



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

ปริญญา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาริโอดีของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็คสำหรับการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์

A Rheological Study of Dilute Carbon Black Suspensions for In-Mold Coating
Applications

นามผู้วิจัย นางสาวชมพูนุท เจริญวุฒิลาภ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิรัชญา แก้ววัฒนะ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อนันต์ มุ่งวัฒนา, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษารีโอโลยีของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็คสำหรับการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์

A Rheological Study of Dilute Carbon Black Suspensions
for In-Mold Coating Applications

โดย

นางสาวชมพูนุท เจริญวุฒิลาภ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2552

ชมพูนุท เจริญวุฒิลาภ 2552: การศึกษาอิทธิพลของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค
สำหรับการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม
อุตสาหกรรม) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D. 100 หน้า

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลและพฤติกรรมการไหลของสารแขวนลอย
คาร์บอนแบล็คในอะคริลิกเรซินในช่องทางไหลระดับมหภาคและจุลภาค โดยข้อมูลความหนืด
ระดับมหภาคที่ได้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานถูกฟิตด้วยแบบจำลองความหนืด
ซิสโก้ (Sisko Viscosity Model) และทำการวิเคราะห์ข้อมูลความหนืดในระดับจุลภาคด้วยสภาวะ
ขอบเขตไม่ลื่นไถล (No-Slip Boundary Condition) และลื่นไถล (Slip Boundary Condition) เพื่อ
คำนวณหาความยาวลื่นไถล การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ใช้ในการศึกษา
ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความยาวลื่นไถลของสารแขวนลอยนี้ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ (1) ปริมาณ
คาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย: 0% และ 2.5% โดยน้ำหนัก (2) การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน
ที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic): ไม่เคลือบและเคลือบ และ (3) ความหยาบผิว
ช่องทางไหล: $R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระไน (Grinding) และ $R_a = 0.94$ ไมโครเมตร
จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า (Electrical Discharge Machining, EDM) ข้อมูลความหนืดจุลภาค
ของสารแขวนลอยนี้ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค
ที่สร้างและพัฒนาขึ้น โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิทดลองสองระดับ คือ 25 และ 50 องศาเซลเซียส

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความยาวลื่นไถล ทั้งที่อุณหภูมิ 25 และ 50 องศาเซลเซียส
พบว่า ปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 3 ชนิด คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย การเคลือบแม่พิมพ์
ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำและความหยาบผิวช่องทางไหล มีผลอย่างมี
นัยสำคัญต่อค่าความยาวลื่นไถล และสภาวะทดลองที่ให้ค่าความยาวลื่นไถลสูงสุดเพื่อให้เหมาะ
ต่อการนำไปใช้งานการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์ คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก มี
การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ และใช้ความหยาบผิวช่องทาง
ไหล $R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

Chompunoot Chareonwutilap 2009: A Rheological Study of Dilute Carbon Black Suspensions for In-Mold Coating Applications. Master of Engineering (Industrial Engineering), Major Field: Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chuckaphun Aramphongphun, Ph.D. 100 pages.

The objective of this research is to study about rheological behavior of dilute carbon black suspensions in macro and micro channels. The viscosity data in macroscale, which measured by a parallel-disc rheometer, were fitted by the Sisko viscosity model. The viscosity data in microscale were analyzed by the no-slip and slip boundary conditions to determine the slip length which occurs in the slip flow. The 2^3 Factorial designs were used to find factors that significantly affect the slip length. These factors include: (1) Content of carbon black: 0% and 2.5% by weight, (2) Surface chemistry: hydrophobic surface by silicone coating, with and without coating and (3) Surface roughness: $R_a = 0.85$ micrometer by grinding and $R_a = 0.94$ micrometer by Electrical Discharge Machining (EDM). The viscosity data in microscale were tested using a microslit rheometer, which were custom built and developed. This research work focuses on two temperatures: 25 and 50 °C.

According to the analysis of the slip length at both 25 and 50 °C, it was found that the content of carbon black, hydrophobic mold surface, and surface roughness of the mold significantly affect the slip length. The condition that gave the highest slip length for using in in-mold coating applications is 2.5% by weight carbon black, coated mold with silicone and used R_a 0.94 micrometer by EDM.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนการดำเนินงานวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิริยญา แก้ววัฒนะ กรรมการที่ปรึกษาวิชาการ รศ.ดร.ชลธิชา นุ่มหอม อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บริษัท เคอะ ฟาสเตอร์ เฟ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท เมทโรห์ม สยาม จำกัด บริษัท ทควอลิเมอร์ จำกัด บริษัท Jebson & Jessen Chemicals (ประเทศไทย) จำกัด และสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ด้านวัสดุดิบและใช้อุปกรณ์ เครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษามาโดยตลอด รวมทั้งพี่ๆและเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้แนะและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ชมพูนุท เจริญวุฒิลาภ

กันยายน 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	29
ผล	29
วิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	50
สรุป	50
ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	52
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี	55
ภาคผนวก ข ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนาน	75
ภาคผนวก ค ข้อมูลความดันที่แต่ละสภาวะทดลอง	90
ภาคผนวก ง ข้อมูลความหนืดที่แต่ละสภาวะทดลอง	95
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	100

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปัจจัยและระดับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ³	28
2	ตัวแปรที่ใช้ในการฟิตข้อมูลด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้ สำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส	30
3	ตัวแปรที่ใช้ในการฟิตข้อมูลด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้ สำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส	30
4	ค่าความหนืดเฉลี่ยที่อัตราเฉือนสูงจากสถานะอ้างอิงระดับมหภาคสำหรับการทดลอง ที่อุณหภูมิ 25 และ 50 องศาเซลเซียส	36
5	ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ³ ที่อุณหภูมิตดลอง 25 องศาเซลเซียส	36
6	ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ³ ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส	37
7	การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่อุณหภูมิตดลอง 25 องศาเซลเซียส	42
8	ค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ที่อุณหภูมิตดลอง 25 องศาเซลเซียส	43
9	การวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส	47
10	ค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส	48
ตารางผนวกที่		
ก1	ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานของน้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	76
ก2	ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	78
ก3	ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก4	ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	82
ก5	ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	84
ก6	ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	86
ก7	ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส	88
ข1	ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	91
ข2	ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	92
ข3	ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	93
ข4	ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	94
ค1	ข้อมูลความหนืดสำหรับการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	96
ค2	ข้อมูลความหนืดสำหรับการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	97
ค3	ข้อมูลความหนืดสำหรับการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1	98
ค4	ข้อมูลความหนืดสำหรับการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2	99

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	พฤติกรรมความเค้นเนื่องกับอัตราความเครียดของของเหลวชนิดต่างๆ	7
2	พฤติกรรมการไหลของของเหลว Shear thinning	8
3	กระบวนการฉีดเทอร์โมพลาสติกที่มีการทำการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์	10
4	สภาวะที่ขอบเขตบริเวณเชื่อมต่อระหว่างของไหลกับผนัง	12
5	แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการ	14
6	การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล)	18
7	การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล)	18
8	เครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค	23
9	เครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนาน	24
10	กราฟแสดงตัวอย่างค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคเทียบกับเวลา	25
11	กราฟแสดงความหนืดของน้ำ เมื่อทดสอบจากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	29
12	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระหว่างค่าจากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานและค่าที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้ของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส	31
13	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระหว่างค่าจากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานและค่าที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้ของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส	31
14	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระดับมหภาคระหว่างค่าที่ถูกฟิตด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดจากสภาวะอ้างอิงระดับมหภาคที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	32

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระดับมหภาคระหว่างค่าที่ถูกพิดด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดจากสภาวะอ้างอิงระดับมหภาคที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	33
16	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ระหว่างค่าที่ถูกพิดด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	34
17	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ระหว่างค่าที่ถูกพิดด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	34
18	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ระหว่างค่าที่ถูกพิดด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	35
19	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ระหว่างค่าที่ถูกพิดด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	35
20	กราฟแสดง Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 25 องศาเซลเซียส	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูลสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส	40
22	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่กับค่าที่ถูกฟิตสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส	41
23	กราฟแสดง Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อนสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส	44
24	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูลสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส	45
25	กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนที่กับค่าที่ถูกฟิตสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส	46
ภาพผนวกที่		
ก1	เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของอะคริลิกเรซิน	56
ก2	เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของคาร์บอนแบล็ค	61
ก3	เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของไทลูมิน	68

การศึกษารีโอโลยีของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็คสำหรับการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์

A Rheological Study of Dilute Carbon Black Suspensions for In-Mold Coating Applications

คำนำ

ในงานอุตสาหกรรม การเคลือบพื้นผิวเป็นวิธีหนึ่งที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถปกป้องพื้นผิวชิ้นงานจากสภาพแวดล้อมภายนอกเพื่อยืดอายุการใช้งานให้กับชิ้นงาน ทั้งยังเป็น การตกแต่งพื้นผิวให้มีความสวยงามเหมาะสมแก่การใช้งานต่างๆ ชิ้นงานพลาสติกที่เป็น ส่วนประกอบของรถยนต์มักต้องผ่านกระบวนการเคลือบพื้นผิวก่อนที่จะนำไปใช้งาน การเคลือบ ชิ้นงานในแม่พิมพ์จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่กำลังเข้ามามีบทบาทสำคัญในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็น มิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถใช้แทนสารทาร์รองพื้นและใช้แทนการพ่นสีบนพื้นผิวชิ้นงานในบาง กระบวนการ การเคลือบพื้นผิวชิ้นงานเริ่มขึ้นภายหลังการขึ้นรูป ซึ่งชิ้นงานยังคงอยู่ในแม่พิมพ์ ชิ้นงานที่สามารถทำการเคลือบภายในแม่พิมพ์ได้นั้น ส่วนใหญ่เป็นชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ อัดขึ้นรูปหรือฉีดขึ้นรูป โดยสารเคลือบที่ใช้จะเป็นของเหลวผสมพลาสติกเทอร์โมเซตและสารตัว เติมต่างๆ คาร์บอนแบล็คจัดเป็นสารตัวเติมชนิดหนึ่งที่ถูกใช้กันมากในอุตสาหกรรมพลาสติกและ ยาง ในปัจจุบันอุตสาหกรรมรถยนต์และสิ่งก่อสร้างได้มีการนำคาร์บอนแบล็คมาใช้กันอย่างแพร่ หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือ เป็นสารให้สีดำและช่วยลดต้นทุนการผลิตในงาน อุตสาหกรรมยาง ส่วนงานเคลือบพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการสีดำ คาร์บอนแบล็คยังสามารถป้องกัน รังสียูวีให้กับชิ้นงานอีกด้วย

การศึกษารีโอโลยีและพฤติกรรมการไหลของสารแขวนลอยในระดับจุลภาคมีความสำคัญ ต่อการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์เป็นอย่างยิ่ง Aramphongphun and Castro (2007) ได้ทำการศึกษา และสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายความดันในช่องทางไหลระดับจุลภาคสำหรับการเคลือบชิ้นงาน ในแม่พิมพ์ โดยพบว่า ค่าความยาวเส้นไหลส่งผลต่อความหนืดในระดับจุลภาค ซึ่งทำให้ความหนืดมี ค่าแตกต่างไปจากระดับมหภาค โดยความหนืดที่ได้จากการวัดในระดับจุลภาคนั้นจะมีผลของ พื้นผิวแม่พิมพ์ ขนาดความหนาของช่องทางไหล ชนิดของของไหล พฤติกรรมทางด้านการส่งผ่าน ความร้อน และการเกิดสภาวะขอบเขตเส้นไหลมาเกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสิ้นเปลืองในช่องทางไหลระดับจุลภาคและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความยาวสิ้นเปลืองของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็คในอะคริลิกรีซินในช่องทางไหลระดับจุลภาคเมื่อเปรียบเทียบกับระดับมหภาค โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ซึ่งช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการไหลของสารเคลือบและช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการลื่นไถลที่เกิดขึ้นในช่องทางไหลระดับจุลภาค
2. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความยาวลื่นไถล ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ และความหยาบผิวช่องทางไหล
3. เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะทดลองที่ให้ค่าความยาวลื่นไถลสูงสุด

ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้ ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความยาวลื่นไถล ซึ่งช่วยในการทำนายค่าความดันที่ใช้ในการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์ โดยได้สร้างเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค (Microslit Rheometer) สำหรับหาค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ที่เกิดขึ้น แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าความยาวลื่นไถล (Slip Length) เมื่อใช้สารตัวอย่างเป็นอะคริลิเกรซินผสมกับคาร์บอนแบล็ค ในขั้นตอนนี้มีขอบเขตของปัจจัยที่ศึกษา ดังนี้

1. ลักษณะของช่องทางไหลเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
2. กำหนดขนาดความหนาช่องทางไหล 80 ไมโครเมตร เป็นการวัดความหนืดในระดับจุลภาค และที่ความหนาช่องทางไหล 150 ไมโครเมตรเป็นความหนืดระดับมหภาค
3. อุณหภูมิทดลอง เท่ากับ 25 และ 50 องศาเซลเซียส
4. ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย เท่ากับ 0% และ 2.5% โดยน้ำหนัก
5. การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ คือ ไม่เคลือบและเคลือบ
6. ความหยาบผิวช่องทางไหล เท่ากับ $R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน และ $R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความยาวคลื่นไกล
2. ทำให้ทราบถึงสถานะที่ให้ค่าความยาวคลื่นไกลสูงสุด
3. สามารถนำค่าความยาวคลื่นไกลไปใช้ทำนายค่าความดันที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนขึ้นงาน
ในแม่พิมพ์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
4. เพื่อเป็นแนวทางในการนำสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็คไปใช้งานและปรับปรุงคุณภาพ
ต่อไป

การตรวจเอกสาร

1. สมบัติการไหลของพอลิเมอร์ (Polymer Rheology)

อิทธิพล และ สุภารัตน์ (2548) กล่าวว่า ริโอโลยี (Rheology) เป็นการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์เหลว โดยเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress), ความเครียด (Strain) และเวลา (Time) โดยมีจุดประสงค์ของการศึกษาริโอโลยี คือ

- เข้าใจพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ที่สัมพันธ์กับชนิดของกระบวนการผลิต
- ใช้ข้อมูลในการคาดการณ์การไหลของพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์จริงได้
- สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโมเลกุลพอลิเมอร์กับพฤติกรรมการไหลและการตอบสนองของพอลิเมอร์
- สามารถออกแบบกระบวนการผลิตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติตามต้องการ

พฤติกรรมการไหลของของเหลว (Viscous Flow)

ความหนืด (Viscosity) เป็นตัวแปรสำคัญของการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของเหลวนิยาม เท่ากับ อัตราส่วนของความเค้นเฉือน (Shear Stress) กับอัตราเฉือน (Shear Rate)

$$\text{Viscosity } (\eta) = \frac{\text{Shear Stress}}{\text{Shear Rate}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

2. ลักษณะการไหลของของเหลว

สามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ

2.1 ของเหลวนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามกฎของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลง

ขึ้นกับอัตราเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนที่เป็นเส้นตรง ตัวอย่างของเหลวชนิดนี้ เช่น ก๊าซ น้ำ ของเหลวไฮโดรคาร์บอน และตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น

2.2 ของเหลวไม่เป็นนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid) เป็นลักษณะการไหลของของไหลทุกชนิดที่ไม่เป็นไปตามกฎของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆของการไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนมีค่าไม่คงที่ ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็นหลายชนิด ได้แก่

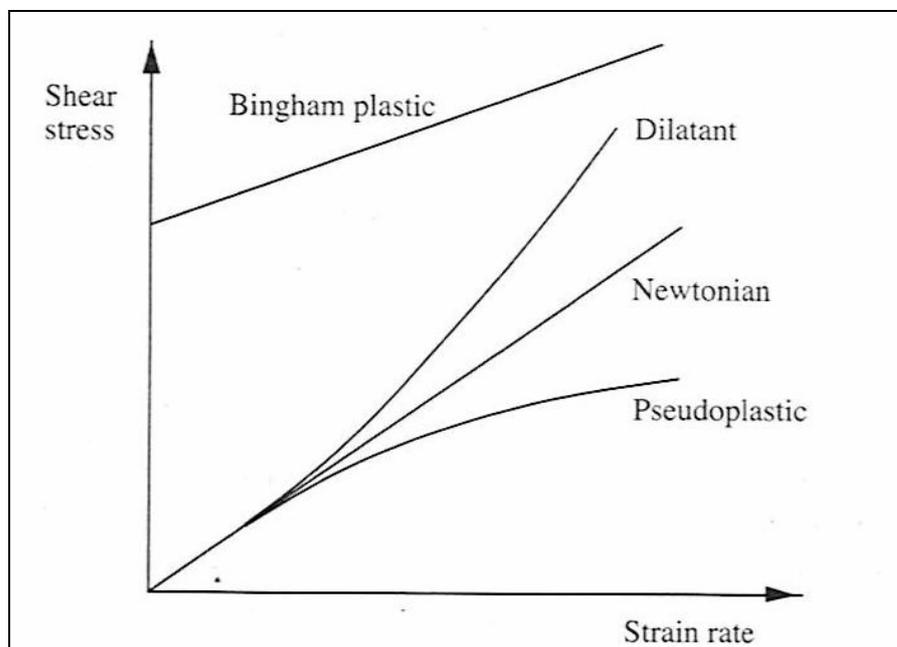
2.2.1 ของเหลวซูโดพลาสติก (Pseudoplastic Fluid) ของเหลวชนิดนี้มีความหนืดลดลง เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่อัตราเฉือนสูง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันง่ายขึ้น เป็นสาเหตุให้ความหนืดลดลง เมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้น พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “Shear Thinning” ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์เหลว ยาง เลือด น้ำหมึกสี กาวน้ำ ใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ทั้งที่ได้จากธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ เป็นต้น

สี มักมีส่วนประกอบสำคัญ คือ สีข้อม (Pigment) กระจายตัวเป็นอนุภาคอยู่ในสารละลายพอลิเมอร์ สีจึงมีสมบัติเป็นซูโดพลาสติก เมื่อสีถูกทาลงบนพื้นผิวด้วยแปรงหรือการสเปรย์ แรงเฉือนจะเกิดขึ้น ณ บริเวณหน้าสัมผัส ให้ความหนืดมีค่าลดลง และเมื่อสีอยู่บนพื้นผิวโดยไม่มีการแปรงอีก ความหนืดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดแซกกิง (Sagging) หรือการไหลลงภายใต้แรงโน้มถ่วงได้

2.2.2 ของเหลวไดลาแทนท์ (Dilatant Fluid) เป็นของเหลวที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “Shear Thickening” ตัวอย่างเช่น น้ำดินขี้ผึ้ง น้ำแป้ง พลาสติกซอล พลาสติกไซเซออร์ เป็นต้น

2.2.3 ของเหลวบิงแฮม (Bingham Fluid) ของเหลวชนิดนี้จะไม่เสียสภาพจนถึงค่าความเค้นวิกฤต (Critical Shear Stress หรือ Yield Point) หลังจากนั้นของเหลวอาจแสดงพฤติกรรมแบบนิวโตเนียนหรือไม่เป็นนิวโตเนียนก็ได้ เช่น น้ำโคลน จาระบี ยาสีฟัน เป็นต้น

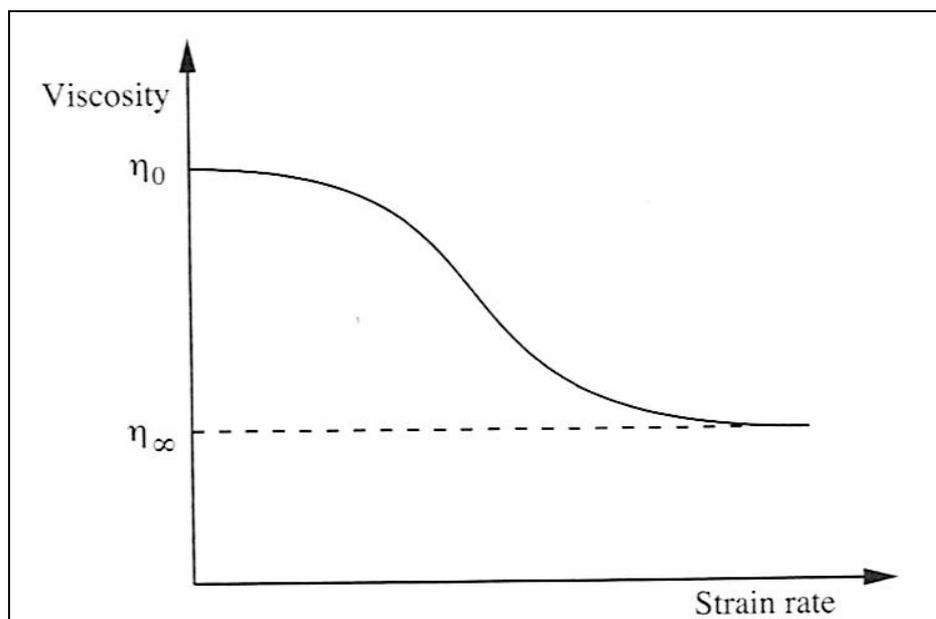
ลักษณะการไหลของของเหลวชนิดต่างๆที่ได้กล่าวมา แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กราฟแสดงพฤติกรรมความเค้นเทียบกับอัตราความเครียดของของเหลวชนิดต่างๆ

ที่มา: Wilkes (2006)

Wilkes (2006) กล่าวว่า ในทางปฏิบัติ การไหลของของเหลวไม่เป็นนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluids หรือ Shear Thinning) มิได้มีการลดลงของความหนืดอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราความเครียด ตามที่ได้กล่าวมา แต่พฤติกรรมการไหลของของเหลวชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 โดยค่าความหนืดในช่วงอัตราความเครียดต่ำและสูงถูกแบ่งแยกด้วยพฤติกรรมของของเหลวไม่เป็นนิวโตเนียน คือ ความหนืดลดลง เมื่ออัตราความเครียดสูงขึ้น ค่าความหนืดคงที่ที่อัตราความเครียดต่ำ เรียกว่า ความหนืดที่อัตราเฉือนเท่ากับศูนย์ (Zero-Shear Viscosity, η_0) และ ความหนืดคงที่ที่อัตราความเครียดสูง เรียกว่า ความหนืดที่อัตราเฉือนมีค่าอนันต์ (Infinite-Shear Viscosity, η_∞) สำหรับพอลิเมอร์หลอมเหลว η_0 มีค่าเท่ากับศูนย์ และสารละลายพอลิเมอร์ η_∞ มีค่าเท่ากับค่าความหนืดของสารละลาย



ภาพที่ 2 กราฟแสดงพฤติกรรมการไหลของของเหลว Shear Thinning

ที่มา: Wilkes (2006)

ตั้งแต่แบบจำลองความหนืดกฏยกกำลัง (Power Law viscosity model) ดังสมการที่ (2) สามารถทำนายพฤติกรรมของของเหลวในช่วง Shear Thinning ได้ แบบจำลอง 3 ตัวแปร เช่น แบบจำลองความหนืดซิสโก้ (Sisko viscosity model) ก็ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของของเหลวในช่วงอัตราเฉือนสูง ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$\eta(\dot{\gamma}) = m|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (2)$$

เมื่อ m คือ ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index) และ n คือ เลขยกกำลัง (Power Law Number)

$$\eta(\dot{\gamma}) = m|\dot{\gamma}|^{n-1} + \eta_{\infty} \quad (3)$$

เมื่อ m คือ ดัชนีความสอดคล้อง และ n คือ เลขยกกำลัง และ η_{∞} คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนมีค่าอนันต์

ส่วนแบบจำลอง 4 ตัวแปร เช่น แบบจำลองความหนืดแคร์เลอร์ (Carreau viscosity model) นั้น ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลของของเหลวในช่วงอัตราเฉือน โดยแสดงแบบจำลองความหนืดแคร์เลอร์ ดังสมการที่ (4)

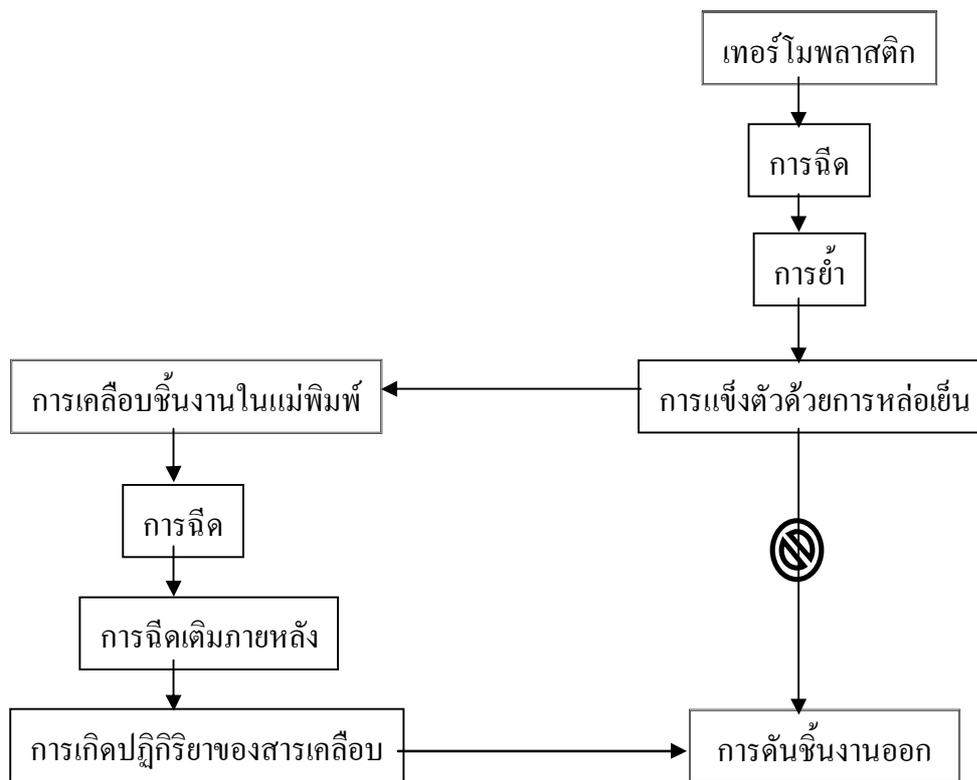
$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (4)$$

เมื่อ λ คือ ค่าคงที่ของเวลา (Time Constant) n คือ เลขยกกำลัง η_0 คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนเท่ากับศูนย์ และ η_∞ คือ ความหนืดที่อัตราเฉือนมีค่าอนันต์

3. การเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์ (In-Mold Coating)

Bhagavatula and Castro (2007) กล่าวว่า การเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์ เป็นการฉีดสารเคลือบเหลวชนิดเทอร์โมเซตลงบนพื้นผิวชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกซึ่งชิ้นงานมีการแข็งตัวแต่ยังคงอยู่ในแม่พิมพ์ สารเคลือบจะเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้วยึดเกาะกับพื้นผิวชิ้นงาน

เมื่อรวมกระบวนการฉีดพลาสติกเข้ากับกระบวนการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์ จะมีการเพิ่มหัวฉีดสารเคลือบเข้าไปอีกหนึ่งหัว ซึ่งขั้นตอนการทำงานของกระบวนการฉีดพลาสติกเดิมแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การฉีด การย่ำ และการแข็งตัว (เกิดจากกระบวนการหล่อเย็น) ดังแสดงในภาพที่ 3 และเมื่อเพิ่มการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์เข้าไป สารเคลือบจะถูกฉีดในขั้นตอนการหล่อเย็นชิ้นงาน โดยชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกจะมีการแข็งตัวและยังคงอยู่ในแม่พิมพ์ ซึ่งสารเคลือบจะถูกฉีดด้วยแรงดันจนกระทั่งเต็มพื้นผิวชิ้นงาน ขั้นตอนการเติมสารเคลือบภายหลัง เพื่อให้สารเคลือบมีความหนาตามที่กำหนด และขั้นตอนการทำปฏิกิริยา สารเคลือบจะทำปฏิกิริยาและเกิดการแข็งตัว หลังจากนั้นจึงดันชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 3 กระบวนการฉีดเทอร์โมพลาสติกที่มีการทำการเคลื่อนชิ้นงานในแม่พิมพ์

ที่มา: Bhagavatula and Castro (2007)

4. สมการการไหลสำหรับเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค

Aramphongphun and Castro (2007) กล่าวว่า เครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคเป็นการวัดการไหลในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่ความหนาต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างการไหลในระดับจุลภาคกับระดับมหภาค

หลักการทำงานของเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคตั้งอยู่บนพื้นฐานของการไหลจากแรงดันขับเคลื่อน (Pressure-Driven Flow) ของของไหลที่อยู่ระหว่างแผ่นงานขนาน 2 แผ่นซึ่งอยู่นิ่ง เครื่องทดสอบความหนืดด้วยความดัน (Pressure Flow Rheometer) มีด้วยกันหลายชนิด เช่น เครื่องทดสอบความหนืดคาปิลลารี เป็นต้น มีข้อดีเหนือกว่าเครื่องทดสอบความหนืดแบบหมุน คือ

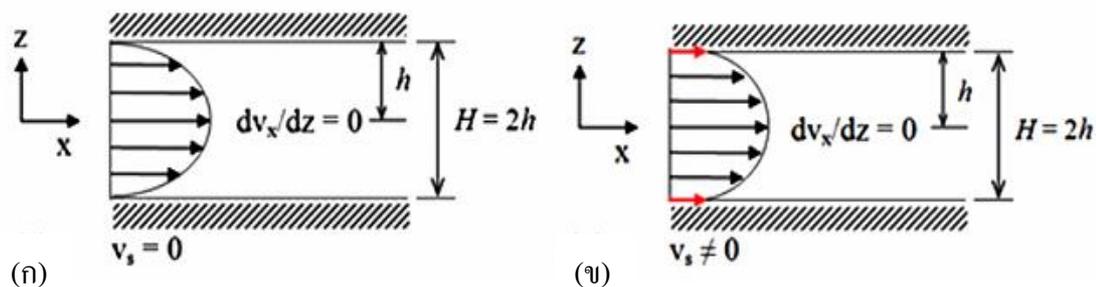
1. การไม่มีพื้นที่อิสระในเครื่องทดสอบความหนืดด้วยความดันสามารถวัดความหนืดที่อัตราเค้นเฉือนสูงได้
2. มีเฉพาะวัสดุใหม่เท่านั้นที่ไหลผ่านช่องทางไหล จึงไม่มีประวัติความเค้นเฉือนสะสมอยู่ในของไหล
3. การไหลในเครื่องทดสอบความหนืดด้วยความดันเป็นการไหลพื้นฐานและเป็นเรขาคณิต จึงสามารถใช้กับกระบวนการของวัสดุต่างๆไป เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูปและการเคลือบชิ้นงานในแม่พิมพ์

สมการการไหลสำหรับเครื่องทดสอบความหนืดในช่องแคบได้จากทฤษฎีต่อเนื่อง (Continuum Hypothesis) เพื่อใช้วิเคราะห์ค่าความหนืดของของไหลในระดับจุลภาค โดยใช้สภาวะขอบเขตไม่ลื่นไหล (No-Slip Boundary Condition) และสภาวะขอบเขตลื่นไหล (Slip Boundary Condition)

สภาวะไม่ลื่นไหล สมมติให้ไม่มีความสัมพันธ์ใดๆในการเคลื่อนที่ระหว่างขอบเขตของแข็งและของไหลในการไหลจากแรงดันขับเคลื่อน การไหลของของไหลเกิดจากความแตกต่างของความดันซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ของผนัง จึงสมมติให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหลที่บริเวณผนังมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (5)

$$v_x = 0 \quad , \quad v_z = 0 \quad (5)$$

เมื่อ v_x และ v_z คือ ความเร็วในการไหลของของไหลในแนวแกน x และทิศทางตั้งฉากในแนวแกน z ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4(ก)



ภาพที่ 4 สภาวะที่ขอบเขตบริเวณเชื่อมต่อระหว่างของไหลกับผนัง (ก) สภาวะขอบเขตไม่ลื่นไถล
(ข) สภาวะขอบเขตลื่นไถล

ที่มา: Aramphongphun and Castro (2007)

สำหรับสภาวะขอบเขตลื่นไถล แสดงในภาพที่ 4(ข) กรณีสารแขวนลอย เกิดการลื่นไถลจากการเคลื่อนที่ของชั้นบางๆ ของของไหลความหนืดต่ำซึ่งสัมผัสกับผนังของแข็ง แสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ (6)

$$\tau_w = \lambda v_s \quad (6)$$

โดย τ_w คือ ค่าความเค้นเฉือนบริเวณผนัง, λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานบริเวณผนัง และ v_s คือ ความเร็วในการลื่นไถลในทิศทางของไหลบริเวณผนัง

ดังนั้น จึงได้ว่า

$$v_s = \frac{\eta}{\lambda} \left. \frac{dv_x}{dz} \right|_w \quad (7a)$$

$$v_s = \beta \left. \frac{dv_x}{dz} \right|_w \quad (7b)$$

เมื่อ η คือ ความหนืดของของไหล, $\left(\frac{dv_x}{dz} \right)$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วใน

แกน z และ $\beta = \frac{\eta}{\lambda}$ คือ ปัจจัยหลักในการลื่นไถล หรือ ความยาวลื่นไถล

สมการการไหลสำหรับเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค เมื่อการไหลของของไหลเกิดจากความดันตกคร่อมภายในช่องทางไหลรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ΔP) ที่มีการกำหนดค่าอัตราการไหล (Q) คงที่ โดยกำหนดมิติ ดังนี้ ความกว้าง (W) ความยาว (L) และความหนาของช่องทางไหล (H) ซึ่ง $H \ll W$ และ $H \ll L$

สภาวะขอบเขตไม่ลื่นไถล (สมการที่ 5) :

$$\tau_w = \frac{H}{2L} \Delta P \quad (8a)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{2}{WH^2} \left(2Q + \Delta P \frac{dQ}{d\Delta P} \right) \quad (8b)$$

สภาวะขอบเขตลื่นไถล (สมการที่ 7b) :

$$\tau_w = \frac{H}{2L} \Delta P \quad (9a)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{2}{WH^2 \left(1 - \left(4\beta/H \right) \right)} \left(2Q + \Delta P \frac{dQ}{d\Delta P} \right) \quad (9b)$$

ค่าความหนืดเฉือน (Apparent Shear Viscosity) สามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (10)$$

เมื่อ τ_w คือ ความเค้นเฉือนบริเวณผนัง, $\dot{\gamma}_w$ คือ อัตราเฉือนบริเวณผนัง และ η คือ ค่าค่าประมาณความหนืดของของไหล

5. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

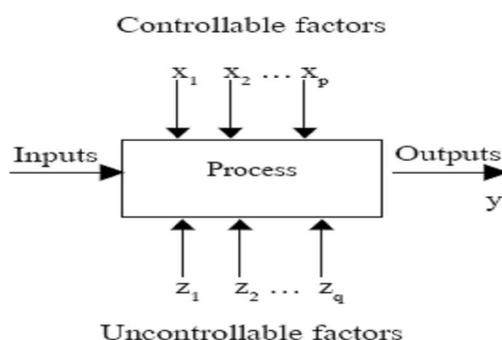
5.1 ความหมายของการทดลอง

Montgomery (1991) กล่าวว่า การทดลอง หมายถึง การทดสอบหรือการลองเพื่อหาผลลัพธ์ที่อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอน สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

1. การทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment)
2. การทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation)

จุดประสงค์ที่สำคัญของการทดลองมี 2 ประการ คือ (1) เป็นการยืนยันข้อเท็จจริงเพื่อพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต และ (2) เป็นการค้นหาข้อเท็จจริงเพื่อศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีต่อระบบการผลิต ซึ่งผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บข้อมูล

ปารเมศ (2545) กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ เป็นกระบวนการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม โดยสามารถนำข้อมูลเหล่านั้นไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติแล้วหาข้อสรุปที่มีความสมเหตุสมผลและใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุด ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถแทนด้วยแบบจำลอง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการ

ที่มา: ปารเมศ (2545)

จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่า กระบวนการ คือ การรวมเอาวิธีการ คนงาน เครื่องจักร และ ทรัพยากรอื่นๆเข้ามาไว้ด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบป้อนเข้าให้กลายเป็นผลผลิต ซึ่งปัจจัยที่มีผลระหว่างกระบวนการมี 2 ชนิด คือ ปัจจัยควบคุมได้ (x_1, x_2, \dots, x_n) และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (z_1, z_2, \dots, z_q) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับ

1. หาค่าตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบสนอง y
2. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง y เพื่อให้ y อยู่ที่ค่าที่ต้องการ
3. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง y เพื่อให้ y มีค่าน้อย
4. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบสนอง y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ z_1, z_2, \dots, z_q มีค่าน้อยที่สุด

5.2 รายละเอียดของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจ เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้สาเหตุต่างๆ ที่จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Output Response) จากกระบวนการหรือระบบนั้นๆ โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ (1) ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) และ (2) ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable or Noise Factors)

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลอง เพราะส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจ
2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ เนื่องจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัย ต้นทุนในการควบคุมสูง มีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก

5.3 หลักการพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการออกแบบการทดลอง

5.3.1 การทำซ้ำ (Replication) เป็นการทดลองซ้ำๆ โดยมีคุณสมบัติ 2 ประการ คือ

ก. ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้

ข. ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้ประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง ดังนั้นการทำซ้ำทำให้ผู้ทดลองหาตัวประมาณที่ถูกต้องขึ้น

5.3.2 การทดลองแบบสุ่ม (Randomization) คือ การทดลองที่ทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การทดลองแบบสุ่มทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง นอกจากนี้การใช้วิธีการทดลองแบบสุ่ม ทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

5.3.3 บล็อกกิง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลองบล็อกอันหนึ่ง อาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมด

5.4 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา โดยศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการ เพื่อกำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

2. เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต โดยเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในการทดลอง กำหนดขอบเขตสำหรับแต่ละปัจจัย และกำหนดระดับที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง ซึ่งต้องพิจารณาด้วยว่า จะควบคุมปัจจัยต่างๆอย่างไร

3. เลือกปัจจัยตอบสนอง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลจากการทดลอง จึงต้องกำหนดว่าอะไรคือปัจจัยตอบสนอง และจะวัดผลปัจจัยเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนเริ่มการทดลองจริง

4. เลือกรูปแบบการทดลอง ต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่เสมอ ทั้งยังต้องพิจารณาถึงขนาดของตัวอย่าง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่ใช้ในการเก็บข้อมูล และการใช้วิธีบล็อกหรือใช้วิธีแรนดอมไมเซชัน
5. ทำการทดลอง ต้องคอยติดตามกระบวนการทดลองอย่างระมัดระวัง เพื่อไม่ให้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งหากเกิดความผิดพลาด การทดลองนั้นจะไม่สามารถนำมาใช้ได้
6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ โดยนำวิธีทางสถิติมาวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ทราบผลลัพธ์หรือข้อสรุปที่ได้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่
7. สรุปผลการทดลองและเสนอแนะ เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการปฏิบัติต่อไป ซึ่งบางครั้งอาจทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นด้วย

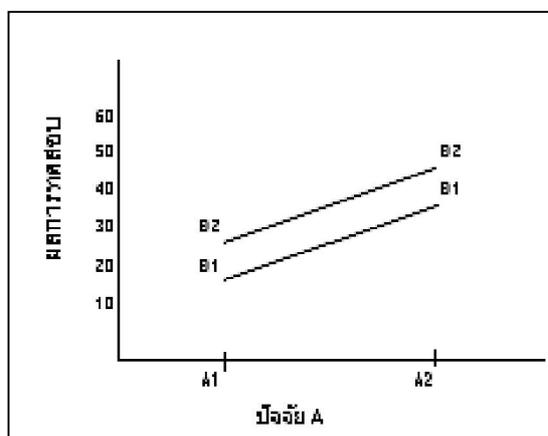
5.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลนิยมใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) โดยต้องการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมกันและให้ความสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัย ซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลกับตัวแปรตอบสนองอันเกิดจากปัจจัยเหล่านั้น โดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combination) และเนื่องจากการมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้ว ยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้อีกด้วย

อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น

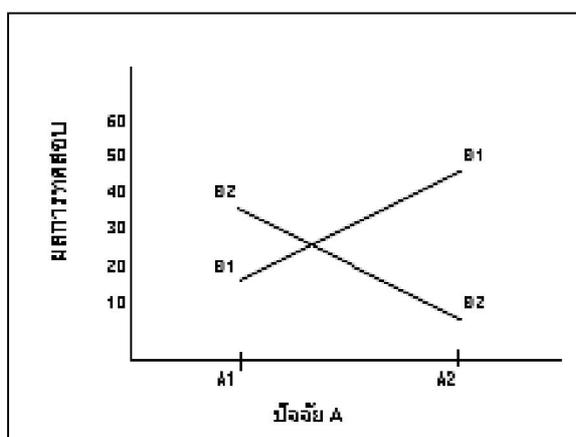
อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน ตัวอย่างการเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม เมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัย

ร่วมแสดงดังภาพที่ 6 และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมแสดงดังภาพที่ 7 โดย A และ B คือปัจจัย 2 ปัจจัย



ภาพที่ 6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล)

ที่มา: ปารเมศ (2545)



ภาพที่ 7 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล)

ที่มา: ปารเมศ (2545)

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลทั่วไปมีรูปแบบ คือ $A \times B \times C \times \dots$ แฟคทอเรียล เช่น $3 \times 2 \times 2$ แฟคทอเรียล ตัวอย่างรูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่ 2^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่มีการกำหนดระดับปัจจัยเพียง 2 ระดับเท่านั้น ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย เช่น 2^2 แฟคทอเรียล เป็นต้น

ข้อดีของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial)

1. ไม่มีการเกิดเอเลียส (Alias)
2. สามารถวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมได้ทั้งหมด

ข้อเสียของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

1. ต้องทำการทดลองให้ครบทุกรัน ทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรและเวลามาก
2. เมื่อมีจำนวนรันมาก อาจประสบปัญหาการป้องกันความคลาดเคลื่อนของการปรับเปลี่ยนปัจจัยต่างๆได้

5.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ หมายถึง การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลที่แต่ละปัจจัยสามารถเปลี่ยนแปลงได้ 2 ระดับ โดยระดับเหล่านี้อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็ว และเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร และคนงาน เป็นต้น ซึ่งจะแทนระดับด้วย “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆก็ได้ การทดลองต้องทำทั้งหมดเท่ากับ 2^k ครั้ง ซึ่ง k คือ จำนวนปัจจัยหรือปัจจัยหลัก โดยมีการสมมติให้ (1) ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว (2) การออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized) และ (3) สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้ทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิด ได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงได้

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Aramphongphun and Castro (2007) ศึกษาการเคลื่อนที่ของน้ำในแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นการฉีดพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตที่มีการผสมคาร์บอนแบล็คลงบนพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป ในขณะที่ชิ้นงานยังอยู่ในแม่พิมพ์ เมื่อทำการศึกษาคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความหนาของช่องทางไหลระดับจุลภาค 10 – 25 ไมโครเมตร และศึกษาคุณสมบัติในด้านการไหลระดับจุลภาคของสารเคลือบเหลวที่อัตราเร็วสูง พบว่า คุณสมบัติทั้งสองมีความสำคัญต่อแบบจำลองที่ใช้สำหรับกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำในแม่พิมพ์ จากการศึกษาที่ความหนาของช่องทางไหล 25 และ 100 ไมโครเมตร พบว่า เมื่อใช้ความหนา 25 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส ความหนืดมีค่าลดลง เนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นบางๆ ระหว่างคาร์บอนแบล็คที่มีการกระจายตัวอยู่ในสารเคลือบกับพื้นผิวของผนังช่องทางไหล เมื่อวิเคราะห์การไหลสำหรับเครื่องทดสอบความหนืดในช่องแคบด้วยสมการสำหรับสถานะขอบเขตไม่เลื่อนไหลและสถานะขอบเขตเลื่อนไหล แสดงให้เห็นว่า การใช้สถานะขอบเขตเลื่อนไหลที่อัตราเร็วสูง สามารถทำนายค่าความหนืดที่เกิดขึ้นในช่องทางไหลระดับจุลภาคนานๆ ได้ โดยความหนืดที่ลดลงขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นไหลที่เกิดขึ้นในแต่ละขนาดของช่องทางไหล ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถทำนายค่าความดันตกคร่อมในความหนาของช่องทางไหลที่ต่ำกว่า 50 ไมโครเมตร ได้อย่างถูกต้อง

ผู้วิจัย เชื่อว่า การเคลื่อนที่ของน้ำบริเวณผนังที่เกิดขึ้นมิได้เป็นการเคลื่อนที่แท้จริง แต่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นบางๆ ของคาร์บอนแบล็คเหลวที่มีความหนืดต่ำเมื่ออยู่ใกล้กับขอบของของแข็ง สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในกระบวนการ ค่าความยาวคลื่นไหลและความหนืดที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองความหนืดของแคร์ลอร์สามารถทำนายค่าความดันระหว่างการไหลในการเคลื่อนที่ของน้ำในแม่พิมพ์ได้

Chen *et al.* (2005) กล่าวว่าไว้ว่า การศึกษาพฤติกรรมของการไหลของของเหลวในระดับจุลภาคมีความสำคัญต่อการสร้างแบบจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์ โดยได้ศึกษาการวัดความหนืดของพอลิเมอร์เหลวที่ไหลผ่านแม่พิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงในช่องการไหลระดับจุลภาค การวัดความดันตกคร่อมและอัตราการไหลของปริมาตรด้วยแบบจำลองการไหลคาปิลลารี (Capillary Flow Model) และแบบจำลองการไหลผ่านช่องแคบ หลังจากนั้นจึงนำคำนวณค่าความหนืดจากวิธี Rabinowitsch และ Walters ค่าความหนืดที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่าความหนืดที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนืดแบบคาปิลลารี ถึง 30 – 80 % เมื่อลดขนาดของช่องการไหลระดับจุลภาคลง พบว่า ความหนืด

มีค่าลดลงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่า การไหลของของเหลวในระดับมหภาคกับระดับจุลภาคมีความแตกต่างกัน

Chen *et al.* (2008) ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ POM หลวผ่านช่องทางไหลระดับจุลภาคเปรียบเทียบกับเรซินชนิด PS เพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างภายในช่องทางไหลระดับจุลภาค พบว่า ค่าความหนืดที่ได้จากการวัดพอลิเมอร์ POM เมื่อใช้ช่องทางไหลขนาด 150 ไมโครเมตร มีค่าต่ำกว่าความหนืดที่วัดได้จากเครื่องวัดความหนืดแบบคาปิลลารี ประมาณ 29 - 35 % ทั้งนี้ยังเห็นว่า อัตราการลดลงของค่าความหนืดและอัตราเร็วในการลื่นไหลจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของช่องทางไหลระดับจุลภาคลดลง แต่พฤติกรรมเหล่านี้จะส่งผลต่อการไหลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเรซินชนิด PS

Choi *et al.* (2003) ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการไหลของน้ำในระดับจุลภาคเมื่อผนังช่องทางไหลมีคุณสมบัติชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ โดยใช้ช่องทางไหลที่มีความหนา 1 และ 2 ไมโครเมตร พบว่า ในแต่ละสภาวะทดลอง เมื่ออัตราการไหลแตกต่างกัน ความดันที่เกิดขึ้นจะให้ค่าที่แตกต่างกันไป ค่าความยาวคลื่นไกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในแนวเส้นตรงกับอัตราเฉือนประมาณ 30 นาโนเมตรที่อัตราเฉือน 10^5 s^{-1} เมื่อใช้ผนังช่องทางไหลแบบไม่ชอบน้ำ ส่วนการลื่นไหลที่เกิดขึ้นกับผนังช่องทางไหลแบบชอบน้ำไม่สามารถวัดค่าที่แน่นอนได้

Derek *et al.* (2002) วิเคราะห์การลื่นไหลของน้ำในช่องทางไหลระดับจุลภาค เมื่อใช้พื้นผิวผนังเป็นแบบชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ พบว่า มีผลของการลื่นไหลมาเกี่ยวข้อง เมื่อใช้พื้นผิวผนังเป็นแบบไม่ชอบน้ำ ซึ่งเกิดจากการมีฟองอากาศขนาดเล็กระดับนาโนอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของผนัง และจากการใช้แบบจำลองการไหลในระดับจุลภาค เมื่อตั้งสมมติฐานว่าเป็นสภาวะขอบเขตไม่ลื่นไหล พบว่า ค่าความถูกต้องที่ได้ค่อนข้างต่ำ แต่การไหลของของไหลที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับกระทำการระหว่างกันของของไหลกับพื้นผิวผนัง

Nithi *et al.* (2008) ศึกษาการทำผิวกระจกกันน้ำด้วยเทคนิค Micro Lithography พบว่า การปรับสภาพผิวให้มีความขรุขระและมีค่าพลังงานที่ผิวต่ำทำให้เกิดสภาวะไม่ชอบน้ำ ลวดลายขนาดเล็กช่วยเพิ่มความขรุขระให้กับพื้นผิวและเมื่อรวมกับการใช้สารลดแรงตึงผิว เช่น PDMS + 10% โดยน้ำหนัก DCP ค่าแรงตึงผิวบนกระจกจะมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 131 องศา ซึ่งทำให้เกิดสมบัติความไม่ชอบน้ำขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค
 - 1.1 เครื่องฉีดสารด้วยกระบอกฉีด (Syringe Pump)
 - 1.2 แม่พิมพ์โลหะที่มีช่องทางไหลระดับจุลภาค (Microslit Die)
 - 1.3 เซนเซอร์ความดัน (Pressure Transducer)
 - 1.4 แถบเพิ่มอุณหภูมิ (Heating Tape)
 - 1.5 กระบอกฉีดแก้ว (Glass Syringe)
 - 1.6 ท่อยาง
 - 1.7 ระบบเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ Unitronics
 - 1.8 ขวดแก้ว
2. เครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนาน (Parallel Disc Rheometer, Anton Paar Physica MCR 301)
3. เครื่องผสมแบบแกนหมุน (Overhead Stirrer)
4. แก้วสแตนเลส
5. คอมพิวเตอร์
6. โปรแกรมคำนวณทางสถิติ Minitab, Version15

สารเคมี

1. อะคริลิเกรซิน (Qester QE-1171-70 จากบริษัท ควอลิเมอร์ จำกัด)
2. คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black จากบริษัท Jebsen & Jessen Chemicals (ประเทศไทย) จำกัด)
3. ซิลิโคน (Silicone Mold Releasing)
4. โทลูอีน (Toluene)

วิธีการ

1. การประกอบเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค

1.1 ประกอบเครื่องฉีดสารด้วยกระบอกฉีด เช่น เซอร์ความดัน ระบบเก็บรวบรวมข้อมูล และคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน

1.2 นำแม่พิมพ์โลหะที่มีช่องทางไหลระดับจุลภาคมาต่อกับเครื่องฉีดสารด้วยกระบอกฉีด โดยใช้ท่อยาง

1.3 นำแถบเพิ่มอุณหภูมิไปพันรอบกระบอกฉีดแก้ว เพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิตามที่กำหนด

1.4 วางขวดแก้วไว้ด้านล่างช่องทางออกของแม่พิมพ์โลหะ เพื่อให้สารที่ถูกฉีดผ่านแม่พิมพ์ไหลเข้าสู่ขวดแก้ว ได้เครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค

1.5 ข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคเป็นค่าความดันตกคร่อม ซึ่งถูกบันทึกและแสดงผลที่หน้าจอด้วยระบบเก็บรวบรวมข้อมูล

2. การวัดความถูกต้องของเครื่องทดสอบความเหนียวในช่องทางไหลระดับจุลภาค

2.1 วัดความเหนียวของน้ำด้วยเครื่องทดสอบความเหนียวแบบแผ่นขนาน ดังแสดงในภาพที่ 9 เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 9 เครื่องทดสอบความเหนียวแบบแผ่นขนาน

ที่มา: บริษัทเมทโรรัม สยาม จำกัด

2.2 วัดความเหนียวของน้ำด้วยเครื่องทดสอบความเหนียวในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่ความหนาช่องทางไหล 80 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

2.3 เปรียบเทียบค่าความเหนียวที่ได้จากเครื่องทดสอบความเหนียวทั้งสองชนิด

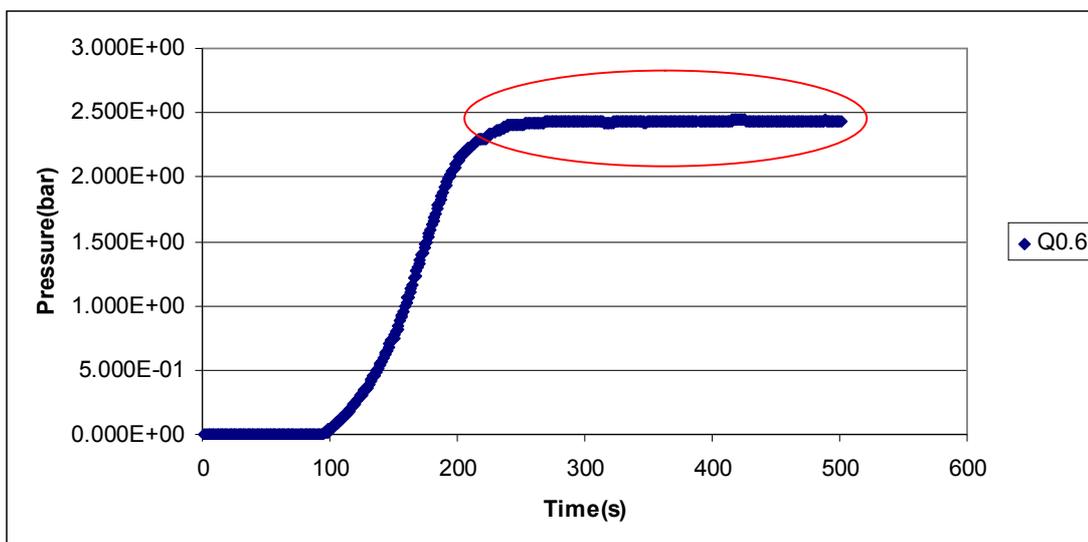
3. การฟิตข้อมูลด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้

3.1 วัดค่าความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% และ 2.5% โดยน้ำหนักด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนาน เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความหนืดในระดับมหภาค ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส

3.2 ฟิตข้อมูลที่ได้ด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้ ดังสมการที่ (3)

4. การวิเคราะห์ค่าความยาวคลื่นไถล

4.1 คำนวณค่าความหนืดระดับจุลภาคที่เกิดการลื่นไถล (η_{SL}) ของสภาวะทดลองต่างๆ จากค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคในบริเวณที่แสดงดังภาพที่ 10 ด้วยสภาวะขอบเขตไม่ลื่นไถล ดังสมการ (6a), (6b) และ (8)



ภาพที่ 10 กราฟแสดงตัวอย่างค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคเทียบกับเวลา

4.2 เปรียบเทียบค่าความหนืดจากสภาวะอ้างอิงระดับมหภาคที่ไม่เกิดการลื่นไถล (η_{NSL}) กับความหนืดระดับจุลภาคซึ่งมีค่าลดลงจากการลื่นไถลจากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่คำนวณได้ในข้อ 4.1 เมื่อใช้อัตราเฉือนเท่ากัน

4.3 วิเคราะห์หาค่าความยาวลื่นไถลจากอัตราส่วนระหว่างความหนืดระดับจุลภาคที่มีการลื่นไถลกับความหนืดระดับมหภาคที่ไม่เกิดการลื่นไถลด้วยสมการ (8a) ถึง (10) ได้สมการสำหรับคำนวณค่าความยาวลื่นไถล ดังสมการที่ (11)

$$\beta = \frac{H}{4} \left(1 - \frac{\eta_{SL}}{\eta_{NSL}} \right) \quad (11)$$

เมื่อ β คือ ค่าความยาวลื่นไถล

H คือ ความหนาช่องทางไหล

η_{SL} คือ ความหนืดที่เกิดจากสภาวะขอบเขตลื่นไถล

η_{NSL} คือ ความหนืดที่เกิดจากสภาวะขอบเขตไม่ลื่นไถล

5. การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

5.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความยาวลื่นไถล ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ขนาดความหนาช่องทางไหล 80 ไมโครเมตร โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยทดลองดังตารางที่ 1

5.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความยาวลื่นไถล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ขนาดความหนาช่องทางไหล 80 ไมโครเมตร โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.1

ปัจจัยที่ศึกษา

ปัจจัยที่ 1: ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย เท่ากับ 0% และ 2.5% โดย
น้ำหนัก

ปัจจัยที่ 2: การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ คือ ไม่
เคลือบและเคลือบ

ปัจจัยที่ 3: ความหยาบผิวช่องทางไหล คือ $R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการ
เจียรไนและ $R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

ปัจจัยควบคุม

1. ความกว้าง (W) เท่ากับ 8.0 มิลลิเมตร ความยาว (L) เท่ากับ 6.1 มิลลิเมตร และ
ความหนาของช่องทางไหล (H) เท่ากับ 80 ไมโครเมตร

2. ค่าความหนืดเฉลี่ยที่อัตราเฉือนสูงจากสถานะอ้างอิงระดับมหภาค สำหรับใช้ในการ
การคำนวณค่าความยาวคลื่นไหล คือ ความหนืดที่คำนวณจากสถานะทดลองที่ขนาดความหนา
ช่องทางไหล 150 ไมโครเมตร ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย 0% โดยน้ำหนัก ไม่มีการ
เคลือบแม่พิมพ์ และมีความหยาบผิวช่องทางไหล $R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรไน

ปัจจัยตอบสนอง

คือ ค่าความยาวคลื่นไหล

จำนวนการทดลอง = $2^k = 2^3 = 8$ ครั้ง

จำนวนครั้งที่ทำซ้ำ = 2 ครั้งต่อสถานะทดลอง

รวมการทดลองทั้งหมด 16 ครั้ง

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3

ระดับปัจจัย	ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ ด้วยซิลิโคน	ความหนาของผิวช่องทางไหล
ต่ำ (-1)	0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จาก วิธีการเจียรระโน
สูง (+1)	2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จาก วิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า

6. การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความยาวคลื่นไหล

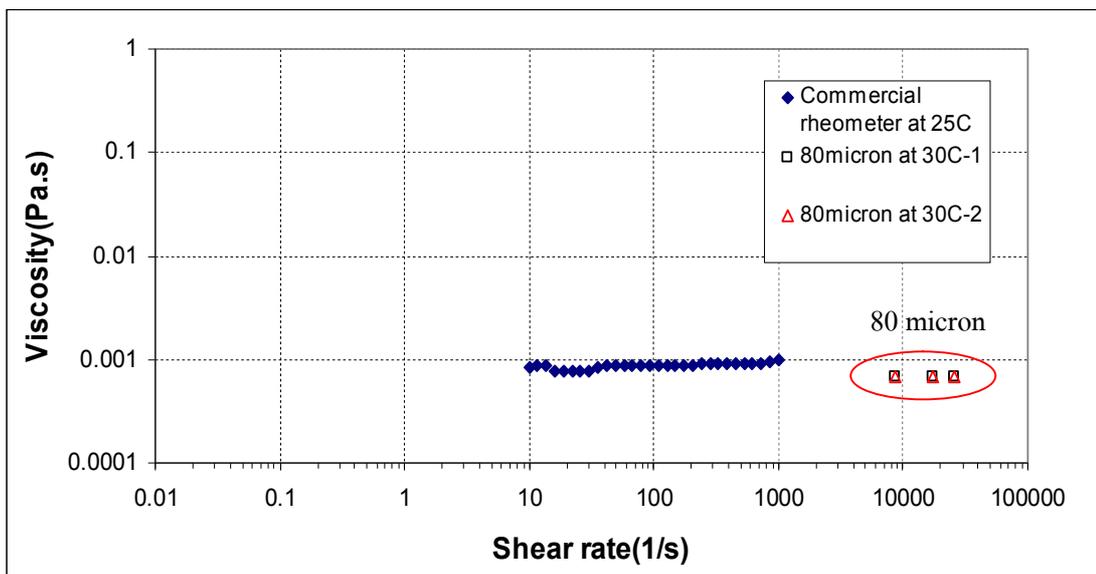
ใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab Version 15 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความยาวคลื่นไหลที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการวัดความถูกต้องของเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค

ผลการวัดความถูกต้องของเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค โดยใช้ น้ำเป็นสารตัวอย่าง เทียบความหนืดของน้ำที่วัดได้ระหว่างเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนาน เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน เท่ากับ 1 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสกับเครื่อง ทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค โดยใช้ความหนาช่องทางไหล 80 ไมโครเมตร ที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 10 เห็นได้ว่า ค่าความหนืดที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แสดงว่า ค่าที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคมีความน่าเชื่อถือ



ภาพที่ 11 กราฟแสดงความหนืดของน้ำ เมื่อทดสอบจากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

2. ผลการฟิตข้อมูลด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้

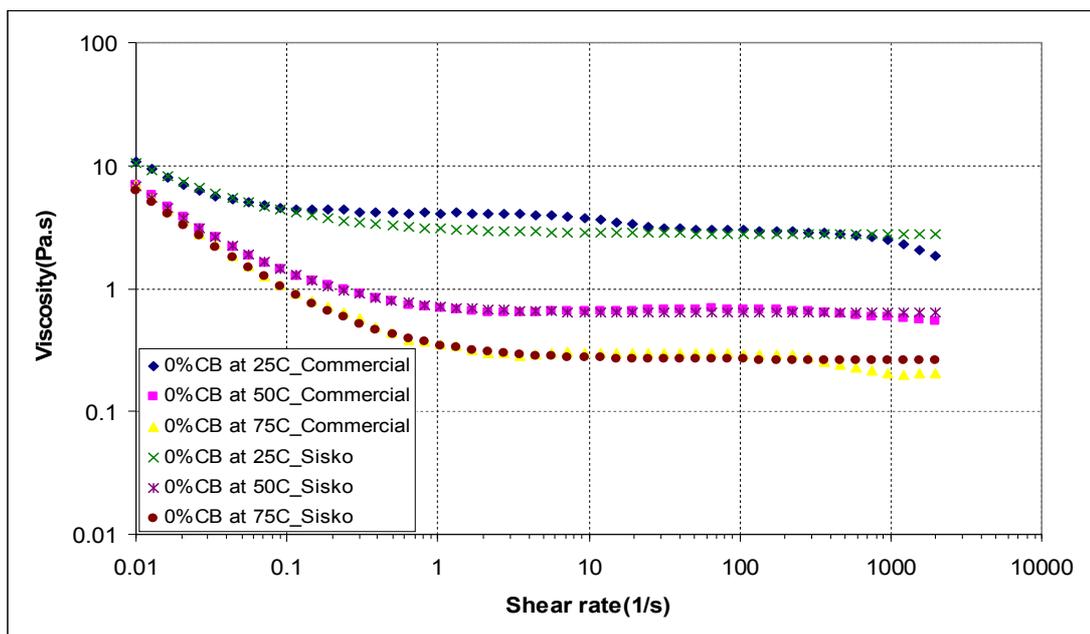
เมื่อนำสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็คทั้งสองอัตราส่วนไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนาน เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน เท่ากับ 1 มิลลิเมตรเป็นการไหลระดับมหภาค ฟิตข้อมูลด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้ เพื่อใช้ในการหาค่าความหนืดที่อัตราเฉือนต่างๆ ได้ค่าตัวแปรสำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% และ 2.5% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ และแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานและค่าที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังภาพที่ 11 และ 12

ตารางที่ 2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการฟิตข้อมูลด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้สำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส

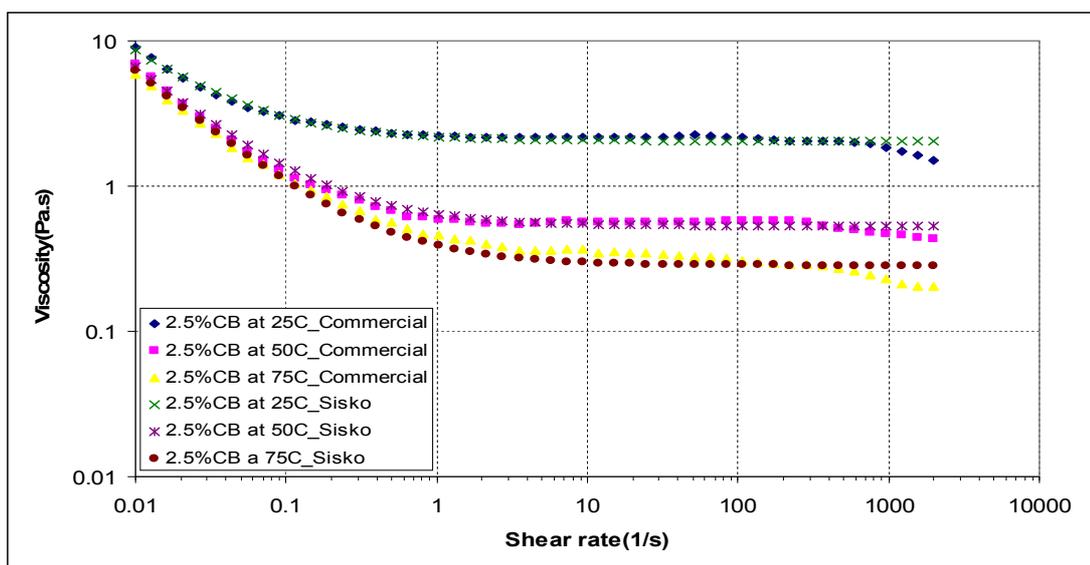
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก		
	η_{∞} (Pa.s)	m	n
25	2.789	0.285	0.287
50	0.632	0.090	0.085
75	0.263	0.084	0.077

ตารางที่ 3 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการฟิตข้อมูลด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้สำหรับสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก		
	η_{∞} (Pa.s)	m	n
25	2.050	0.134	0.155
50	0.533	0.112	0.132
75	0.285	0.107	0.126



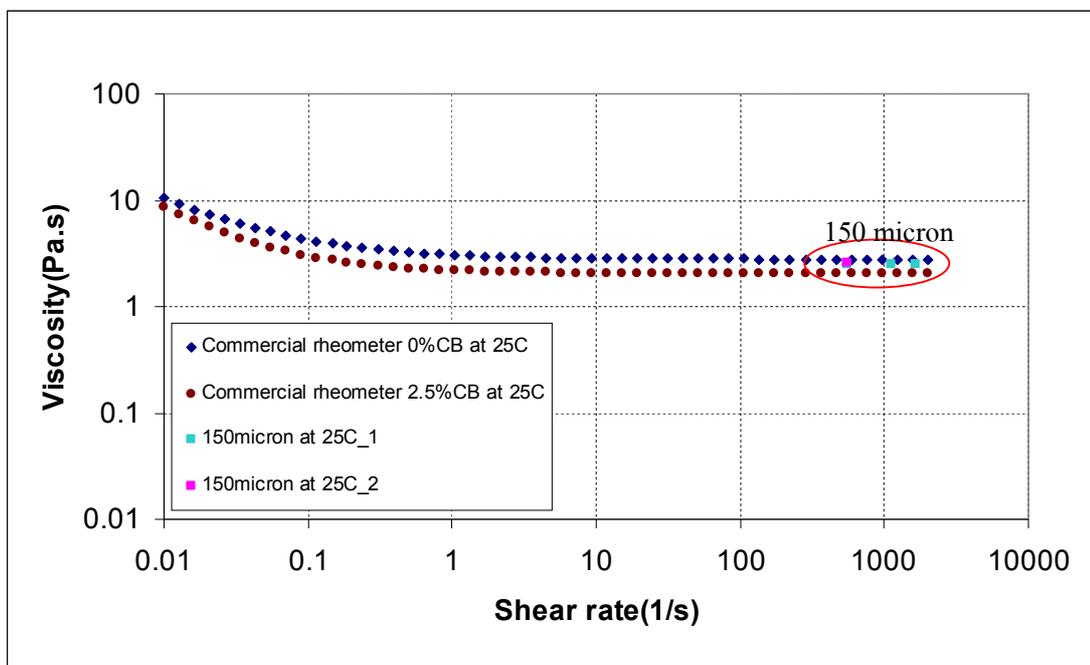
ภาพที่ 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระหว่างค่าจากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานและค่าที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองความหนืดซีสโก้ของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส



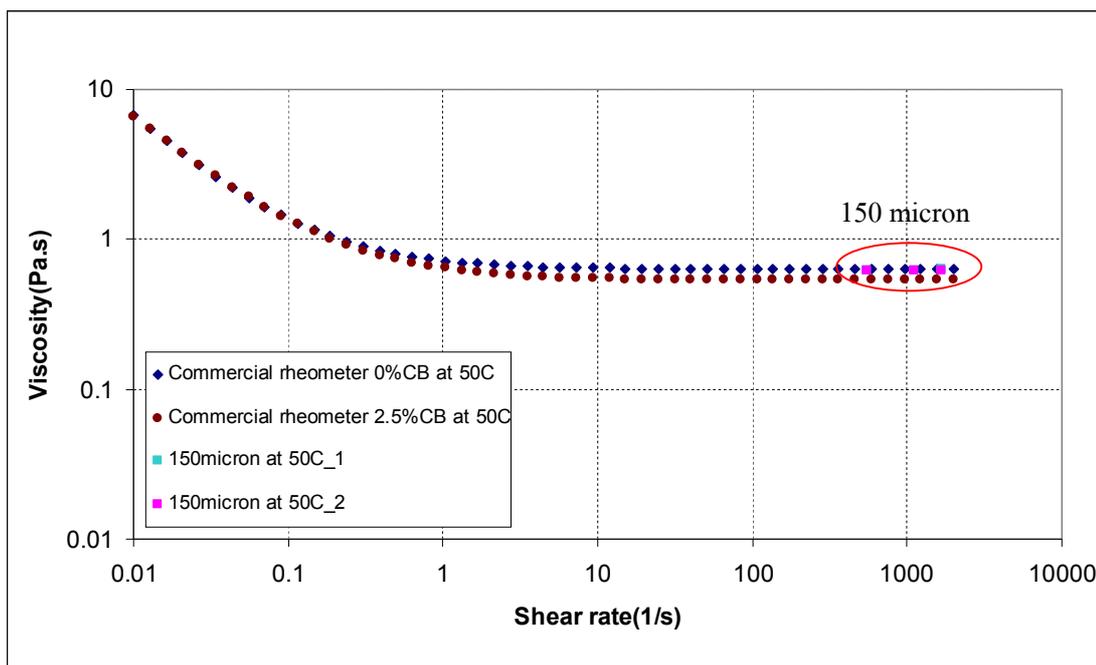
ภาพที่ 13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระหว่างค่าจากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานและค่าที่ได้จากการฟิตด้วยแบบจำลองความหนืดซีสโก้ของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส

3. ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดและความยาวเส้นใยจากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค

การเปรียบเทียบข้อมูลความหนืดระดับมหภาคระหว่างค่าที่ถูกพิตด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดจากสภาวะอ้างอิงระดับมหภาคที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค ที่อุณหภูมิ 25 และ 50 องศาเซลเซียส เป็น ไปดังภาพที่ 14 และ 15 ตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนืดจากสภาวะอ้างอิงระดับมหภาคที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการพิตด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้

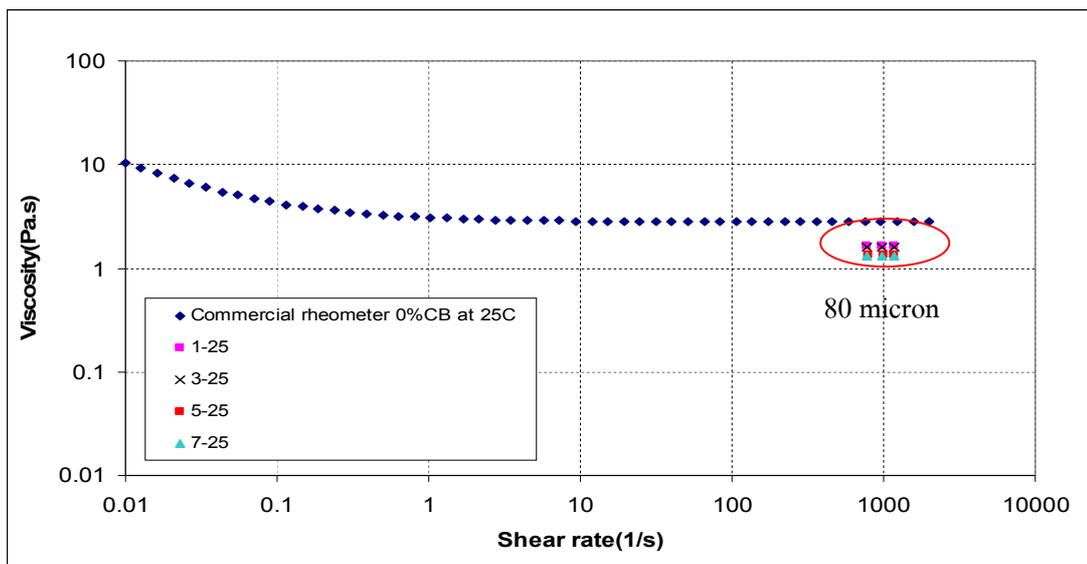


ภาพที่ 14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระดับมหภาคระหว่างค่าที่ถูกพิตด้วยแบบจำลองความหนืดชิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดจากสภาวะอ้างอิงระดับมหภาคที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

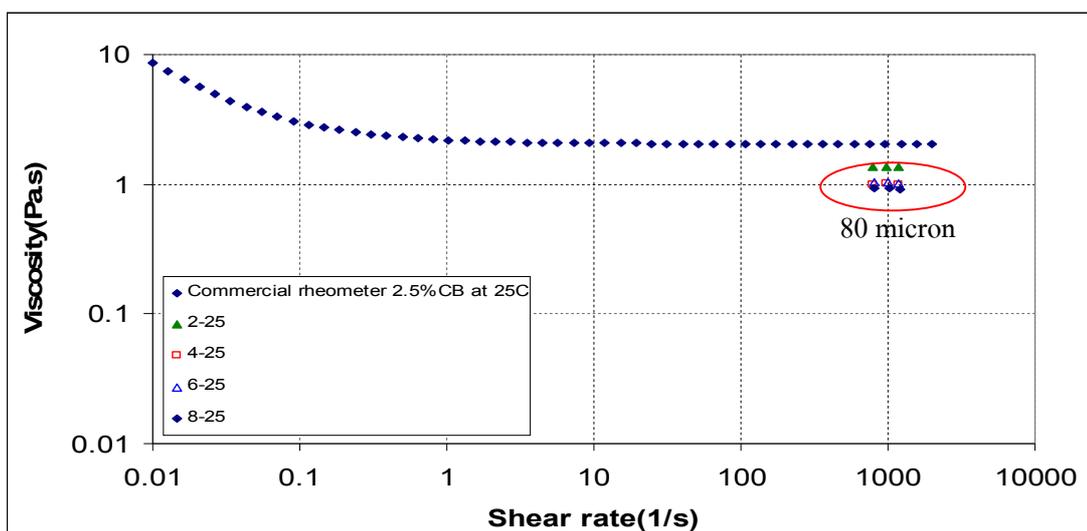


ภาพที่ 15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดระดับมหาระหว่างค่าที่ถูกพิตด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดจากสถานะอ้างอิงระดับมหาค่าที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาค ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

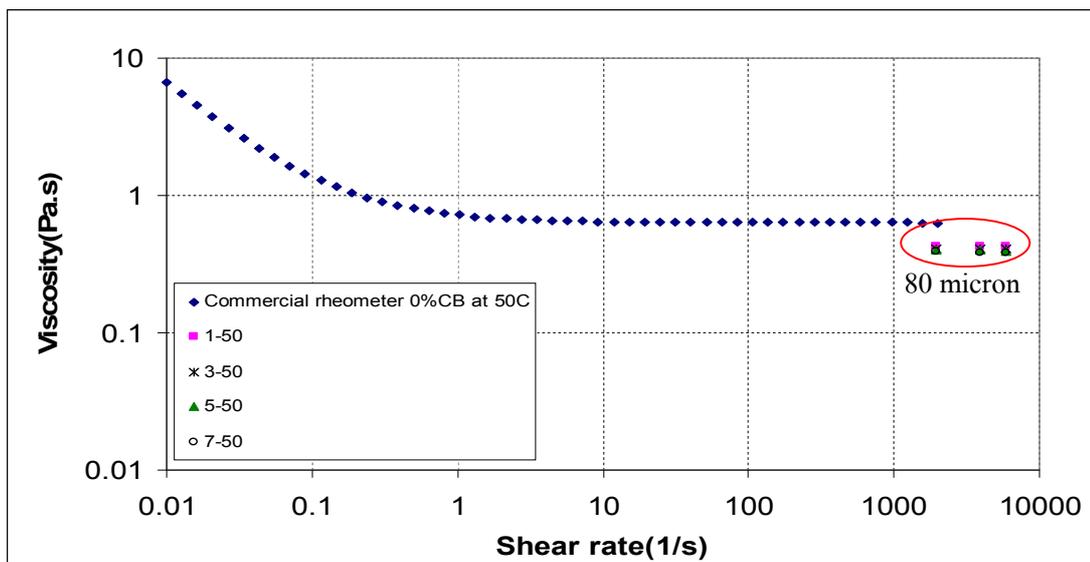
เปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% และ 2.5% โดยน้ำหนัก ระหว่างค่าที่ถูกพิตด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัย คือ การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำและความหยาบผิวช่องทางไหล โดยแสดงการเปรียบเทียบการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในภาพที่ 16 และ 17 และการเปรียบเทียบการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 18 และ 19 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์แสดงหมายเลขสภาวะทดลองเป็นไปตามตารางที่ 5 และ 6



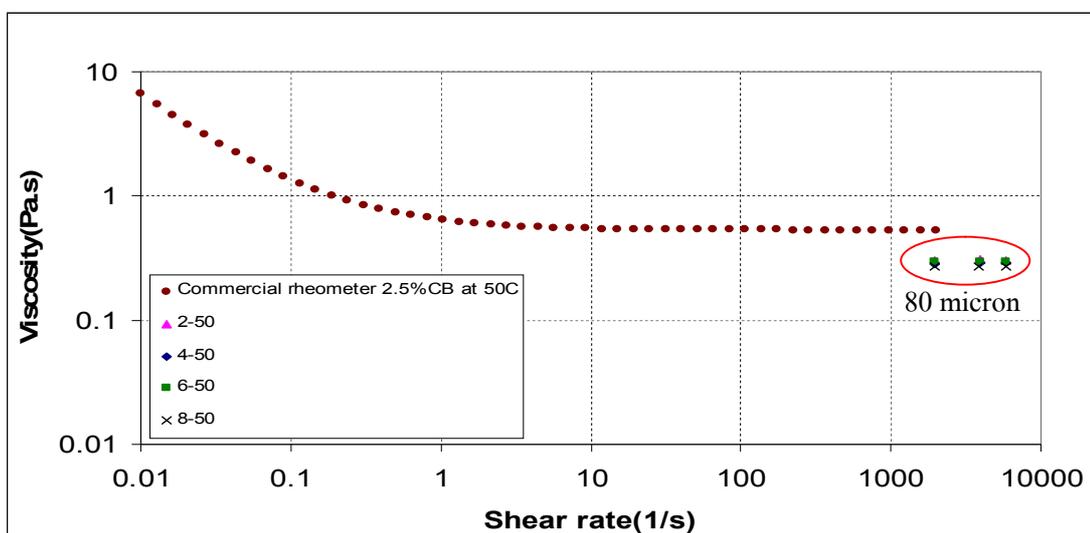
ภาพที่ 16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยนำหาค่าระหว่างค่าที่ถูกรีดด้วยแบบจำลองความหนืดชิพส์โก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยนำหาค่าระหว่างค่าที่ถูกรีดด้วยแบบจำลองความหนืดชิพส์โก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยนำหาค่าระหว่างค่าที่ถูกพิตด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนืดของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยนำหาค่าระหว่างค่าที่ถูกพิตด้วยแบบจำลองความหนืดซิสโก้จากเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานกับค่าความหนืดที่คำนวณได้จากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่สภาวะทดลองต่างๆ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จากการเปรียบเทียบความหนืดระดับมหภาคและระดับจุลภาค ดังแสดงในภาพที่ 16 ถึง 19 พบว่า ความหนืดที่เกิดขึ้นในระดับจุลภาคมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับระดับมหภาค เนื่องจากเกิดการลื่นไถล จึงนำข้อมูลความหนืดที่ได้ไปคำนวณหาค่าความยาวลื่นไถลซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ความหนืดมีค่าลดลง โดยคิดเทียบกับค่าความหนืดเฉลี่ยที่อัตราเฉือนสูงจากสภาวะอ้างอิงระดับมหภาคที่ อุณหภูมิทดลอง 25 และ 50 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4 ได้ข้อมูลของค่าความยาวลื่นไถลจากเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคเมื่อขนาดความหนาช่องทางไหล 80 ไมโครเมตร อุณหภูมิทดลอง 25 และ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ดังตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงค่าความหนืดเฉลี่ยที่อัตราเฉือนสูงจากสภาวะอ้างอิงระดับมหภาคสำหรับการทดลองที่อุณหภูมิ 25 และ 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิทดลอง (องศาเซลเซียส)	ความหนืดเฉลี่ยที่อัตราเฉือนสูง (Pa.s)
25	2.039
50	0.621

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส

หมายเลขสภาวะทดลอง	ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหนืดหยาบผิวช่องทางไหล	ความยาวลื่นไถลครั้งที่ 1 (ไมโครเมตร)	ความยาวลื่นไถลครั้งที่ 2 (ไมโครเมตร)	ความยาวลื่นไถลเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
1-25	-1	-1	-1	3.91	3.84	3.88
2-25	+1	-1	-1	6.54	6.71	6.63
3-25	-1	+1	-1	4.30	4.19	4.25
4-25	+1	+1	-1	10.10	10.15	10.13
5-25	-1	-1	+1	6.72	6.69	6.71
6-25	+1	-1	+1	10.06	9.86	9.96
7-25	-1	+1	+1	7.18	7.16	7.17

ตารางที่ 5 (ต่อ)

หมายเลขสถานะทดลอง	ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหยابผิวช่องทางไหล	ความยาวเส้นไถลครั้งที่ 1 (ไมโครเมตร)	ความยาวเส้นไถลครั้งที่ 2 (ไมโครเมตร)	ความยาวเส้นไถลเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
8-25	+1	+1	+1	10.96	10.99	10.98

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส

หมายเลขสถานะทดลอง	ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหยابผิวช่องทางไหล	ความยาวเส้นไถล ครั้งที่ 1 (ไมโครเมตร)	ความยาวเส้นไถล ครั้งที่ 2 (ไมโครเมตร)	ความยาวเส้นไถลเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
1-50	-1	-1	-1	6.16	6.19	6.18
2-50	+1	-1	-1	10.20	10.15	10.18
3-50	-1	+1	-1	6.89	6.84	6.87
4-50	+1	+1	-1	10.78	10.91	10.85
5-50	-1	-1	+1	7.21	7.27	7.24
6-50	+1	-1	+1	10.51	10.62	10.57
7-50	-1	+1	+1	7.58	7.52	7.55
8-50	+1	+1	+1	11.27	11.31	11.29

4. ผลการวิเคราะห์ค่าความยาวคลื่นไกล

นำค่าความยาวคลื่นไกลที่คำนวณได้ไปตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองและวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab, Version15 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความยาวคลื่นไกล ทั้งที่อุณหภูมิ 25 และ 50 องศาเซลเซียส โดยมีสมมติฐานการทดลอง ดังนี้

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อค่าความยาวคลื่นไกล

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อค่าความยาวคลื่นไกล

หรือ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

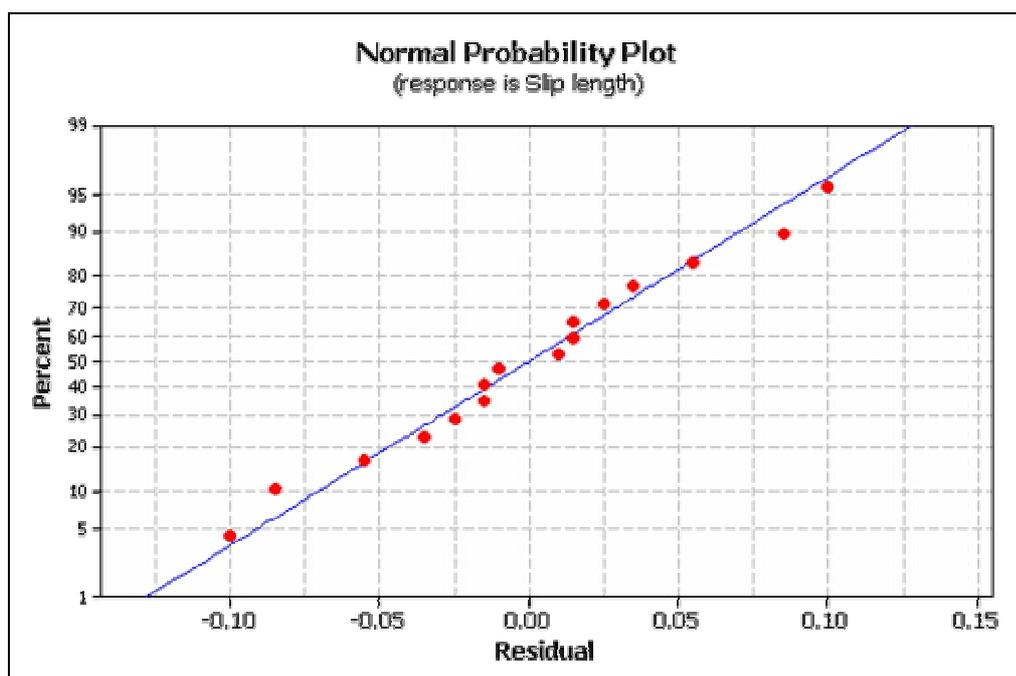
$H_1 : \mu_i \neq \mu_j ; \forall i \neq j$ เมื่อ $i, j = 1, 2, 3$

เมื่อ μ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความยาวคลื่นไกล

4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความยาวเส้นไถ ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส

4.1.1 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง

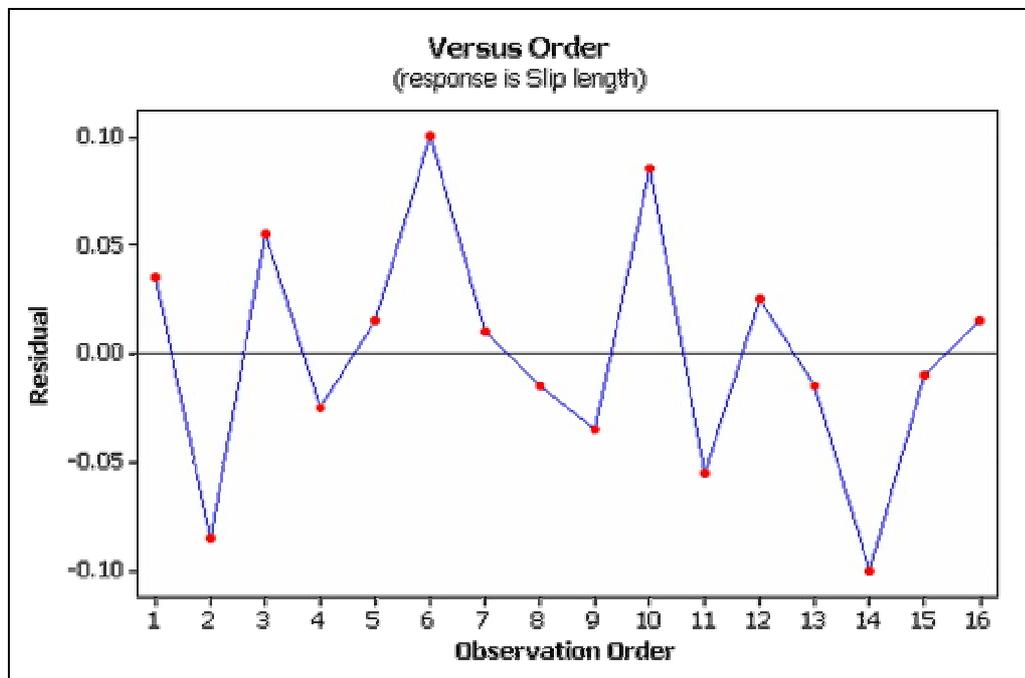
ก. สมมติฐานของความเป็นปกติ



ภาพที่ 20 กราฟแสดง Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบสมมติฐานความเป็นปกติของการแจกแจงข้อมูล ดังภาพที่ 20 พบว่า เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

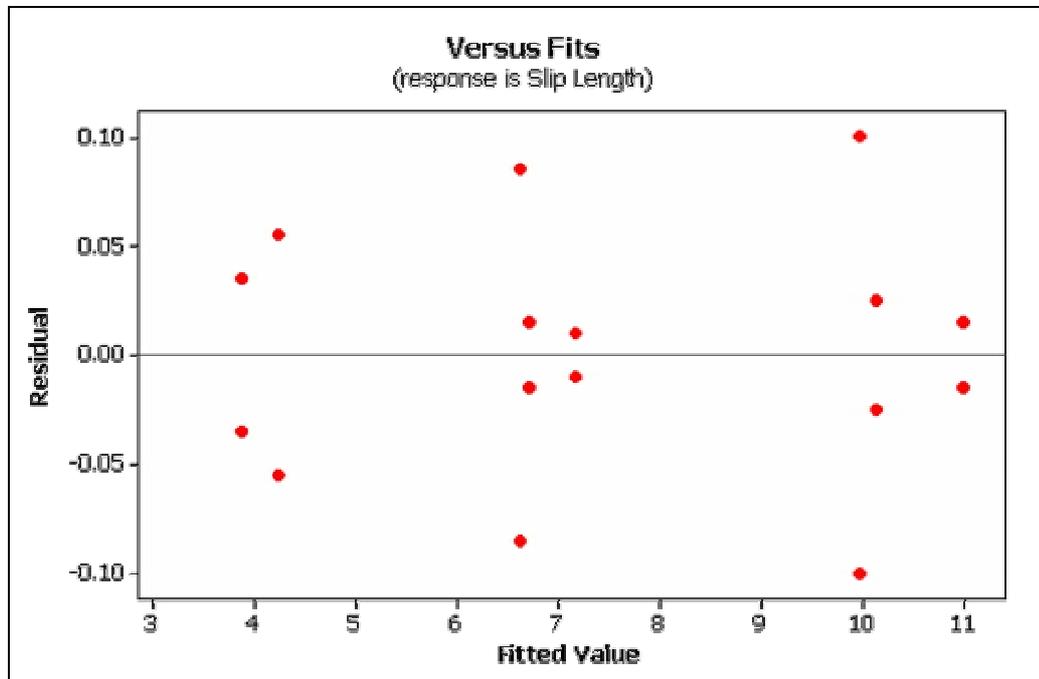
ข. สมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 21 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 21 พบว่า ข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกันและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

ค. สมมติฐานของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 22 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต สำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 22 พบว่า ข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่า ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

4.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส แสดง
ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส

แหล่งความ ผันแปร	องศาเสรี (Degree of Freedom)	ผลบวก		อัตราส่วน F	ค่า P-Value
		กำลังสอง (Adj SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง (Adj MS)		
A	1	61.544	61.544	10868.70	0.0000
B	1	7.156	7.156	1263.69	0.0000
C	1	24.701	24.701	4362.19	0.0000
A*B	1	3.386	3.386	597.90	0.0000
A*C	1	0.616	0.616	108.83	0.0000
B*C	1	1.428	1.428	252.19	0.0000
A*B*C	1	1.664	1.664	293.88	0.0000
Error	8	0.045	0.006		
Total	15				

S = 0.08, R-Sq = 99.95%, R-Sq(adj) = 99.92%

กำหนด ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย แทนด้วยสัญลักษณ์ A
การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน แทนด้วยสัญลักษณ์ B
ความหยาบผิวช่องทางไหล แทนด้วยสัญลักษณ์ C

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส ของ
การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 พบว่า อิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ศึกษาทั้งสามชนิดมีผลต่อค่าเฉลี่ย
ความยาวเส้นไหลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05

4.1.3 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด (Least Squares Means)

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุดสำหรับค่าความยาวต้นไถล เพื่อวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส

A*B*C			ค่าเฉลี่ย (Mean)	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ของค่าเฉลี่ย (SE Mean)
-1	-1	-1	3.875	0.05321
1	-1	-1	6.625	0.05321
-1	1	-1	4.245	0.05321
1	1	-1	10.125	0.05321
-1	-1	1	6.705	0.05321
1	-1	1	9.960	0.05321
-1	1	1	7.170	0.05321
1	1	1	10.975	0.05321

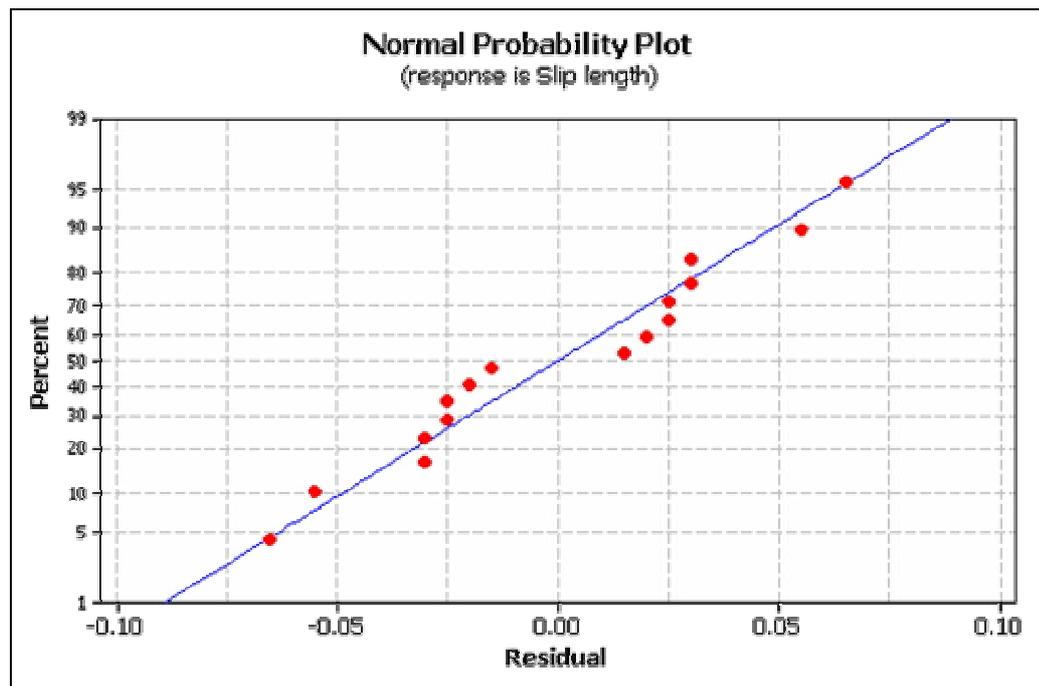
กำหนด ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย แทนด้วยสัญลักษณ์ A
การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน แทนด้วยสัญลักษณ์ B
ความหยาบผิวช่องทางไหล แทนด้วยสัญลักษณ์ C

จากตารางที่ 8 พบว่า ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ศึกษาทั้งสามชนิด ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำและความหยาบผิวช่องทางไหล หากใช้ปัจจัยทุกตัวที่ระดับสูง คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก มีการเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำและใช้ความหยาบผิวช่องทางไหล $R_s = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าจะทำให้ได้ค่าความยาวต้นไถลสูงสุด

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความยาวคลื่นไถล ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส

4.2.1 การตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง

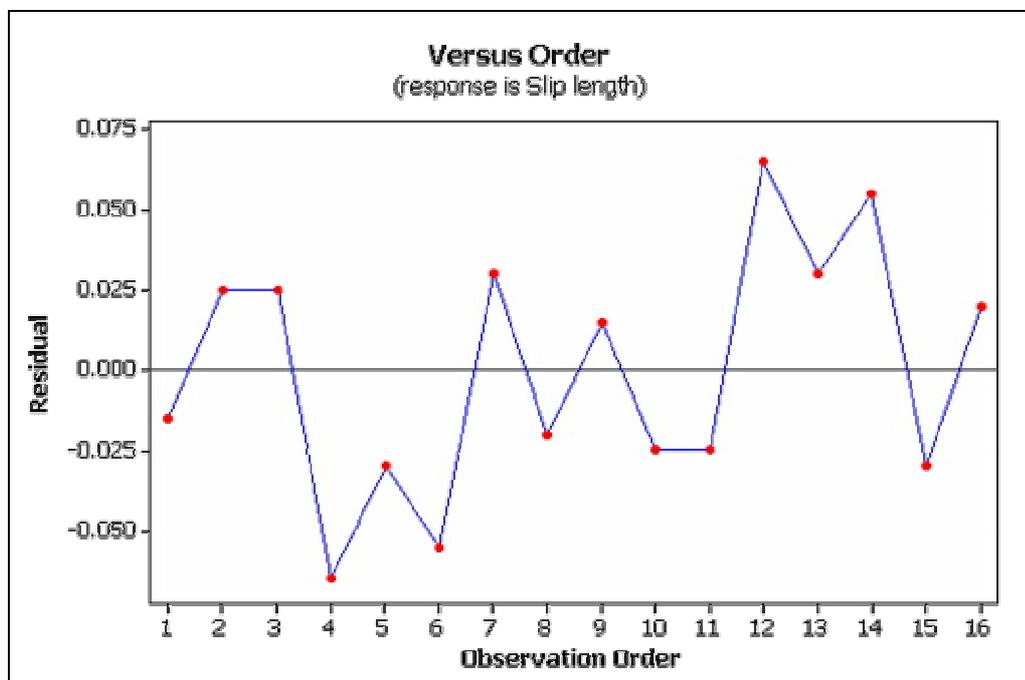
ก. สมมติฐานของความเป็นปกติ



ภาพที่ 23 กราฟแสดง Normal Probability Plot ของค่าคลาดเคลื่อน สำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิตดลอง 50 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบสมมติฐานความเป็นปกติของการแจกแจงข้อมูล ดังภาพที่ 23 พบว่า เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

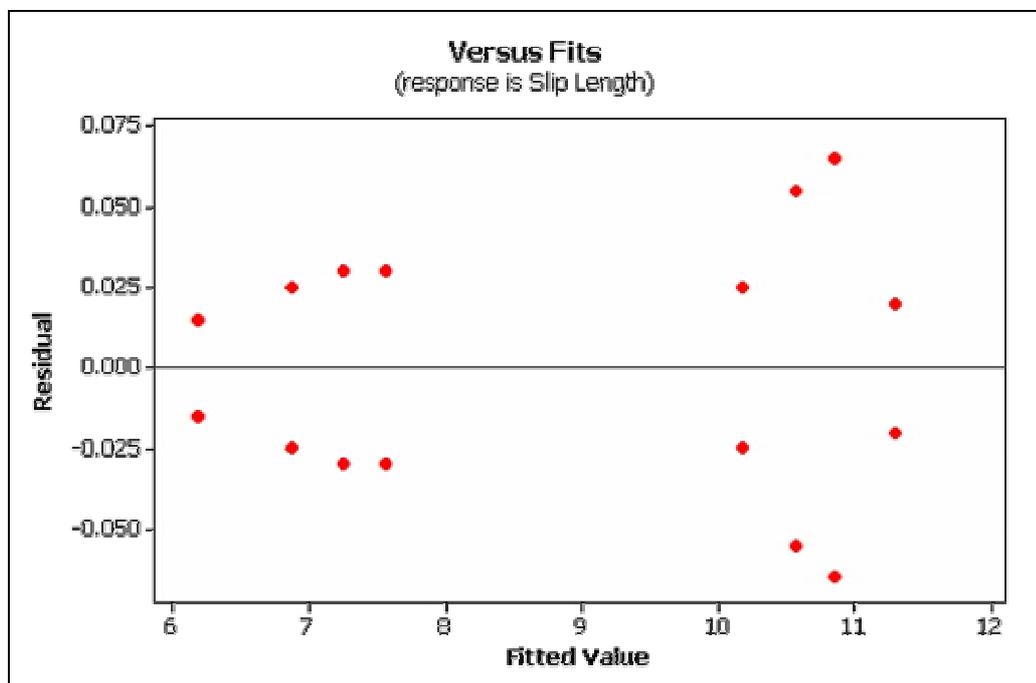
ข. สมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 24 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับของข้อมูล สำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 24 พบว่า ข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกันและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

ค. สมมติฐานของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 25 กราฟแสดงค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่ถูกฟิต สำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 25 พบว่า ข้อมูลค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแกนและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่า ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส แสดง
ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส

แหล่งความ ผันแปร	องศาเสรี	ผลบวก กำลังสอง	ค่าเฉลี่ยผลบวก กำลังสอง	อัตราส่วน F	ค่า P-Value
A	1	56.5880	56.5880	20718.72	0.0000
B	1	1.4340	1.4340	525.04	0.0000
C	1	1.6706	1.6706	611.65	0.0000
A*B	1	0.0390	0.0390	14.28	0.0050
A*C	1	0.2093	0.2093	76.63	0.0000
B*C	1	0.0264	0.0264	9.67	0.0140
A*B*C	1	0.0473	0.0473	17.32	0.0030
Error	8	0.0219	0.0027		
Total	15				

S = 0.05, R-Sq = 99.96%, R-Sq(adj) = 99.93%

กำหนด ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย แทนด้วยสัญลักษณ์ A
การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน แทนด้วยสัญลักษณ์ B
ความหยาบของพื้นผิวแม่พิมพ์ แทนด้วยสัญลักษณ์ C

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส ของ
การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 พบว่า อิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ศึกษาทั้งสามชนิดมีผลต่อค่าเฉลี่ย
ความยาวเส้นไถลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05

4.2.3 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุดสำหรับค่าความยาวคลื่นไถล เพื่อวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส

A*B*C			ค่าเฉลี่ย	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ของค่าเฉลี่ย
-1	-1	-1	6.175	0.0367
1	-1	-1	10.175	0.0367
-1	1	-1	6.865	0.0367
1	1	-1	10.845	0.0367
-1	-1	1	7.240	0.0367
1	-1	1	10.565	0.0367
-1	1	1	7.550	0.0367
1	1	1	11.290	0.0367

กำหนด ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย แทนด้วยสัญลักษณ์ A
การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน แทนด้วยสัญลักษณ์ B
ความหยาบผิวช่องทางไหล แทนด้วยสัญลักษณ์ C

จากตารางที่ 10 พบว่า ผลของอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ศึกษาทั้งสามชนิด ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำและความหยาบผิวช่องทางไหล หากใช้ปัจจัยทุกตัวที่ระดับสูง คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก มีการเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำและใช้ความหยาบผิวช่องทางไหล $R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าจะทำให้ได้ค่าความยาวคลื่นไถลสูงสุด

วิจารณ์

การทดสอบความถูกต้องของเครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคเมื่อใช้น้ำซึ่งเป็นของเหลวนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) เป็นสารตัวอย่าง ที่ความหนาช่องทางไหลเท่ากับ 80 ไมโครเมตร พบว่า ให้ค่าความหนืดใกล้เคียงกับเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานเมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน เท่ากับ 1 มิลลิเมตร แสดงว่า เครื่องทดสอบความหนืดในช่องทางไหลระดับจุลภาคที่ถูกสร้างขึ้นให้ข้อมูลที่มีความถูกต้อง

จากการทดลองที่สภาวะต่างๆ พบว่า ความหนืดในระดับจุลภาคมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับระดับมหภาค แสดงว่า มีการลื่นไถลเกิดขึ้นที่ขนาดความหนาช่องทางไหล 80 ไมโครเมตร จึงได้คำนวณหาค่าความยาวลื่นไถล แล้ววิเคราะห์ด้วยการทดลองเชิงแฟลคทอเรียลแบบ 2^3 พบว่า อิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 3 ชนิด คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ และความหยาบผิวช่องทางไหล มีผลอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้วมีค่า P-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งยังสามารถอธิบายผลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อรีโอโลยีของสารได้ ดังนี้

1. การมีอยู่ของอนุภาคคาร์บอนแบล็คภายในสารแขวนลอยช่วยลดการยึดเกาะระหว่างของไหลกับผนังช่องทางไหลลง ส่งผลให้มีการลื่นไถลเกิดขึ้น
2. ผนังของช่องทางไหลมีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ ทำให้สารแขวนลอยซึ่งมีสมบัติทางเคมีแบบชอบน้ำไม่เกิดการเวท (Dewet) บนผนังช่องทางไหล ส่งผลให้การไหลของของไหลดีขึ้น เกิดการลื่นไถล
3. การมีความหยาบผิวช่องทางไหล ทำให้สารมีมุมสัมผัสที่ผิว (Contact Angle) สูงขึ้นของไหลไม่เกิดเป็นฟิล์มบนผิวช่องทางไหล และไม่เกิดการเวทบนผิวช่องทางไหล การไหลของสารจึงดีขึ้น เกิดการลื่นไถล

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยที่มุ่งศึกษาค่าความยาวคลื่น โกลที่เกิดขึ้นในช่องทางไหลระดับจุลภาค และปัจจัยที่มีผลต่อค่าความยาวคลื่น โกล ซึ่งจะทำได้ ทำให้สามารถคำนวณค่าความดันที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ขึ้นงานในแม่พิมพ์ได้ ในเบื้องต้นพบว่า ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความยาวคลื่น โกล คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ และความหยาบผิวช่องทางไหล ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไหลของสารแขวนลอยคาร์บอนแบล็คในระดับจุลภาคด้วยการทดลองเชิงแฟลทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 2 ค่า คือ 25 และ 50 องศาเซลเซียส

จากการทดลองที่สภาวะต่างๆ พบว่า ความหนืดในระดับจุลภาคมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับระดับมหภาคเนื่องจากการคลื่น โกลเกิดขึ้นที่ขนาดความหนาช่องทางไหล 80 ไมโครเมตร แสดงว่าในกระบวนการเคลื่อนที่ขึ้นงานในแม่พิมพ์มีการคลื่น โกลเกิดขึ้น จึงได้คำนวณหาค่าความยาวคลื่น โกลของแต่ละสภาวะทดลอง ผลการทดลองด้วยการทดลองเชิงแฟลทอเรียลแบบ 2^3 พบว่า ปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 3 ชนิด คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ และความหยาบผิวช่องทางไหล มีผลต่อค่าเฉลี่ยความยาวคลื่น โกลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทดสอบที่สองระดับอุณหภูมิ

สำหรับการพิจารณาหาสภาวะทดลองที่ให้ค่าความยาวคลื่น โกลสูงสุดเพื่อให้เหมาะต่อการนำไปใช้งานการเคลื่อนที่ขึ้นงานในแม่พิมพ์ พบว่า เมื่อใช้ปัจจัยที่ศึกษาทั้งสามชนิดในระดับสูง คือ ปริมาณคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก มีการเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคนที่มีสมบัติทางเคมีแบบไม่ชอบน้ำ และใช้ความหยาบผิวช่องทางไหล $R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส ให้ค่าความยาวคลื่น โกล เท่ากับ 10.98 ไมโครเมตร และที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส ให้ค่าความยาวคลื่น โกล เท่ากับ 11.29 ไมโครเมตร

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความยาวคลื่น ไกลเบื้องต้น เพื่อให้ได้สภาวะที่มีค่าความยาวคลื่นไกลสูงสุด ผู้วิจัยจึงมีความเห็นว่าควรมีการดำเนินการต่อไป คือ

1. ควรมีการศึกษาผลของปัจจัยแต่ละชนิดเพิ่มเติมเป็น 3 ระดับจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้
 - ปริมาณคาร์บอนแบล็คในสารแขวนลอย
 - ขนาดความหยาบผิวช่องทางไหล
 - ชนิดของสารเคลือบ
 - อุณหภูมิทดลอง
2. เนื่องจากมีข้อจำกัดของกระบอกฉีดแก้วทำให้สามารถทนความดันได้ไม่เกิน 5 บาร์ จึงอาจมีการประยุกต์เครื่องมือเพื่อให้สามารถทนแรงดันได้มากขึ้น
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสารแขวนลอยชนิดอื่นที่มีสมบัติการไหลใกล้เคียงกัน เพื่อพัฒนาคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์ต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ด้านสหวิชาการพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- อิทธิพล แจ่มชัด และสุภารัตน์ รัชชชชี. 2548. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- Aramphongphun, C. and J.M. Castro. 2007. Microfluidics and rheology of dilute carbon black suspensions for in-mould coating (IMC) applications. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**. 15: 157-170.
- Bhagavatula, N. and J.M. Castro. 2007. Modelling and experimental verification of pressure prediction in the in-mould coating (IMC) process for injection moulded parts. **Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering**. 15: 171-189.
- Chen, C.S., S.C. Chen, W.L. Liaw and R.D. Chien. 2008. Rheological behavior of POM polymer melt flowing through micro-channels. **European polymer journal**. 44: 1891-1898.
- Chen, S.C., R.I. Tsai, R.D. Chien and T.K. Lin. 2005. Preliminary study of polymer melt rheological behavior flowing through micro-channels. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 32: 501-510.
- Choi, C., K. Johan, A. Westin and S. Breuer. 2003. Apparent slip flows in hydrophilic and hydrophobic microchannels. **Physics of fluids**. 15: 2897-2902.
- Derek, C., X. Liu and D. Carl. 2002. **Analysis of slip flow in microchannels**. Thesis, University of California.

Montgomery, D.C. 2005. **Design and Analysis of Experiments**. 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., the United States of America.

Nithi, A., N. On-uma, J. Wutthinan and S. Sitthisuntorn. 2008. Water Repellant Glass Surfaces Fabricated by Micro Lithography, pp. 313-315. **Thailand Materials Science and Technology Conference 5th**. National Metal and Materials Technology Center, Miracle Grand Convention Hotel.

Wilkes, J.O. 2006. **Fluid Mechanics for Chemical Engineers**. 2nd ed. Pearson Education, Inc., the United States.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของสารเคมี

Safety Data Sheet

Date:	December 26, 2007	Ref:	T-S-SP058
Commercial name of Product		Issue no:	04
	Qester™	QE-1171-70	Page 1 of 5

1. Chemical products and company identification

- 1.1 Chemical Description:** Synthetic fatty acid modified alkyd resin, solution in Xylene
- CAS No:** N.A.
- 1.2 Manufacturer/Supplier:** **Qualimer Co., Ltd.**
29/3 Moo 2,
Banbung-Klang Rd., Km.56,
Nongyai, Chonburi 20190 Thailand
- 1.3 For emergency information:** Tel : (038) 168-572-76
Fax : (038) 168-577

2. COMPOSITION/COMPONENTS INFORMATION

Synthetic fatty acid modified alkyd resin

Approx. 70 % in xylene

Xylene isomers mixture

Weight % approx. 30

CAS No.: 1330-20-7

Index No.: 601-022-00-9

EEC No.: 215-535-7

Classification: R10; Xn R20/21; Xi R38

Specific threshold concentration

Xn; R 20/21 = from 12.5 %

Xn; R 20/21-38 = from 20 %

3. HAZARD IDENTIFICATION

Flammability: Flammable
Flash Point: 27° C Method : TOC
Toxicity : -
TLV (TWA) 100 ppm, Xylene

This information is based on present knowledge of Qualimer. It is recommended that customers carry out their own assays to guarantee the safety in the use of the product.

Doc No: SP-QP-09-02

Revision No: 00

Issue Date : 08/05/2008

ภาพผนวกที่ ก1 เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของอะคริลิเกรซิน

Safety Data Sheet

Date:	December 26, 2007	Ref: T-S-SP058
Commercial name of Product		Issue no: 04
	Qester™ QE-1171-70	Page 2 of 5

4. FIRST AID MEASURES

Inhalation: If respiratory problems arise, move the victim to fresh air. Give artificial respiration only if breathing has stopped. Give cardiopulmonary resuscitation (CPR) if there is no breathing and no pulse. Obtain medical advice immediately.

Ingestion: If victim is alert and not convulsing, rinse mouth out and give 200-300 ml (1 cup) of water and dilute material. Do not induce vomiting. If spontaneous vomiting occurs, have victim lean forward with head down to avoid breathing in of vomits, rinse mouth and administer more water. Obtain medical attention immediately

Skin contact: In case of contact, immediately flush skin with plenty of water. Remove contaminated clothing and shoes. Wash clothing before reuse. Thoroughly clean shoes before reuse. Get medical attention

Eye contact: Immediately flush eyes with running water thoroughly for 5 minutes. Hold eyelids open during flushing. If irritation persists, repeat flushing. Obtain medical attention

5. FIRE FIGHTING MEASURE

Extinguishing media: extinguishing powder or CO₂
In case of bigger fires also foam and water spray.

In case of bigger fire formation of carbon monoxide and chemicals from decomposition may form. Fire fighters have to wear self-contained breathing apparatus.

6. SPILL AND LEAKAGE

Do not empty into drains. Remove mechanically; cover remainders with absorbent material (e.g. saw dust, chemical binder based on calcium silicate hydrate, sand). Keep damp in a safe ventilated area.
Further disposal: Storage on approved landfill or special refuse dump, or by incineration.

7. HANDLING AND STORAGE

Handling: Avoid contact with eyes, skin or clothing, breathing aerosols, mists and vapors. Wash thoroughly with soap and water after handling. Wash contaminated clothing thoroughly before re-use. Use normal good industrial hygiene and housekeeping practices.

Process Hazards: Avoid PVC and rubber gaskets and hoses.

Storage Requirement: Avoid PVC and rubber Gaskets and hoses.

Storage Temperature: Avoid exposure to temperature above 50 °C
Ensure adequate ventilation or exhaust ventilation in the working area.

This information is based on present knowledge of Qualimer. It is recommended that customers carry out their own assays to guarantee the safety in the use of the product.

Doc No: SP-QP-09-02

Revision No: 00

Issue Date : 08/05/2008

ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Safety Data Sheet

Date:	December 26, 2007	Ref:	T-S-SP058
Commercial name of Product		Issue no:	04
	Qester™	QE-1171-70	Page 3 of 5

8. EXPOSURE CONTROL / PERSONNEL PROTECTION

Protection of workers –

Threshold value in air defined by TRGS 900 (MAK value):

Xylene (all isomers) 100 ppm corresp.
 CAS No.: 1330–20–7 (eight hours average value)
 Maximum limit of excess factor 2(II)

Remark: H (= can be reserved through the skin), DFG

Engineering Measures:

Where this material is not used in a closed system, good enclosure and local exhaust ventilation should be provided to control exposure.

Respiratory Protection:

Where exposures are below the established exposure limit, no respiratory protection is required. Where exposures exceed the established exposure limit, use respiratory protection recommended for the material and level of exposure.

Eye Protection:

Wear eye/face protection such as chemical splash proof goggles or face shield. Eyewash equipment and safety shower should be provided in areas of potential exposure.

Skin Protection:

Avoid skin contact. Wear impermeable gloves and suitable protective clothing.

Additional Advice:

Food, beverages, and tobacco products should not be carried, stored, or consumed where this material is in use. Before eating, drinking, or smoking, wash face and hands thoroughly with soap and water. It is recommended that a shower be taken after completion of work shift especially if significant contact has occurred. Work clothing should then be laundered prior to reuse. Street clothing should be stored separately from work clothing and protective equipment. Work clothing and shoes should not be taken home.

9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Form:	Liquid
Color:	Amber
Boiling point:	125° C
Density:	1.05 approx. 25° C, g/cc
Viscosity	1,200 – 2,300 approx. Cps, 25° C
Solubility	Organic solvents Insoluble in water
Flammable limits in Air	Xylene lower: 1.0 % by vol. Upper: 8.0 % by vol.
Ignition Temperature	>450 °C
Flash point	25° C approx.

This information is based on present knowledge of Qualimer. It is recommended that customers carry out their own assays to guarantee the safety in the use of the product.

Doc No: SP-QP-09-02

Revision No: 00

Issue Date: 08/05/2008

Safety Data Sheet

Date:	December 26, 2007	Ref: T-S-SP058
Commercial name of Product		Issue no: 04
Qester™	QE-1171-70	Page 4 of 5

10. STABILITY AND REACTIVITY

Stability: Stable under normal conditions of storage and uses
 Reactivity: Non-reactive under normal conditions of storage and use.
 Conditions / material to avoid: Avoid contact with oxidizing agents, strong acids and alkalis. Avoid heating containers to prevent build-up of pressure with risk of subsequent explosion and fire.

11. TOXICOLOGY INFORMATION

LD₅₀ oral: Not established
 LD₅₀ skin contact: Not established
 LD₅₀ inhalation: Not established

12. ENVIRONMENTAL INFORMATION

Evidence suggests it is unlikely this material will present a serious environmental hazard. However, the solvent may be classified as being dangerous for the environments. The product should not be allowed to enter drains or watercourse or be deposited where it can affect ground or surface waters.

13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

Dispose of in compliance with local and state regulations.

14. TRANSPORT INFORMATION

This material is regulated by the US DOT.
 Proper Shipping Name is: Flammable Liquid, N.O.S: Resin solution
 UN ID Number is : UN 1866
 UN Class : 3
 IMDG Glass : 3.3
 Packing Group : III
 Special Provisions : No Data
 Hazard Class : 3.0
 Additional Hazard Class : No Data
 Additional Hazard Class : No Data

DOT Hazard Information

Explosive : No
 Explosive Class : No
 Data Description : No Data
 Skin Corrosive : No
 Metal Corrosive : No
 Poisonous : No

This information is based on present knowledge of Qualimer. It is recommended that customers carry out their own assays to guarantee the safety in the use of the product.

Doc No: SP-QP-09-02

Revision No: 00

Issue Date : 08/05/2008

ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Safety Data Sheet

Date:	December 26, 2007	Ref: T-S-SP058
Commercial name of Product		Issue no: 04
	Qester™ QE-1171-70	Page 5 of 5

15. REGULATORY INFORMATION

SARA Title III information:	This product contains the following toxic chemicals subject to the reporting requirements of Section 313 of the Emergency Planning and Community Right-To-Know Act of 1986 and of 40 CFR 372
TSCA information:	All ingredients are on the TSCA Chemical Substances Inventory.
California Proposition 65 information:	This product is NOT subjected to Proposition 65 notification requirement.
Canadian WHMIS Classification:	Class B, Division 2 – Flammable liquid (CPR35) Class D, Division 2B --Toxic

16. OTHER INFORMATION

The data given here is based on current knowledge and experience. The purpose of this safety data sheet is to describe the products in terms of their safety requirements. The data does not signify any warranty with regard to the products' properties.

This information is based on present knowledge of Qualimer. It is recommended that customers carry out their own assays to guarantee the safety in the use of the product.

Doc No: SP-QP-09-02	Revision No: 00	Issue Date : 08/05/2008
---------------------	-----------------	-------------------------

SAFETY DATA SHEET			LB	
844-9955 CHROMA-CHEM® LAMP BLACK				
Material no.		Version	1.1 / AU	
Specification	139123	Revision date	2007/11/14	
VA-Nr		Print Date	20.02.2008	
		Page	1 / 8	

1. IDENTIFICATION OF THE MATERIAL AND SUPPLIER

Product information

Trade name : 844-9955 CHROMA-CHEM® LAMP BLACK LB
Code No. : 8449955BL

Company : Evonik Degussa Australia Pty. Ltd.
30, Commercial Drive
Dandenong, Vic. 3175
Australia

Telephone : +61 3 9703-8888
Telefax : +61 3 9703-8890

Emergency telephone number : +61 3 9703-8888 (BH)

Use of the Substance / Preparation : Non-aqueous colorant

2. HAZARDS IDENTIFICATION

**This material is hazardous according to criteria of Australian Safety and Compensation Council (ASCC).
Classified as Dangerous Goods by criteria of the Australian Dangerous Goods Code (ADG Code) for Transport by Road and Rail.**

Symbol(s)	Xi	Irritant
R-pharse(s)	R10	Flammable.
	R36	Irritating to eyes.
S-pharse(s)	S16	Keep away from sources of ignition - No smoking.
	S26	In case of contact with eyes, rinse immediately with plenty of water and seek medical advice.
	S23	Do not breathe vapour.
	S28	After contact with skin, wash immediately with plenty of soap and water.

3. COMPOSITION / INFORMATION ON INGREDIENTS

• 2-Methoxy-1-methylethyl acetate	30% - 60%
CAS-No. 108-65-6	
	R10
	R36
• Naphtha (petroleum), hydrotreated heavy	10% - 30%
CAS-No.	
	Xn
	R65, R66
• Carbon black	10% - 30%
CAS-No. 1333-86-4	
• Ethoxylated alkyl ether phosphate	< 10%
CAS-No.	
	Xi
	R38, R41

MSDS-AUS(P51/100) / 14.11.2007 00:45

ภาพผนวกที่ ก2 เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของคาร์บอนแบล็ค

SAFETY DATA SHEET		844-9955 CHROMA-CHEM® LAMP BLACK		LB	
Material no.		Version	1.1 / AU		
Specification	139123	Revision date	2007/11/14		
VA-Nr		Print Date	20.02.2008		
		Page	2 / 8		

- **Ingredients determined not to be hazardous** 30% - 60%
- CAS-No.

See section 16 for text of risk phrases

Other information

This material is classified as hazardous under OSHA regulations.

4. FIRST AID MEASURES

Inhalation

If inhaled, remove to fresh air. If breathing is difficult, give oxygen. If unconscious, evaluate the need for artificial respiration. Get immediate medical attention.

Skin contact

Immediately flush skin with plenty of water for at least 15 minutes while removing contaminated clothing and shoes. Thoroughly wash clothing, shoes and protective equipment before reuse or discard. Get medical attention if irritation develops or persists.

Eye contact

In case of contact, immediately flush eyes with plenty of water for at least 30 minutes, while holding eyelids apart. Do not allow contaminated water to contact the unaffected eye or face during irrigation of an affected eye. Obtain medical attention immediately.

Ingestion

Do not induce vomiting. If vomiting occurs spontaneously, keep head below hips to prevent aspiration of liquid into the lungs. Get medical attention. If the heart has stopped or breathing has stopped, trained personnel should begin cardiopulmonary resuscitation or artificial respiration immediately.

5. FIRE-FIGHTING MEASURES

Suitable extinguishing media

Use water spray or fog, foam, dry chemical or CO₂.

Hazards from combustion products

Combustible liquid. Vapors can travel to a source of ignition and flash back. Explosive mixtures may occur at temperatures at or above the flashpoint.

Further information

As in any fire, wear self-contained positive-pressure breathing apparatus, (MSHA/NIOSH approved or equivalent) and full protective gear. Containers can build up pressure if exposed to heat (fire). Cool with water spray.

SAFETY DATA SHEET			LB	
844-9955 CHROMA-CHEM® LAMP BLACK				
Material no.		Version	1.1 / AU	
Specification	139123	Revision date	2007/11/14	
VA-Nr		Print Date	20.02.2008	
		Page	3 / 8	

Hazchem code
3[Y]

6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Additional advice
Absorb spill with inert material, then place in a chemical waste container. After removal, flush contaminated area with water and collect for disposal. Clean up spills immediately. Remove sources of ignition and ventilate area. Use a respirator and other protective equipment as outlined in Section 8. Obey relevant local, state, provincial and federal laws and regulations. Do not contaminate any lakes, streams, ponds, groundwater or soil.

7. HANDLING AND STORAGE

Handling

Safe handling advice
Keep away from heat. Keep away from sparks, flames and other sources of ignition. Avoid contact with eyes, skin and clothing. Avoid breathing vapor or mist. Use with adequate ventilation. The need for grounding and bonding of containers in accordance with OSHA 29 CFR 1910.106 and NFPA 77 should be assessed for all product transfers. Follow all MSDS/label precautions even after the container is emptied because it may retain product residues. Wash thoroughly after handling.

Storage

Requirements for storage areas and containers
Keep in a dry, cool place.
Keep container closed when not in use.
Residual vapors might explode on ignition; do not apply heat, cut, drill, grind or weld on or near this container.

8. EXPOSURE CONTROLS / PERSONAL PROTECTION

Biological limit values
No biological limit allocated.

Components with workplace control parameters

- **2-Methoxy-1-methylethyl acetate**

CAS-No.	108-65-6	
Control parameters	50 ppm	Time Weighted Average (TWA):(AU OEL)
	274 mg/m3	
Control parameters	100 ppm	Short Term Exposure Limit (STEL):(AU OEL)
	548 mg/m3	
Control parameters		Skin designation:(AU OEL)
	Can be absorbed through the skin.	
- **Carbon black**

CAS-No.	1333-86-4	
Control parameters	3 mg/m3	Time Weighted Average (TWA):(AU OEL)

Engineering measures
Use explosion-proof ventilation equipment.

MSDS-AUS/IP51/100/14.11.2007 00.45

ภาพผนวกที่ ก2 (ต่อ)

SAFETY DATA SHEET**844-9955 CHROMA-CHEM® LAMP BLACK****LB**

Material no.		Version	1.1 / AU
Specification	139123	Revision date	2007/11/14
VA-Nr		Print Date	20.02.2008
		Page	4 / 8

Personal protective equipment**Respiratory protection**

A respiratory protection program that meets OSHA 1910.134 and ANSI Z88.2 or applicable federal/provincial requirements must be followed whenever workplace conditions warrant respirator use. NIOSH's "Respirator Decision Logic" may be useful in determining the suitability of various types of respirators.

Skin Protection

Use impermeable gloves.

Eye protection

Chemical resistant goggles must be worn.

Skin and body protection

A safety shower and eye wash fountain should be readily available.

To identify additional Personal Protective Equipment (PPE) requirements, it is recommended that a hazard assessment in accordance with the OSHA PPE Standard (29CFR1910.132) be conducted before using this product.

9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES**Appearance**

Form	paste
Colour	black
Odour	Sweet ether-like odor.

Safety data

Boiling point/range	> 143 °C
Flash point	42.22 °C
	Method: Setaflash Closed Cup
Relative density	1.1 (25 °C)
Solubility/qualitative	Solubility in water: Negligible.
Viscosity, dynamic(KU)	70 - 90 KU (25 °C)

10. STABILITY AND REACTIVITY

Conditions to avoid	Avoid high temperatures and sources of ignition.
Incompatible materials	oxidizing substances

11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

Acute / chronic effects	May cause eye, skin and respiratory tract irritation. Combustible liquid and vapor.
Inhalation	Possibly irritating. Excessive inhalation of solvent vapors may cause nasal and respiratory irritation and central nervous system effects including dizziness, weakness, fatigue, nausea, headache, possible unconsciousness and even death.

MSDS-AUS(P51100) / 14 11 2007 00 45

SAFETY DATA SHEET			
844-9955 CHROMA-CHEM® LAMP BLACK		LB	
Material no.		Version	1.1 / AU
Specification	139123	Revision date	2007/11/14
VA-Nr		Print Date	20.02.2008
		Page	5 / 8

Skin	A moderate skin irritant based on testing of similar CHROMA-CHEM® base mixtures. Prolonged or repeated contact may cause irritation. Prolonged skin contact with large amounts of ether acetates may cause drowsiness.
Eyes	Irritating. May cause tearing, reddening and/or swelling. May injure eye tissue if not removed promptly.
Ingestion	May cause gastrointestinal irritation, nausea, vomiting, and diarrhea.
Chronic exposure	High vapor concentrations (3000 ppm) of propylene glycol monomethyl ether acetate caused upper respiratory irritation and liver and kidney effects in subchronic animal testing. The relevance of these results to humans is not known. Health studies have shown that many petroleum hydrocarbons pose potential human health risks which may vary from person to person. As a precaution, exposure to liquids, vapors, mists or fumes should be minimized. Some studies have linked exposure of carbon black dust to lung effects. IARC classifies carbon black as a Category 2B Carcinogen (known animal carcinogen, possible human carcinogen) based on inhalation studies. However, the manufacturers of carbon black state that epidemiologic studies of workers in the carbon black industry in the U.S. and W. Europe show no significant adverse health effects due to occupational exposure. This product contains an ingredient that has been shown to produce mutagenic effects in in vivo testing. Because this product is a free-flowing liquid or paste, dust inhalation is not an expected route of exposure.

12. ECOLOGICAL INFORMATION

Elimination information (persistence and degradability)

Behaviour in environmental compartments

Ecotoxicity effects

Further information on ecology

Further Information No ecotoxicological studies are available.

13. DISPOSAL CONSIDERATIONS

Product

Waste must be disposed of in accordance with federal, state, provincial and local regulations.
CONTAINER DISPOSAL: Empty containers by removing the top and inverting to allow all free-flowing product to drain. To meet regulatory criteria, the container is considered empty when less than 3% remains in the container. Additional special handling is not typically required and the empty container can be discarded with other non-hazardous trash. Note: Local disposal regulations may be more stringent and require additional restrictions or precautions. Customers should check with their local disposal company, municipal or state authority. Recycle of plastic or metal containers may require clean rather than empty containers.
In this case the containers can be rinsed with mineral spirits until the containers are considered generally product free.

MSDS-AUS/PS1/100/14 11 2007 00 45

ภาพผนวกที่ ก2 (ต่อ)

SAFETY DATA SHEET**844-9955 CHROMA-CHEM® LAMP BLACK****LB**

Material no.		Version	1.1 / AU
Specification	139123	Revision date	2007/11/14
VA-Nr		Print Date	20.02.2008
		Page	6 / 8

14. TRANSPORT INFORMATION**Road transport ADGC**

Class	3
Labels	3
UN-No	1263
Packing group	III
Proper shipping name (Technical name)	
PAINT RELATED MATERIAL	

Railway transport ADGC/NZ5433

Class	3
Labels	3
UN-No	1263
Packing group	III
Proper shipping name (Technical name)	
PAINT RELATED MATERIAL	

Sea transport IMDG-Code

Class	3
UN-No	1263
Packing group	III
EmS	F-E, S-E
Proper technical name (Proper shipping name)	
PAINT RELATED MATERIAL	

Air transport ICAO-TI/IATA-DGR

Class	3
UN-No	1263
Packing group	III
Proper technical name (Proper shipping name)	
Paint related material	

Loading instructions/Remarks

IATA_C	ERG-Code 3L
IATA_P	ERG-Code 3L

Hazchem code

3[Y]

15. REGULATORY INFORMATION**Poison schedule**

Not Scheduled.

registration

Europe (EINECS/ELINCS) Listed/registered

MSDS-AUS(IP51:100) / 14.11.2007 00:45

SAFETY DATA SHEET**844-9955 CHROMA-CHEM® LAMP BLACK****LB**

Material no.		Version	1.1 / AU
Specification	139123	Revision date	2007/11/14
VA-Nr		Print Date	20.02.2008
		Page	7 / 8

USA (TSCA)	Listed/registered
Canada (DSL)	Listed/registered
Australia (AICS)	Listed/registered
Japan (MITI)	Not listed/Not registered
Korea (TCCL)	Listed/registered
Philippines (PICCS)	Not listed/Not registered
China	Listed/registered
New Zealand	Listed/registered

16. OTHER INFORMATION**Risk phrase (R phrase) texts**

- **2-Methoxy-1-methylethyl acetate**

R10	Flammable.
R36	Irritating to eyes.

- **Naphtha (petroleum), hydrotreated heavy**

R65	Harmful: may cause lung damage if swallowed.
R66	Repeated exposure may cause skin dryness or cracking.

- **Ethoxylated alkyl ether phosphate**

R38	Irritating to skin.
R41	Risk of serious damage to eyes.

Further information

Changes since the last version are highlighted in the margin. This version replaces all previous versions.

The information provided in this Safety Data Sheet is correct to the best of our knowledge, information and belief at the date of its publication. The information given is designed only as a guidance for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be considered a warranty or quality specification. The information relates only to the specific material designated and may not be valid for such material used in combination with any other materials or in any process, unless specified in the text.

Material Safety Data Sheet

Toluene MSDS

Section 1: Chemical Product and Company Identification	
Product Name: Toluene Catalog Codes: SLT2857, SLT3277 CAS#: 108-88-3 RTECS: XS5250000 TSCA: TSCA 8(b) inventory: Toluene CI#: Not available. Synonym: Toluol, Tolu-Sol; Methylbenzene; Methacide; Phenylmethane; Methylbenzol Chemical Name: Toluene Chemical Formula: C ₆ -H ₅ -CH ₃ or C ₇ -H ₈	Contact Information: Sciencelab.com, Inc. 14025 Smith Rd. Houston, Texas 77396 US Sales: 1-800-901-7247 International Sales: 1-281-441-4400 Order Online: ScienceLab.com CHEMTREC (24HR Emergency Telephone), call: 1-800-424-9300 International CHEMTREC, call: 1-703-527-3887 For non-emergency assistance, call: 1-281-441-4400

Section 2: Composition and Information on Ingredients		
Composition:		
Name	CAS #	% by Weight
Toluene	108-88-3	100
Toxicological Data on Ingredients: Toluene: ORAL (LD50): Acute: 636 mg/kg [Rat]. DERMAL (LD50): Acute: 14100 mg/kg [Rabbit]. VAPOR (LC50): Acute: 49000 mg/m 4 hours [Rat]. 440 ppm 24 hours [Mouse].		

Section 3: Hazards Identification
Potential Acute Health Effects: Hazardous in case of skin contact (irritant), of eye contact (irritant), of ingestion, of inhalation. Slightly hazardous in case of skin contact (permeator).
Potential Chronic Health Effects: CARCINOGENIC EFFECTS: A4 (Not classifiable for human or animal.) by ACGIH, 3 (Not classifiable for human.) by IARC. MUTAGENIC EFFECTS: Not available. TERATOGENIC EFFECTS: Not available. DEVELOPMENTAL TOXICITY: Not available. The substance may be toxic to blood, kidneys, the nervous system, liver, brain, central nervous system (CNS). Repeated or prolonged exposure to the substance can produce target organs damage.

ภาพผนวกที่ ก3 เอกสารข้อมูลความปลอดภัยของโทลูอิน

Section 4: First Aid Measures

Eye Contact:

Check for and remove any contact lenses. In case of contact, immediately flush eyes with plenty of water for at least 15 minutes. Get medical attention.

Skin Contact:

In case of contact, immediately flush skin with plenty of water. Cover the irritated skin with an emollient. Remove contaminated clothing and shoes. Wash clothing before reuse. Thoroughly clean shoes before reuse. Get medical attention.

Serious Skin Contact:

Wash with a disinfectant soap and cover the contaminated skin with an anti-bacterial cream. Seek immediate medical attention.

Inhalation:

If inhaled, remove to fresh air. If not breathing, give artificial respiration. If breathing is difficult, give oxygen. Get medical attention.

Serious Inhalation:

Evacuate the victim to a safe area as soon as possible. Loosen tight clothing such as a collar, tie, belt or waistband. If breathing is difficult, administer oxygen. If the victim is not breathing, perform mouth-to-mouth resuscitation. WARNING: It may be hazardous to the person providing aid to give mouth-to-mouth resuscitation when the inhaled material is toxic, infectious or corrosive. Seek medical attention.

Ingestion:

Do NOT induce vomiting unless directed to do so by medical personnel. Never give anything by mouth to an unconscious person. If large quantities of this material are swallowed, call a physician immediately. Loosen tight clothing such as a collar, tie, belt or waistband.

Serious Ingestion: Not available.

Section 5: Fire and Explosion Data

Flammability of the Product: Flammable.

Auto-Ignition Temperature: 480°C (896°F)

Flash Points: CLOSED CUP: 4.4444°C (40°F). (Setaflash) OPEN CUP: 16°C (60.8°F).

Flammable Limits: LOWER: 1.1% UPPER: 7.1%

Products of Combustion: These products are carbon oxides (CO, CO2).

Fire Hazards in Presence of Various Substances:

Flammable in presence of open flames and sparks, of heat.
Non-flammable in presence of shocks.

Explosion Hazards in Presence of Various Substances:

Risks of explosion of the product in presence of mechanical impact: Not available.
Risks of explosion of the product in presence of static discharge: Not available.

Fire Fighting Media and Instructions:

Flammable liquid, insoluble in water.
SMALL FIRE: Use DRY chemical powder.
LARGE FIRE: Use water spray or fog.

Special Remarks on Fire Hazards: Not available.

Special Remarks on Explosion Hazards:

Toluene forms explosive reaction with 1,3-dichloro-5,5-dimethyl-2,4-imidazolididione; dinitrogen tetraoxide;

ภาพผนวกที่ ก3 (ต่อ)

concentrated nitric acid, sulfuric acid + nitric acid; N₂O₄; AgClO₄; BrF₃; Uranium hexafluoride; sulfur dichloride.
Also forms an explosive mixture with tetranitromethane.

Section 6: Accidental Release Measures

Small Spill: Absorb with an inert material and put the spilled material in an appropriate waste disposal.

Large Spill:

Toxic flammable liquid, insoluble or very slightly soluble in water.
Keep away from heat. Keep away from sources of ignition. Stop leak if without risk. Absorb with DRY earth, sand or other non-combustible material. Do not get water inside container. Do not touch spilled material. Prevent entry into sewers, basements or confined areas; dike if needed. Call for assistance on disposal. Be careful that the product is not present at a concentration level above TLV. Check TLV on the MSDS and with local authorities.

Section 7: Handling and Storage

Precautions:

Keep away from heat. Keep away from sources of ignition. Ground all equipment containing material. Do not ingest. Do not breathe gas/fumes/ vapor/spray. Wear suitable protective clothing. In case of insufficient ventilation, wear suitable respiratory equipment. If ingested, seek medical advice immediately and show the container or the label. Avoid contact with skin and eyes. Keep away from incompatibles such as oxidizing agents.

Storage:

Store in a segregated and approved area. Keep container in a cool, well-ventilated area. Keep container tightly closed and sealed until ready for use. Avoid all possible sources of ignition (spark or flame).

Section 8: Exposure Controls/Personal Protection

Engineering Controls:

Provide exhaust ventilation or other engineering controls to keep the airborne concentrations of vapors below their respective threshold limit value. Ensure that eyewash stations and safety showers are proximal to the work-station location.

Personal Protection:

Splash goggles. Lab coat. Vapor respirator. Be sure to use an approved/certified respirator or equivalent.
Gloves.

Personal Protection in Case of a Large Spill:

Splash goggles. Full suit. Vapor respirator. Boots. Gloves. A self contained breathing apparatus should be used to avoid inhalation of the product. Suggested protective clothing might not be sufficient; consult a specialist BEFORE handling this product.

Exposure Limits:

TWA: 200 STEL: 500 CEIL: 300 (ppm) from OSHA (PEL) [United States]
TWA: 50 (ppm) from ACGIH (TLV) [United States] SKIN
TWA: 100 STEL: 150 from NIOSH [United States]
TWA: 375 STEL: 560 (mg/m³) from NIOSH [United States]
Consult local authorities for acceptable exposure limits.

Section 9: Physical and Chemical Properties

Physical state and appearance: Liquid.

Odor: Sweet, pungent, Benzene-like.

Taste: Not available.

<p>Molecular Weight: 92.14 g/mole</p> <p>Color: Colorless.</p> <p>pH (1% soln/water): Not applicable.</p> <p>Boiling Point: 110.6°C (231.1°F)</p> <p>Melting Point: -95°C (-139°F)</p> <p>Critical Temperature: 318.6°C (605.5°F)</p> <p>Specific Gravity: 0.8636 (Water = 1)</p> <p>Vapor Pressure: 3.8 kPa (@ 25°C)</p> <p>Vapor Density: 3.1 (Air = 1)</p> <p>Volatility: Not available.</p> <p>Odor Threshold: 1.6 ppm</p> <p>Water/Oil Dist. Coeff.: The product is more soluble in oil; log(oil/water) = 2.7</p> <p>Ionicity (in Water): Not available.</p> <p>Dispersion Properties: See solubility in water, diethyl ether, acetone.</p> <p>Solubility: Soluble in diethyl ether, acetone. Practically insoluble in cold water. Soluble in ethanol, benzene, chloroform, glacial acetic acid, carbon disulfide. Solubility in water: 0.561 g/l @ 25 deg. C.</p>
--

Section 10: Stability and Reactivity Data

<p>Stability: The product is stable.</p> <p>Instability Temperature: Not available.</p> <p>Conditions of Instability: Heat, ignition sources (flames, sparks, static), incompatible materials</p> <p>Incompatibility with various substances: Reactive with oxidizing agents.</p> <p>Corrosivity: Non-corrosive in presence of glass.</p> <p>Special Remarks on Reactivity: Incompatible with strong oxidizers, silver perchlorate, sodium difluoride, Tetranitromethane, Uranium Hexafluoride. Frozen Bromine Trifluoride reacts violently with Toluene at -80 deg. C. Reacts chemically with nitrogen oxides, or halogens to form nitrotoluene, nitrobenzene, and nitrophenol and halogenated products, respectively.</p> <p>Special Remarks on Corrosivity: Not available.</p> <p>Polymerization: Will not occur.</p>
--

Section 11: Toxicological Information

<p>Routes of Entry: Absorbed through skin. Dermal contact. Eye contact. Inhalation. Ingestion.</p>

ภาพผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Toxicity to Animals:

WARNING: THE LC50 VALUES HEREUNDER ARE ESTIMATED ON THE BASIS OF A 4-HOUR EXPOSURE.

Acute oral toxicity (LD50): 636 mg/kg [Rat].

Acute dermal toxicity (LD50): 14100 mg/kg [Rabbit].

Acute toxicity of the vapor (LC50): 440 24 hours [Mouse].

Chronic Effects on Humans:

CARCINOGENIC EFFECTS: A4 (Not classifiable for human or animal.) by ACGIH, 3 (Not classifiable for human.) by IARC.

May cause damage to the following organs: blood, kidneys, the nervous system, liver, brain, central nervous system (CNS).

Other Toxic Effects on Humans:

Hazardous in case of skin contact (irritant), of ingestion, of inhalation.

Slightly hazardous in case of skin contact (permeator).

Special Remarks on Toxicity to Animals:

Lowest Published Lethal Dose:

LDL [Human] - Route: Oral; Dose: 50 mg/kg

LCL [Rabbit] - Route: Inhalation; Dose: 55000 ppm/40min

Special Remarks on Chronic Effects on Humans:

Detected in maternal milk in human. Passes through the placental barrier in human. Embryotoxic and/or foetotoxic in animal. May cause adverse reproductive effects and birth defects (teratogenic). May affect genetic material (mutagenic)

Special Remarks on other Toxic Effects on Humans:

Acute Potential Health Effects:

Skin: Causes mild to moderate skin irritation. It can be absorbed to some extent through the skin.

Eyes: Causes mild to moderate eye irritation with a burning sensation. Splash contact with eyes also causes conjunctivitis, blepharospasm, corneal edema, corneal abrasions. This usually resolves in 2 days.

Inhalation: Inhalation of vapor may cause respiratory tract irritation causing coughing and wheezing, and nasal discharge. Inhalation of high concentrations may affect behavior and cause central nervous system effects characterized by nausea, headache, dizziness, tremors, restlessness, lightheadedness, exhilaration, memory loss, insomnia, impaired reaction time, drowsiness, ataxia, hallucinations, somnolence, muscle contraction or spasticity, unconsciousness and coma. Inhalation of high concentration of vapor may also affect the cardiovascular system (rapid heart beat, heart palpitations, increased or decreased blood pressure, dysrhythmia,), respiration (acute pulmonary edema, respiratory depression, apnea, asphyxia), cause vision disturbances and dilated pupils, and cause loss of appetite.

Ingestion: Aspiration hazard. Aspiration of Toluene into the lungs may cause chemical pneumonitis. May cause irritation of the digestive tract with nausea, vomiting, pain. May have effects similar to that of acute inhalation.

Chronic Potential Health Effects:

Inhalation and Ingestion: Prolonged or repeated exposure via inhalation may cause central nervous system and cardiovascular symptoms similar to that of acute inhalation and ingestion as well liver damage/failure, kidney damage/failure (with hematuria, proteinuria, oliguria, renal tubular acidosis), brain damage, weight loss, blood (pigmented or nucleated red blood cells, changes in white blood cell count), bone marrow changes, electrolyte imbalances (Hypokalemia, Hypophostatemia), severe, muscle weakness and Rhabdomyolysis.

Skin: Repeated or prolonged skin contact may cause defatting dermatitis.

Section 12: Ecological Information

Ecotoxicity:

Ecotoxicity in water (LC50): 313 mg/l 48 hours [Daphnia (daphnia)]. 17 mg/l 24 hours [Fish (Blue Gill)]. 13 mg/l 96 hours [Fish (Blue Gill)]. 56 mg/l 24 hours [Fish (Fathead minnow)]. 34 mg/l 96 hours [Fish (Fathead minnow)]. 56.8 ppm any hours [Fish (Goldfish)].

BOD5 and COD: Not available.

Products of Biodegradation:

Possibly hazardous short term degradation products are not likely. However, long term degradation products may

ภาพผนวกที่ ก3 (ต่อ)

arise.

Toxicity of the Products of Biodegradation: The products of degradation are less toxic than the product itself.

Special Remarks on the Products of Biodegradation: Not available.

Section 13: Disposal Considerations

Waste Disposal:

Waste must be disposed of in accordance with federal, state and local environmental control regulations.

Section 14: Transport Information

DOT Classification: CLASS 3: Flammable liquid.

Identification: : Toluene UNNA: 1294 PG: II

Special Provisions for Transport: Not available.

Section 15: Other Regulatory Information

Federal and State Regulations:

California prop. 65: This product contains the following ingredients for which the State of California has found to cause cancer, birth defects or other reproductive harm, which would require a warning under the statute: Toluene

California prop. 65 (no significant risk level): Toluene: 7 mg/day (value)

California prop. 65 (acceptable daily intake level): Toluene: 7 mg/day (value)

California prop. 65: This product contains the following ingredients for which the State of California has found to cause birth defects which would require a warning under the statute: Toluene

Connecticut hazardous material survey.: Toluene

Illinois toxic substances disclosure to employee act: Toluene

Illinois chemical safety act: Toluene

New York release reporting list: Toluene

Rhode Island RTK hazardous substances: Toluene

Pennsylvania RTK: Toluene

Florida: Toluene

Minnesota: Toluene

Michigan critical material: Toluene

Massachusetts RTK: Toluene

Massachusetts spill list: Toluene

New Jersey: Toluene

New Jersey spill list: Toluene

Louisiana spill reporting: Toluene

California Director's List of Hazardous Substances.: Toluene

TSCA 8(b) inventory: Toluene

TSCA 8(d) H and S data reporting: Toluene: Effective date: 10/04/82; Sunset Date: 10/0/92

SARA 313 toxic chemical notification and release reporting: Toluene

CERCLA: Hazardous substances.: Toluene: 1000 lbs. (453.6 kg)

Other Regulations:

OSHA: Hazardous by definition of Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200).

EINECS: This product is on the European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances.

Other Classifications:

WHMIS (Canada):

CLASS B-2: Flammable liquid with a flash point lower than 37.8°C (100°F).

CLASS D-2A: Material causing other toxic effects (VERY TOXIC).

ภาพผนวกที่ 3 (ต่อ)

DSCL (EEC):
 R11- Highly flammable.
 R20- Harmful by inhalation.
 S16- Keep away from sources of ignition - No smoking.
 S25- Avoid contact with eyes.
 S29- Do not empty into drains.
 S33- Take precautionary measures against static discharges.

HMIS (U.S.A.):

Health Hazard: 2

Fire Hazard: 3

Reactivity: 0

Personal Protection: h

National Fire Protection Association (U.S.A.):

Health: 2

Flammability: 3

Reactivity: 0

Specific hazard:

Protective Equipment:

Gloves.

Lab coat.

Vapor respirator. Be sure to use an approved/certified respirator or equivalent. Wear appropriate respirator when ventilation is inadequate.

Splash goggles.

Section 16: Other Information

References: Not available.

Other Special Considerations: Not available.

Created: 10/10/2005 08:30 PM

Last Updated: 11/06/2008 12:00 PM

The information above is believed to be accurate and represents the best information currently available to us. However, we make no warranty of merchantability or any other warranty, express or implied, with respect to such information, and we assume no liability resulting from its use. Users should make their own investigations to determine the suitability of the information for their particular purposes. In no event shall ScienceLab.com be liable for any claims, losses, or damages of any third party or for lost profits or any special, indirect, incidental, consequential or exemplary damages, howsoever arising, even if ScienceLab.com has been advised of the possibility of such damages.

ภาพผนวกที่ ก3 (ต่อ)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนาน

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานของน้ำ ที่อุณหภูมิ
25 องศาเซลเซียส

Data Series Information

Name: water-2 3
 Sample: text1
 Operator: NoLogin
 Remarks: text2
 Number of Intervals: 1
 Application: RHEOPLUS/32 Multi9 V3.40 21000068-36653
 Device: MCR301 SN839167; FW3.40D090210; Slot5; Adj88d
 Measuring Date/Time: 23/06/2009; 02:14 PM
 Measuring System: DG26.7-SN1195; d=1 mm
 Accessories: TU1=C-PTD200+H-PTD200-SN841696-916400

Calculating Constants:

- Csr [min/s]: 3.1151751
 - Css [Pa/mNm]: 10.94184
 - Start Delay Time [s]: 4.437
 - Substance Density [rho]: 1,000
 - Measurement Type: 2
 - Motor Correction Factor: 1

Interval: 1
 Number of Data Points: 30

Time Setting: 30 Meas. Pts.
 Meas. Pt. Duration 30 ... 10 s log

Measuring Profile:
 Shear Rate d(gamma)/dt = 10 ... 1,000 1/s log

Meas. Pts.	Time [s]	Viscosity [Pa.s]	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Torque [Nm]	Status []
1	30	0.000843	10	0.00843	0.000771	Dy_auto
2	58.9	0.000874	11.7	0.0102	0.000937	Dy_auto
3	86.7	0.000873	13.7	0.012	0.0011	Dy_auto
4	113	0.000775	16.1	0.0125	0.00114	Dy_auto
5	139	0.00077	18.9	0.0145	0.00133	Dy_auto
6	164	0.000781	22.1	0.0173	0.00158	Dy_auto
7	188	0.000767	25.9	0.0199	0.00182	Dy_auto
8	211	0.000759	30.4	0.0231	0.00211	Dy_auto
9	233	0.000855	35.6	0.0304	0.00278	Dy_auto
10	254	0.000858	41.8	0.0358	0.00328	Dy_auto
11	275	0.000859	48.9	0.042	0.00384	Dy_auto
12	295	0.000862	57.4	0.0494	0.00452	Dy_auto
13	314	0.000863	67.2	0.058	0.0053	Dy_auto
14	332	0.000867	78.8	0.0683	0.00624	Dy_auto
15	350	0.00087	92.4	0.0804	0.00734	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Meas. Pts.	Time [s]	Viscosity [Pa.s]	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Torque [Nm]	Status []
16	367	0.000872	108	0.0945	0.00863	Dy_auto
17	383	0.000876	127	0.111	0.0102	Dy_auto
18	399	0.000879	149	0.131	0.012	Dy_auto
19	414	0.000884	174	0.154	0.0141	Dy_auto
20	429	0.000887	204	0.181	0.0166	Dy_auto
21	443	0.000892	240	0.214	0.0195	Dy_auto
22	456	0.000896	281	0.251	0.023	Dy_auto
23	469	0.000902	329	0.297	0.0271	Dy_auto
24	482	0.0009	386	0.347	0.0317	Dy_auto
25	494	0.000906	452	0.41	0.0374	Dy_auto
26	506	0.000912	530	0.483	0.0442	Dy_auto
27	517	0.000917	621	0.57	0.0521	Dy_auto
28	528	0.000925	728	0.674	0.0616	Dy_auto
29	538	0.000932	853	0.795	0.0727	Dy_auto
30	548	0.000975	1,000	0.975	0.0891	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก2 ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสาร
แขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0 % โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Data Series Information

Name: 0%-1mm-25c-3 1
 Number of Intervals: 1
 Application: RHEOPLUS/32 Multi9 V3.40 21000068-36653
 MCR301 SN839167; FW3.40D090210; Slot8;
 Device: Adj454d
 Measuring Date/Time: 22/06/2009; 09:41 AM
 Measuring System: PP50-SN7349; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200/TG+H-PTD200-SN826884-916400

Interval: 1
 Number of Data Points: 51

Time Setting: 51 Meas. Pts.
 Meas. Pt. Duration 5 s

Measuring Profile:
 Shear Rate $d(\gamma)/dt = 0.01 \dots 2,000 \text{ 1/s log}$

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
1	0.00997	0.109	10.9	0.00381	2.67	Dy_auto
2	0.0127	0.12	9.42	0.00487	2.93	Dy_auto
3	0.0163	0.129	7.9	0.00623	3.15	Dy_auto
4	0.0207	0.144	6.93	0.00792	3.51	Dy_auto
5	0.0266	0.165	6.22	0.0102	4.04	Dy_auto
6	0.0339	0.19	5.61	0.013	4.65	Dy_auto
7	0.0433	0.23	5.31	0.0166	5.62	Dy_auto
8	0.0552	0.275	4.99	0.0211	6.74	Dy_auto
9	0.0705	0.335	4.75	0.027	8.2	Dy_auto
10	0.09	0.408	4.54	0.0344	9.99	Dy_auto
11	0.115	0.504	4.38	0.044	12.3	Dy_auto
12	0.147	0.646	4.4	0.0561	15.8	Dy_auto
13	0.187	0.818	4.37	0.0715	20	Dy_auto
14	0.239	1.04	4.35	0.0913	25.4	Dy_auto
15	0.305	1.28	4.18	0.117	31.2	Dy_auto
16	0.39	1.62	4.17	0.149	39.7	Dy_auto
17	0.498	2.08	4.18	0.19	50.8	Dy_auto
18	0.636	2.56	4.03	0.243	62.6	Dy_auto
19	0.81	3.34	4.12	0.31	81.7	Dy_auto
20	1.03	4.24	4.1	0.395	104	Dy_auto
21	1.32	5.42	4.11	0.504	133	Dy_auto
22	1.68	6.78	4.03	0.644	166	Dy_auto
23	2.15	8.74	4.07	0.822	214	Dy_auto
24	2.74	11.3	4.1	1.05	275	Dy_auto
25	3.5	14	4	1.34	342	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
26	4.47	17.8	3.98	1.71	436	Dy_auto
27	5.71	22.8	3.99	2.18	557	Dy_auto
28	7.29	28.2	3.87	2.79	689	Dy_auto
29	9.3	34.8	3.74	3.56	850	Dy_auto
30	11.9	42.9	3.62	4.54	1,050	Dy_auto
31	15.2	52.7	3.48	5.8	1,290	Dy_auto
32	19.3	64.4	3.33	7.4	1,570	Dy_auto
33	24.7	79.3	3.21	9.44	1,940	Dy_auto
34	31.5	98.4	3.12	12.1	2,410	Dy_auto
35	40.2	123	3.06	15.4	3,010	Dy_auto
36	51.4	156	3.03	19.6	3,800	Dy_auto
37	65.6	197	3.01	25.1	4,820	Dy_auto
38	83.7	250	2.98	32	6,110	Dy_auto
39	107	317	2.97	40.9	7,750	Dy_auto
40	136	403	2.95	52.2	9,850	Dy_auto
41	174	509	2.93	66.6	12,500	Dy_auto
42	222	643	2.89	85	15,700	Dy_auto
43	284	810	2.85	108	19,800	Dy_auto
44	362	1,020	2.82	138	24,900	Dy_auto
45	462	1,280	2.77	177	31,300	Dy_auto
46	590	1,600	2.71	226	39,100	Dy_auto
47	753	1,970	2.61	288	48,200	Dy_auto
48	962	2,380	2.48	368	58,200	Dy_auto
49	1,230	2,820	2.29	469	68,900	Dy_auto
50	1,570	3,260	2.08	599	79,600	Dy_auto
51	2,000	3,670	1.84	765	89,800	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก3 ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสาร
แขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Data Series Information

Name: 0%-1mm-50c-2 1
 Number of Intervals: 1
 Application: RHEOPLUS/32 Multi9 V3.40 21000068-36653
 MCR301 SN839167; FW3.40D090210; Slot8;
 Device: Adj455d
 Measuring Date/Time: 23/06/2009; 10:09 AM
 Measuring System: PP50-SN7349; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200/TG+H-PTD200-SN826884-916400

Interval: 1
 Number of Data Points: 51

Time Setting: 51 Meas. Pts.
 Meas. Pt. Duration 5 s

Measuring Profile:
 Shear Rate $d(\gamma)/dt = 0.01 \dots 2,000 \text{ 1/s log}$

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
1	0.01	0.07	7	0.00382	1.71	Dy_auto
2	0.0128	0.0728	5.7	0.00488	1.78	Dy_auto
3	0.0163	0.0748	4.59	0.00623	1.83	Dy_auto
4	0.0208	0.0793	3.82	0.00795	1.94	Dy_auto
5	0.0266	0.0823	3.1	0.0102	2.01	Dy_auto
6	0.0339	0.0879	2.59	0.013	2.15	Dy_auto
7	0.0433	0.0944	2.18	0.0166	2.31	Dy_auto
8	0.0553	0.103	1.86	0.0211	2.52	Dy_auto
9	0.0706	0.115	1.63	0.027	2.81	Dy_auto
10	0.0899	0.129	1.43	0.0344	3.15	Dy_auto
11	0.115	0.145	1.26	0.044	3.54	Dy_auto
12	0.147	0.17	1.16	0.0562	4.16	Dy_auto
13	0.187	0.201	1.07	0.0716	4.91	Dy_auto
14	0.239	0.236	0.988	0.0915	5.78	Dy_auto
15	0.305	0.28	0.919	0.116	6.85	Dy_auto
16	0.39	0.326	0.836	0.149	7.98	Dy_auto
17	0.497	0.39	0.786	0.19	9.55	Dy_auto
18	0.635	0.462	0.727	0.243	11.3	Dy_auto
19	0.809	0.577	0.713	0.309	14.1	Dy_auto
20	1.03	0.717	0.694	0.395	17.5	Dy_auto
21	1.32	0.896	0.68	0.504	21.9	Dy_auto
22	1.68	1.1	0.654	0.644	27	Dy_auto
23	2.15	1.38	0.641	0.822	33.7	Dy_auto
24	2.74	1.74	0.636	1.05	42.7	Dy_auto
25	3.5	2.21	0.631	1.34	54.1	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
26	4.47	2.85	0.638	1.71	69.8	Dy_auto
27	5.71	3.71	0.65	2.18	90.7	Dy_auto
28	7.29	4.83	0.663	2.79	118	Dy_auto
29	9.3	6.09	0.654	3.56	149	Dy_auto
30	11.9	7.76	0.653	4.54	190	Dy_auto
31	15.2	10.1	0.664	5.8	246	Dy_auto
32	19.3	12.8	0.661	7.4	313	Dy_auto
33	24.7	16.5	0.667	9.44	403	Dy_auto
34	31.5	21.3	0.675	12.1	520	Dy_auto
35	40.2	27.3	0.679	15.4	668	Dy_auto
36	51.4	35.1	0.683	19.6	858	Dy_auto
37	65.6	44.8	0.684	25.1	1,100	Dy_auto
38	83.7	57.1	0.683	32	1,400	Dy_auto
39	107	72.6	0.679	40.9	1,780	Dy_auto
40	136	91.9	0.674	52.2	2,250	Dy_auto
41	174	116	0.666	66.6	2,840	Dy_auto
42	222	146	0.658	85	3,580	Dy_auto
43	284	185	0.65	108	4,510	Dy_auto
44	362	230	0.635	138	5,630	Dy_auto
45	462	284	0.615	177	6,960	Dy_auto
46	590	354	0.599	226	8,650	Dy_auto
47	753	447	0.594	288	10,900	Dy_auto
48	962	565	0.588	368	13,800	Dy_auto
49	1,230	706	0.575	469	17,300	Dy_auto
50	1,570	875	0.559	599	21,400	Dy_auto
51	2,000	1,080	0.542	765	26,500	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก4 ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสาร
แขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 0% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

Data Series Information

Name: 0%-1mm-75c-1 1
 Number of Intervals: 1
 Application: RHEOPLUS/32 Multi9 V3.40 21000068-36653
 Device: MCR301 SN839167; FW3.40D090210; Slot8; Adj455d
 Measuring Date/Time: 22/06/2009; 03:39 PM
 Measuring System: PP50-SN7349; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200/TG+H-PTD200-SN826884-916400

Interval: 1
 Number of Data Points: 51

Time Setting: 51 Meas. Pts.
 Meas. Pt. Duration 5 s

Measuring Profile:
 Shear Rate d(gamma)/dt = 0.01 ... 2,000 1/s log

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
1	0.00999	0.0689	6.9	0.00382	1.69	Dy_auto
2	0.0128	0.0699	5.47	0.00488	1.71	Dy_auto
3	0.0163	0.0706	4.33	0.00623	1.73	Dy_auto
4	0.0208	0.0739	3.56	0.00794	1.81	Dy_auto
5	0.0266	0.074	2.78	0.0102	1.81	Dy_auto
6	0.0339	0.0769	2.27	0.013	1.88	Dy_auto
7	0.0433	0.0797	1.84	0.0165	1.95	Dy_auto
8	0.0553	0.0841	1.52	0.0211	2.06	Dy_auto
9	0.0706	0.09	1.27	0.027	2.2	Dy_auto
10	0.09	0.0974	1.08	0.0344	2.38	Dy_auto
11	0.115	0.105	0.913	0.044	2.57	Dy_auto
12	0.147	0.118	0.801	0.0562	2.88	Dy_auto
13	0.187	0.134	0.715	0.0716	3.28	Dy_auto
14	0.239	0.151	0.633	0.0915	3.7	Dy_auto
15	0.305	0.173	0.568	0.116	4.23	Dy_auto
16	0.39	0.189	0.484	0.149	4.62	Dy_auto
17	0.496	0.219	0.441	0.19	5.35	Dy_auto
18	0.635	0.244	0.384	0.243	5.96	Dy_auto
19	0.809	0.298	0.369	0.309	7.29	Dy_auto
20	1.03	0.358	0.347	0.395	8.77	Dy_auto
21	1.32	0.447	0.339	0.504	10.9	Dy_auto
22	1.68	0.532	0.316	0.644	13	Dy_auto
23	2.15	0.646	0.3	0.822	15.8	Dy_auto
24	2.74	0.81	0.295	1.05	19.8	Dy_auto
25	3.5	0.998	0.285	1.34	24.4	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
26	4.47	1.29	0.288	1.71	31.5	Dy_auto
27	5.71	1.7	0.298	2.18	41.7	Dy_auto
28	7.29	2.26	0.31	2.79	55.3	Dy_auto
29	9.3	2.77	0.298	3.56	67.9	Dy_auto
30	11.9	3.5	0.295	4.54	85.6	Dy_auto
31	15.2	4.58	0.302	5.8	112	Dy_auto
32	19.3	5.74	0.297	7.4	140	Dy_auto
33	24.7	7.32	0.296	9.44	179	Dy_auto
34	31.5	9.36	0.297	12.1	229	Dy_auto
35	40.2	11.9	0.297	15.4	292	Dy_auto
36	51.4	15.3	0.297	19.6	373	Dy_auto
37	65.6	19.4	0.296	25.1	474	Dy_auto
38	83.7	24.7	0.295	32	604	Dy_auto
39	107	31.3	0.293	40.9	766	Dy_auto
40	136	39.8	0.292	52.2	974	Dy_auto
41	174	50.8	0.292	66.6	1,240	Dy_auto
42	222	65.1	0.293	85	1,590	Dy_auto
43	284	77.7	0.274	108	1,900	Dy_auto
44	362	92.1	0.254	138	2,250	Dy_auto
45	462	112	0.243	177	2,740	Dy_auto
46	590	136	0.23	226	3,320	Dy_auto
47	753	162	0.215	288	3,960	Dy_auto
48	962	195	0.203	368	4,780	Dy_auto
49	1,230	244	0.199	469	5,970	Dy_auto
50	1,570	318	0.203	599	7,780	Dy_auto
51	2,000	413	0.206	765	10,100	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก5 ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสาร
แขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Data Series Information

Name: 2.5%-1mm-25c-4 1
 Number of Intervals: 1
 Application: RHEOPLUS/32 Multi9 V3.40 21000068-36653
 Device: MCR301 SN839167; FW3.40D090210; Slot8; Adj454d
 Measuring Date/Time: 22/06/2009; 12:29 PM
 Measuring System: PP50-SN7349; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200/TG+H-PTD200-SN826884-916400

Interval: 1
 Number of Data Points: 51

Time Setting: 51 Meas. Pts.
 Meas. Pt. Duration 5 s

Measuring Profile:
 Shear Rate $d(\gamma)/dt = 0.01 \dots 2,000 \text{ 1/s log}$

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
1	0.00998	0.0901	9.03	0.00382	2.2	Dy_auto
2	0.0127	0.0983	7.72	0.00487	2.4	Dy_auto
3	0.0163	0.104	6.38	0.00623	2.55	Dy_auto
4	0.0207	0.115	5.52	0.00793	2.8	Dy_auto
5	0.0266	0.128	4.8	0.0102	3.12	Dy_auto
6	0.0339	0.144	4.24	0.013	3.52	Dy_auto
7	0.0433	0.167	3.86	0.0166	4.09	Dy_auto
8	0.0552	0.193	3.5	0.0211	4.73	Dy_auto
9	0.0706	0.23	3.27	0.027	5.64	Dy_auto
10	0.09	0.273	3.04	0.0344	6.68	Dy_auto
11	0.115	0.327	2.84	0.044	7.99	Dy_auto
12	0.147	0.403	2.75	0.0561	9.86	Dy_auto
13	0.187	0.497	2.66	0.0715	12.1	Dy_auto
14	0.239	0.614	2.57	0.0913	15	Dy_auto
15	0.305	0.753	2.47	0.117	18.4	Dy_auto
16	0.39	0.932	2.39	0.149	22.8	Dy_auto
17	0.497	1.15	2.32	0.19	28.2	Dy_auto
18	0.636	1.43	2.25	0.243	35	Dy_auto
19	0.81	1.81	2.24	0.31	44.4	Dy_auto
20	1.03	2.31	2.23	0.395	56.4	Dy_auto
21	1.32	2.92	2.21	0.504	71.4	Dy_auto
22	1.68	3.69	2.19	0.644	90.2	Dy_auto
23	2.15	4.67	2.17	0.822	114	Dy_auto
24	2.74	5.93	2.16	1.05	145	Dy_auto
25	3.5	7.54	2.15	1.34	184	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ๓ (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
26	4.47	9.63	2.15	1.71	236	Dy_auto
27	5.71	12.3	2.16	2.18	301	Dy_auto
28	7.29	15.8	2.17	2.79	387	Dy_auto
29	9.3	20.1	2.16	3.56	491	Dy_auto
30	11.9	25.5	2.15	4.54	625	Dy_auto
31	15.2	32.8	2.16	5.8	802	Dy_auto
32	19.3	41.8	2.16	7.4	1,020	Dy_auto
33	24.7	53.4	2.16	9.44	1,310	Dy_auto
34	31.5	68.6	2.18	12.1	1,680	Dy_auto
35	40.2	88.7	2.2	15.4	2,170	Dy_auto
36	51.4	115	2.24	19.6	2,810	Dy_auto
37	65.6	146	2.22	25.1	3,560	Dy_auto
38	83.7	183	2.18	32	4,470	Dy_auto
39	107	230	2.15	40.9	5,620	Dy_auto
40	136	288	2.11	52.2	7,030	Dy_auto
41	174	364	2.09	66.6	8,900	Dy_auto
42	222	457	2.06	85	11,200	Dy_auto
43	284	574	2.02	108	14,000	Dy_auto
44	362	748	2.06	138	18,300	Dy_auto
45	462	947	2.05	177	23,200	Dy_auto
46	590	1,180	1.99	226	28,800	Dy_auto
47	753	1,460	1.94	288	35,700	Dy_auto
48	962	1,780	1.86	368	43,600	Dy_auto
49	1,230	2,150	1.75	469	52,600	Dy_auto
50	1,570	2,560	1.63	599	62,500	Dy_auto
51	2,000	2,980	1.49	765	72,900	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก6 ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสาร
แขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Data Series Information

Name: 2.5%-1mm-50c-2 1
 Number of Intervals: 1
 Application: RHEOPLUS/32 Multi9 V3.40 21000068-36653
 MCR301 SN839167; FW3.40D090210; Slot8;
 Device: Adj455d
 Measuring Date/Time: 22/06/2009; 02:55 PM
 Measuring System: PP50-SN7349; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200/TG+H-PTD200-SN826884-916400

Interval: 1
 Number of Data Points: 51

Time Setting: 51 Meas. Pts.
 Meas. Pt. Duration 5 s

Measuring Profile:
 Shear Rate $d(\gamma)/dt = 0.01 \dots 2,000 \text{ 1/s log}$

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
1	0.00999	0.0699	6.99	0.00382	1.71	Dy_auto
2	0.0128	0.0722	5.66	0.00488	1.77	Dy_auto
3	0.0163	0.0732	4.5	0.00623	1.79	Dy_auto
4	0.0208	0.0771	3.71	0.00794	1.89	Dy_auto
5	0.0266	0.0797	3	0.0102	1.95	Dy_auto
6	0.0339	0.084	2.48	0.013	2.05	Dy_auto
7	0.0433	0.0895	2.07	0.0165	2.19	Dy_auto
8	0.0553	0.0962	1.74	0.0211	2.35	Dy_auto
9	0.0706	0.106	1.5	0.027	2.59	Dy_auto
10	0.09	0.118	1.31	0.0344	2.88	Dy_auto
11	0.115	0.131	1.14	0.044	3.21	Dy_auto
12	0.147	0.152	1.03	0.0562	3.71	Dy_auto
13	0.187	0.177	0.946	0.0716	4.34	Dy_auto
14	0.239	0.207	0.865	0.0915	5.06	Dy_auto
15	0.305	0.243	0.798	0.116	5.95	Dy_auto
16	0.39	0.281	0.72	0.149	6.87	Dy_auto
17	0.497	0.336	0.676	0.19	8.21	Dy_auto
18	0.635	0.393	0.619	0.243	9.62	Dy_auto
19	0.809	0.492	0.608	0.309	12	Dy_auto
20	1.03	0.613	0.593	0.395	15	Dy_auto
21	1.32	0.771	0.585	0.504	18.9	Dy_auto
22	1.68	0.951	0.564	0.644	23.2	Dy_auto
23	2.15	1.19	0.553	0.822	29.1	Dy_auto
24	2.74	1.51	0.549	1.05	36.9	Dy_auto
25	3.5	1.9	0.544	1.34	46.6	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
26	4.47	2.46	0.551	1.71	60.2	Dy_auto
27	5.71	3.22	0.564	2.18	78.8	Dy_auto
28	7.29	4.19	0.575	2.79	103	Dy_auto
29	9.3	5.24	0.564	3.56	128	Dy_auto
30	11.9	6.65	0.56	4.54	163	Dy_auto
31	15.2	8.62	0.569	5.8	211	Dy_auto
32	19.3	10.9	0.561	7.4	266	Dy_auto
33	24.7	13.9	0.562	9.44	340	Dy_auto
34	31.5	17.8	0.566	12.1	436	Dy_auto
35	40.2	22.8	0.567	15.4	558	Dy_auto
36	51.4	29.3	0.57	19.6	716	Dy_auto
37	65.6	37.5	0.571	25.1	917	Dy_auto
38	83.7	48	0.574	32	1,170	Dy_auto
39	107	61.4	0.575	40.9	1,500	Dy_auto
40	136	78.6	0.576	52.2	1,920	Dy_auto
41	174	101	0.578	66.6	2,460	Dy_auto
42	222	129	0.58	85	3,150	Dy_auto
43	284	161	0.569	108	3,950	Dy_auto
44	362	193	0.533	138	4,720	Dy_auto
45	462	237	0.514	177	5,810	Dy_auto
46	590	294	0.498	226	7,180	Dy_auto
47	753	365	0.484	288	8,920	Dy_auto
48	962	454	0.472	368	11,100	Dy_auto
49	1,230	563	0.458	469	13,800	Dy_auto
50	1,570	696	0.444	599	17,000	Dy_auto
51	2,000	868	0.434	765	21,200	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก7 ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่องทดสอบความหนืดแบบแผ่นขนานสำหรับสาร
แขวนลอยคาร์บอนแบล็ค 2.5% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

Data Series Information

Name: 2.5%-1mm-75c-1 1
 Number of Intervals: 1
 Application: RHEOPLUS/32 Multi9 V3.40 21000068-36653
 MCR301 SN839167; FW3.40D090210; Slot8;
 Device: Adj455d
 Measuring Date/Time: 22/06/2009; 03:16 PM
 Measuring System: PP50-SN7349; [d=1 mm]
 Accessories: TU1=P-PTD200/TG+H-PTD200-SN826884-916400

Interval: 1
 Number of Data Points: 51

Time Setting: 51 Meas. Pts.
 Meas. Pt. Duration 5 s

Measuring Profile:
 Shear Rate $d(\gamma)/dt = 0.01 \dots 2,000 \text{ 1/s log}$

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
1	0.00999	0.0591	5.92	0.0035	1.45	Dy_auto
2	0.0127	0.0623	4.89	0.00446	1.52	Dy_auto
3	0.0163	0.0639	3.91	0.00572	1.56	Dy_auto
4	0.0208	0.0695	3.34	0.00729	1.7	Dy_auto
5	0.0266	0.0718	2.7	0.00933	1.76	Dy_auto
6	0.0339	0.0774	2.29	0.0119	1.89	Dy_auto
7	0.0432	0.0806	1.86	0.0151	1.97	Dy_auto
8	0.0554	0.0865	1.56	0.0194	2.12	Dy_auto
9	0.07	0.099	1.41	0.0245	2.42	Dy_auto
10	0.0896	0.108	1.21	0.0314	2.64	Dy_auto
11	0.115	0.119	1.04	0.0402	2.91	Dy_auto
12	0.146	0.138	0.945	0.0512	3.38	Dy_auto
13	0.188	0.159	0.849	0.0657	3.89	Dy_auto
14	0.239	0.181	0.755	0.0838	4.42	Dy_auto
15	0.305	0.206	0.676	0.107	5.04	Dy_auto
16	0.391	0.231	0.591	0.137	5.65	Dy_auto
17	0.497	0.282	0.568	0.174	6.9	Dy_auto
18	0.635	0.326	0.514	0.222	7.98	Dy_auto
19	0.81	0.381	0.47	0.284	9.31	Dy_auto
20	1.03	0.477	0.462	0.362	11.7	Dy_auto
21	1.32	0.57	0.432	0.462	13.9	Dy_auto
22	1.68	0.709	0.421	0.59	17.4	Dy_auto
23	2.15	0.853	0.397	0.753	20.9	Dy_auto
24	2.74	1.04	0.381	0.962	25.6	Dy_auto
25	3.5	1.27	0.364	1.23	31.2	Dy_auto

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa.s]	Speed [1/min]	Torque [Nm]	Status []
26	4.47	1.61	0.361	1.57	39.5	Dy_auto
27	5.71	2.08	0.364	2	50.8	Dy_auto
28	7.29	2.7	0.37	2.55	66	Dy_auto
29	9.3	3.41	0.366	3.26	83.3	Dy_auto
30	11.9	4.16	0.35	4.16	102	Dy_auto
31	15.2	5.38	0.355	5.31	132	Dy_auto
32	19.3	6.66	0.344	6.78	163	Dy_auto
33	24.7	8.55	0.346	8.65	209	Dy_auto
34	31.5	10.7	0.341	11	263	Dy_auto
35	40.2	13.5	0.335	14.1	330	Dy_auto
36	51.4	16.8	0.328	18	412	Dy_auto
37	65.6	21.2	0.323	23	518	Dy_auto
38	83.7	26.5	0.317	29.3	648	Dy_auto
39	107	33	0.309	37.4	807	Dy_auto
40	136	41.2	0.302	47.8	1,010	Dy_auto
41	174	51.6	0.296	61	1,260	Dy_auto
42	222	64.5	0.29	77.9	1,580	Dy_auto
43	284	81.5	0.287	99.4	1,990	Dy_auto
44	362	103	0.283	127	2,510	Dy_auto
45	462	126	0.273	162	3,090	Dy_auto
46	590	154	0.261	207	3,770	Dy_auto
47	753	186	0.247	264	4,550	Dy_auto
48	962	222	0.231	337	5,430	Dy_auto
49	1,230	263	0.214	430	6,440	Dy_auto
50	1,570	322	0.205	549	7,870	Dy_auto
51	2,000	411	0.206	700	10,100	Dy_auto

ภาคผนวก ค

ข้อมูลความดันที่แต่ละสภาวะทดลอง

ตารางผนวกที่ ข1_ ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงเฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง
25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

ปริมาณ คาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบ แม่พิมพ์ด้วย ซิลิโคน	ความหยาบผิว ช่องทางไหล	อัตราการไหล (มล./นาท)	ความดัน (บาร์)
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	0.4	1.93
			0.5	2.43
			0.6	2.92
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	0.4	1.59
			0.5	2.03
			0.6	2.43
0	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	0.4	1.87
			0.5	2.38
			0.6	2.84
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	0.4	1.16
			0.5	1.50
			0.6	1.78
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วย ไฟฟ้า	0.4	1.65
			0.5	2.06
			0.6	2.43
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วย ไฟฟ้า	0.4	1.30
			0.5	1.60
			0.6	1.85
0	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วย ไฟฟ้า	0.4	1.55
			0.5	1.95
			0.6	2.33
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วย ไฟฟ้า	0.4	1.14
			0.5	1.42
			0.6	1.66

ตารางผนวกที่ ข2 ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงเฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหยาบผิวช่องทางไหล	อัตราการไหล (มล./นาท)	ความดัน (บาร์)
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	0.4	1.93
			0.5	2.44
			0.6	2.93
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	0.4	1.61
			0.5	2.01
			0.6	2.42
0	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	0.4	1.85
			0.5	2.37
			0.6	2.85
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	0.4	1.19
			0.5	1.53
			0.6	1.78
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	0.4	1.63
			0.5	2.03
			0.6	2.43
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	0.4	1.27
			0.5	1.58
			0.6	1.86
0	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	0.4	1.52
			0.5	1.94
			0.6	2.32
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	0.4	1.15
			0.5	1.43
			0.6	1.66

ตารางผนวกที่ ข3 ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงเฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหยาบผิวช่องทางไหล	อัตราการไหล (มล./นาที)	ความดัน (บาร์)
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1.0	1.28
			2.0	2.56
			3.0	3.84
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1.0	0.90
			2.0	1.86
			3.0	2.70
0	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1.0	1.21
			2.0	2.42
			3.0	3.64
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1.0	0.84
			2.0	1.71
			3.0	2.56
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1.0	1.19
			2.0	2.38
			3.0	3.54
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1.0	0.89
			2.0	1.76
			3.0	2.63
0	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1.0	1.15
			2.0	2.29
			3.0	3.45
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1.0	0.81
			2.0	1.60
			3.0	2.43

ตารางผนวกที่ ข4 ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงเฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหยาบผิวช่องทางไหล	อัตราการไหล (มล./นาที)	ความดัน (บาร์)
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1.0	1.28
			2.0	2.54
			3.0	3.84
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1.0	0.92
			2.0	1.85
			3.0	2.72
0	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1.0	1.22
			2.0	2.44
			3.0	3.65
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1.0	0.83
			2.0	1.69
			3.0	2.52
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1.0	1.18
			2.0	2.36
			3.0	3.53
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1.0	0.87
			2.0	1.74
			3.0	2.60
0	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1.0	1.16
			2.0	2.31
			3.0	3.46
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1.0	0.81
			2.0	1.61
			3.0	2.41

ภาคผนวก ง

ข้อมูลความหนักที่แต่ละสภาวะทดลอง

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลความหนืดสำหรับการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

ปริมาณ คาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบ แม่พิมพ์ด้วย ซิลิโคน	ความหยาบผิว ช่องทางไหล	อัตราเฉือน (1/วินาที)	ความหนืด (Pa.s)
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	774.7	1.6340
			970.6	1.6420
			1165.0	1.6430
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	767.1	1.3590
			965.5	1.3790
			1158.0	1.3760
0	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	771.6	1.5890
			970.2	1.6090
			1162.0	1.6030
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	763.7	0.9960
			965.1	1.0190
			1154.0	1.0120
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วย ไฟฟ้า	796.0	1.3590
			994.6	1.3580
			1187.0	1.3430
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วย ไฟฟ้า	828.3	1.0290
			1027.0	1.0150
			1219.0	0.9953
0	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วย ไฟฟ้า	779.6	1.3040
			976.5	1.3090
			1170.0	1.3060
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วย ไฟฟ้า	805.7	0.9278
			1006.0	0.9257
			1196.0	0.9100

ตารางผนวกที่ ค2 ข้อมูลความหนืดสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 25 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหยาบผิวช่องทางไหล	อัตราเฉือน (1/วินาที)	ความหนืด (Pa.s)
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	772.1	1.6390
			968.7	1.6520
			1163.0	1.6520
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	779.6	1.3540
			974.1	1.3530
			1170.0	1.3560
0	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	761.6	1.5930
			959.5	1.6200
			1152.0	1.6220
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	781.4	0.9986
			986.1	1.0170
			1171.0	0.9967
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	786.2	1.3600
			981.5	1.3560
			1177.0	1.3540
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	800.9	1.0400
			999.4	1.0370
			1191.0	1.0240
0	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	768.0	1.2980
			966.5	1.3160
			1159.0	1.3130
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	813.5	0.9270
			1015.0	0.9239
			1204.0	0.9043

ตารางผนวกที่ ค3 ข้อมูลความหนืดสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1

ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหยาบผิวช่องทางไหล	อัตราเงื่อนไข (1/วินาที)	ความหนืด (Pa.s)
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1953.0	0.4298
			3906.0	0.4298
			5859.0	0.4298
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1952.0	0.3023
			3948.0	0.3090
			5856.0	0.3023
0	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1951.0	0.4068
			3901.0	0.4068
			5857.0	0.4075
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1938.0	0.2842
			3899.0	0.2876
			5844.0	0.2872
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1961.0	0.3979
			3922.0	0.3979
			5867.0	0.3957
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1968.0	0.2965
			3921.0	0.2943
			5875.0	0.2936
0	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1953.0	0.3861
			3900.0	0.3850
			5859.0	0.3861
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1953.0	0.2720
			3890.0	0.2697
			5859.0	0.2720

ตารางผนวกที่ ค4 ข้อมูลความดันสำหรับการทดลองเชิงเฟคทอเรียลแบบ 2^3 ที่อุณหภูมิทดลอง 50 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 2

ปริมาณคาร์บอนแบล็ค (% โดยน้ำหนัก)	การเคลือบแม่พิมพ์ด้วยซิลิโคน	ความหยาบผิวช่องทางไหล	อัตราเนียน (1/วินาที)	ความหนืด (Pa.s)
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1953.0	0.4298
			3896.0	0.4275
			5859.0	0.4298
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1967.0	0.3067
			3942.0	0.3078
			5873.0	0.3037
0	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1956.0	0.4090
			3912.0	0.4090
			5862.0	0.4083
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.85$ ไมโครเมตร จากวิธีการเจียรระโน	1941.0	0.2803
			3906.0	0.2837
			5847.0	0.2826
0	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1956.0	0.3957
			3911.0	0.3957
			5862.0	0.3949
2.5	ไม่เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1957.0	0.2915
			3914.0	0.2915
			5863.0	0.2908
0	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1959.0	0.3884
			3912.0	0.3872
			5865.0	0.3869
2.5	เคลือบ	$R_a = 0.94$ ไมโครเมตร จากวิธีการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า	1961.0	0.2708
			3914.0	0.2697
			5867.0	0.2693

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวชมพูนุท เจริญวุฒิลาภ
เกิดวันที่	2 สิงหาคม 2528
สถานที่เกิด	อำเภอบางกอกน้อย จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-