้าม การเพิ่มสารช่วยลอยตัวในน้ำสลิปในปริมาณที่ สูงเกินไปกลับมีผลให้อิทธิพลของแรงดูดสูงขึ้น เนื่องจากความหนาของชั้นประจุที่ห่อหุ้ม อนุภาคลดลง อนุภาคสามารถเคลื่อนตัวเข้าหา กันได้ใกล้ขึ้น ทำให้โอกาสที่อนุภาคจะเกาะกัน เป็นกลุ่มอนุภาคสูง การเกาะกันเป็นกลุ่มอนุภาค จะทำให้มีปริมาณน้ำที่ช่วยในการหล่อลื่นต่ำลง เป็นผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น

ความหนืดของน้ำสลิปเป็นปัจจัย สำคัญหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมการผลิต เพราะ นอกจากความสามารถในการถ่ายเทหล่อแบบ

แล้ว ความหนืดยังสามารถสัมพันธ์ถึงสมบัติ ของผลิตภัณฑ์ที่หล่อ จากรูปที่ 3 กำหนดให้จุด A เป็นจุดที่น้ำสลิปมีสารช่วยลอยตัวใน ปริมาณที่ต่ำ น้ำสลิปจึงมีความหนืดสูงแต่ก็ยังสามารถใช้หล่อได้ จุด C เป็นจุดที่มีสารช่วย ลอยตัวในปริมาณที่ทำให้มีน้ำสลิปมีความหนืด ต่ำที่สุด น้ำสลิปไหลตัวได้ดี จุด B เป็นจุดที่ อยู่ระหว่างจุด A และ C แต่ก่อนมาทาง C อนุภาคในน้ำสลิป A มีความเสถียรน้อย อนุภาคจึงมีการเกาะกันเป็นกลุ่มอนุภาคทำให้ ระหว่างการหล่ออนุภาคจัดเรียงตัวได้ยาก ผลิตภัณฑ์ที่หล่อจึงมีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ เป็นผลให้มีความชื้นสูง มีความแข็งแรงต่ำ และเสียรูปได้ง่ายเมื่อถอดแบบ แต่น้ำสลิป A จะให้อัตราการหล่อที่สูง ส่วนอนุภาคในน้ำสลิป C มีความเสถียรดี มีการกระจายตัวดี จึง ทำให้ระหว่างการหล่ออนุภาคสามารถจัดเรียง ตัวได้ง่าย ผลิตภัณฑ์ที่หล่อมีความหนาแน่นสูง มีความชื้นต่ำและมีความแข็งแรงสูง แต่น้ำสลิป C ให้อัตราการหล่อที่ต่ำและของที่หล่อมีความ ยืดหยุ่นน้อย (flexible) ทำให้ถอดแบบ และตกแต่งยาก ดังนั้นสมบัติน้ำสลิปที่ เหมาะสมสำหรับการผลิตจึงอยู่ระหว่างน้ำสลิป A และน้ำสลิป C คือ น้ำสลิป B ที่ให้อัตรา การหล่อที่เหมาะสมและผลิตภัณฑ์ที่หล่อมีความ แข็งแรงและยืดหยุ่นพอเหมาะ

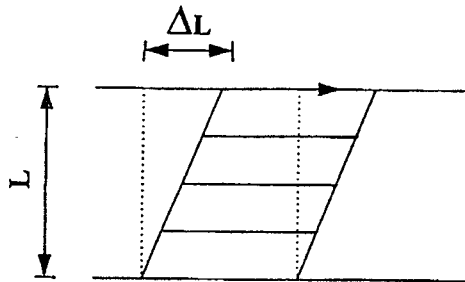
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่าความ เสถียรของอนุภาคในระบบมีความสำคัญต่อ สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่มีการทดสอบความหนืด อีกหลายวิธีที่สามารถให้ข้อมูลพื้นฐานในการ เปรียบเทียบความเสถียรของอนุภาคในแต่ละ ระบบ การทดสอบดังกล่าวรู้จักในนามการ ทดสอบ thixotropy ดังเช่นการทดสอบ ความหนืดขณะเพิ่มและลดอัตราการเฉือนเป็น วงจร ดูรูปที่ 4 โดยปกติค่าความหนืดของน้ำ สลิปที่ได้ในช่วงการเพิ่มอัตราการเฉือนมักจะ ไม่เท่ากับช่วงตอนลดอัตราการเฉือน แสดงให้ เห็นว่าอนุภาคในระบบมีการจัดเรียงตัวที่ แตกต่างกัน พื้นที่ในบริเวณกราฟระหว่าง การเพิ่มและลดอัตราการเฉือนสามารถ สัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการทำลาย โครงสร้างของอนุภาคที่มีอยู่ในระบบที่เกี่ยวข้อง กับการเพิ่มความเสถียรของอนุภาค พื้นที่บริเวณ มากกว่าแสดงให้เห็นถึงน้ำสลิปที่ประกอบด้วย อนุภาคที่มีความเสถียรน้อยกว่า นอกจากนี้

การทดสอบความเสถียรของอนุภาควิธีอื่นได้แก่ การทดสอบความหนืดที่อัตราการเฉือนคงที่ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ที่เวลาตั้งน้ำสลิปทิ้งไว้ต่าง ๆ กัน ตัวอย่าง เช่น 5-15 นาที โดยเลือกใช้อัตราการเฉือนที่ต่ำ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องจากโดยปกติอนุภาคในระบบไม่ได้อยู่นิ่ง แต่สามารถเคลื่อนไปมา ทำให้มีโอกาสชนและเกาะรวมตัวเป็นกลุ่มอนุภาคมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป น้ำสลิปที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีความเสถียรตัวน้อยกว่าดังเช่นน้ำสลิป A

จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดกับเวลาสูงกว่าน้ำสลิปที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีความเสถียรตัวมากกว่าดังเช่นน้ำสลิป C แต่หากความหนืดลดลงเมื่อเวลาผ่านไปแสดงว่ามีการแยกตัวหรือการแยกเฟส (phase) ของอนุภาคในระบบ ซึ่งอาจเกิดจากการที่อนุภาคจับตัวเกาะกันอย่างรวดเร็ว พฤติกรรมดังกล่าวมักพบในน้ำสลิปที่มีความเข้มข้นต่ำ การแยกเฟสนี้อาจนำไปสู่ของห่อที่มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอได้

จากตัวอย่างวิธีการวิเคราะห์และทดสอบที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่า

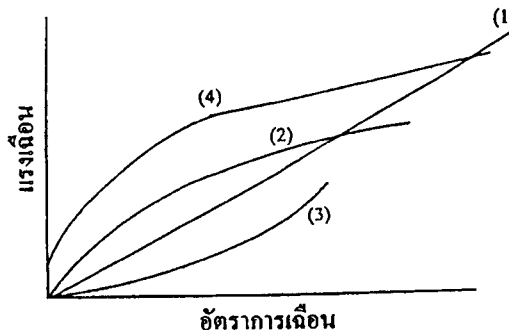
ความหนืดสามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติระดับจุลภาคที่มีผลต่อเนื่องไปถึงสมบัติระดับมหภาค การวิเคราะห์และทดสอบความหนืดประกอบกันหลายวิธีจักทำให้เกิดความเข้าใจพฤติกรรมของตัวอย่างหรือระบบที่วัดได้ดียิ่งขึ้น ทำให้สามารถนำข้อมูลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานวิจัยและงานผลิตได้อย่างเต็มที่ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการทราบรายละเอียดเพิ่มเติมติดต่อได้ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิกกรมวิทยาศาสตร์บริการ



รูปที่ 1 แสดงการเสียรูป (deform) ที่ทำให้เกิดการไหลภายใต้แรงกระทำ

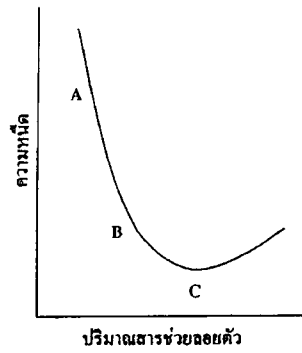
$$\text{ความหนืด} = \frac{\text{แรงเฉือน}}{\text{อัตราการเฉือน}}$$

$$\text{แรงเฉือน} = \frac{\text{แรง}}{\text{พื้นที่}} \quad \text{อัตราการเฉือน} = \frac{\Delta L}{L \text{ เวลา}}$$

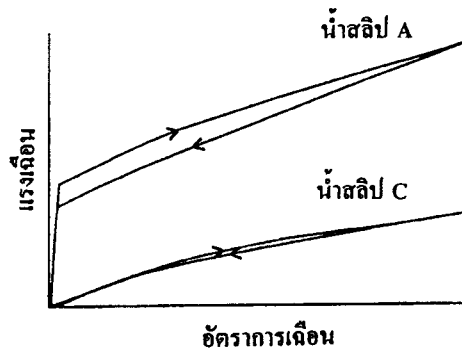


รูปที่ 2 แสดงพฤติกรรมการไหลของน้ำสลิป

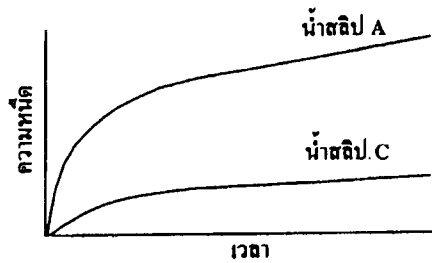
- (1) นิวโตเนียน
- (2) ชูโดพลาสติก
- (3) ไดลาเทนต์
- (4) บิงแฮมพลาสติก



รูปที่ 3 แสดงผลจากการทดสอบหาค่าความหนืดที่อัตราการเฉือนคงที่ เพื่อทดสอบหาผลของปริมาณสารช่วยลอยตัวต่อค่าความหนืดของน้ำสลิป กำหนดจุด A, B และ C บนกราฟ โดยให้จุด A มีค่าความหนืดมากกว่าจุด B และจุด B มีค่าความหนืดมากกว่าจุด C



รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบความหนืดของการเพิ่มและลดอัตราการเฉือนเป็นวงจรรองน้ำสลิป A และน้ำสลิป C



รูปที่ 5 แสดงการทดสอบความหนืดที่อัตราการเฉือนคงที่ที่เวลาต่างๆ กัน ของน้ำสลิป A และน้ำสลิป C

**เอกสารอ้างอิง**

Adamson, A.W. Physical chemistry of surfaces. 5 th. ed. New York : Interscience Publishers, 1990.  
 Phelps, G.W., et al. Rheology and rheometry of clay-water system. Sandersville, GA : Cyprus Industrial Minerals, 1983.  
 Schramm, Gebhard, Introduction to practical viscometry. Dieselstrasse : Gebruder Haake, 1981.  
 Shaw, Duncan. J. Introduction to colloid and surface chemistry. 4 th. ed. London : Butterworth-Heinemann, 1992.

