



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง นาโนซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบข้าวเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบน
กระดาษคราฟต์ขาว

Synthesized Nano-silica from Rice Hu
White Kraft Paper

نامผู้วิจัย นายนิทัศน์ ทิพย์โสตนัยนา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ จิณกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

นาโนซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบข้าวเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบนกระดาษคราฟต์ขาว

Synthesized Nano-silica from Rice Husk to Improve Printing Quality of Flexography on
White Kraft Paper

โดย

นายนิทัศน์ ทิพย์โสตนัยนา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2557

นิทัศน์ ทิพย์โสตนัยนา 2557: นาโนซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบข้าวเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบนกระดาษกราฟต์ขาว ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D. 137 หน้า

ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่สังเคราะห์จากการเผาแกลบเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีบนกระดาษกราฟต์ขาว เป็นซิลิกาที่ได้จากกระบวนการต้มแกลบข้าวด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลาร์ ระยะเวลา 2 ชั่วโมง และเผาภายใต้การควบคุมอากาศที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการลดขนาดเป็นอนุภาคนาโนด้วยการสังเคราะห์เป็นวัสดุ MCM-41 ด้วยสารละลายเฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในสารเคลือบลาเท็กซ์สไตรีนเรซินด้วยอัตราส่วนที่ต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 ของน้ำหนักเรซิน เคลือบบนกระดาษกราฟต์ขาว 170 แกรม ด้วยลูกกลิ้งระบบกราวิเออร์ ให้ความหนา 3-4 ไมครอน ทดสอบคุณภาพการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีที่มีรายละเอียดภาพพิมพ์ 31.5 เส้นต่อเซนติเมตร พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ฐานน้ำสีไซแอน มาเจนต้า เหลือง และดำ พบว่าปริมาณอัตราส่วนซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่ผสมในสารเคลือบทำให้สมบัติของสารเคลือบและคุณภาพทางการพิมพ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p น้อยกว่า 0.0001) และพบว่าสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซินเหมาะสมนำไปปรับปรุงคุณภาพกระดาษกราฟต์ขาวสำหรับการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีเนื่องจากมีค่าความหนืดเหมาะสมกับการนำไปเคลือบที่ 39.2 ± 1.322 เซนติพอยด์ เคลือบกระดาษกราฟต์มีสมบัติการดูดซึมน้ำเพียง 64.04 ± 5.65 กรัมต่อตารางเมตรและมีความเรียบเท่ากับ 5.48 ± 0.36 วินาที-เบคก์ นำไปพิมพ์งานมีคุณภาพทางการพิมพ์ดีที่สุด มีความคมชัดของตัวอักษรสูงและเส้นงานพิมพ์ที่มีความคมชัด มีความสมจริงของภาพสี การขยายตัวของโทนภาพพิมพ์ตามข้อกำหนดของมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี (ISO 12647-6) เพราะเกิดขยายเม็ดสกรีนของเม็ดสกรีนต่ำ ได้ขอบเขตสีงานพิมพ์กว้างที่สุด ค่าความแตกต่างสีต่ำที่สุด อีกทั้งมีความทนทานต่อการขัดถูดีที่สุด

Nitus Tipsotnaiyana 2014: Synthesized Nano-silica from Rice Husk to Improve Printing Quality of Flexography on White Kraft Paper. Doctor of Philosophy (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Lerpong Jarupan, Ph.D. 137 pages.

Nano-silica from rice husk (nano-RHS) was synthesized and used in a water-based coating agent to improve the print quality flexography on white kraft paper. The rice husk was refluxed with an acidic 2 M HCl solution and calcined in a muffle furnace at 650 °C for 4 h. The particle size of the resultant rice husk ash was reduced to a very fine nano-level by hexadecyl trimethyl ammonium bromide (CTAB). The synthesized nano-RHS in different proportions 1%, 2%, 3%, 4% and 5% (w/w_{resin}) was added to the coating agent consisting of styrene resin. The coating agent with nano-RHS additive was applied by gravure rolling onto the surface of a 170 g/m² white kraft liner of corrugated board 3–4 µm in thickness. The flexographic print quality was determined with printing details of 31.5 lpc using water-based process colors (CMYK). It was found that the proportions of nano-RHS significantly affected on properties of the coating agent and the print quality ($p < 0.0001$). The results indicated that the coating agent with 1% nano-RHS was the most promising for enhancing the flexographic print quality on the white kraft paper. The viscosity of coating agent with 1% nano-RHS was 39.2 ± 1.322 cp and was suitable for coating on the white kraft liner. Water absorption was 64.04 ± 5.65 g/m² and roughness of the coated kraft paper with 1% nano-RHS was 5.48 ± 0.36 sec-beck. At this fraction, the best print quality in terms of high sharpness of fonts and texts, line art, realistic image, and TVI curve (under the requirements of ISO 12647-6) were achieved. In addition, low tone-value and ΔE_{ab}^* with a large, three-dimensional color profile and the widest color gamut were also obtained.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องนาโนซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบข้าวเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบนกระดาษกราฟต์ขาว ได้รับการอนุเคราะห์วัตถุดิบแกลบข้าวเปลือกจากโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา กระดาษกราฟต์ขาวจาก บริษัท ปัญญาพลไฟเบอร์แอนด์คอนเทนเนอร์ จำกัด สถานที่และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทำงานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การสกัดซิลิกาและสังเคราะห์ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่ของสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การผลิตสารเคลือบได้รับการสนับสนุนเครื่องจักรและสารเคมีจากโรงงานผลิตหมึกพิมพ์ บริษัท เกลิมชัยชาญ จำกัด เคลือบผิวกระดาษกราฟต์ขาวและพิมพ์ระบบการพิมพ์เฟล็กโซกราฟีทดสอบที่ บริษัท ถาวร เลเบิล แอนด์ รีบบอน จำกัด เครื่องมือในการวิเคราะห์คุณภาพทางการพิมพ์ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและบริษัท ยูเนี่ยน ทีเอสแอล จำกัด ขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชिरาวุฒิ เพชรเย็น ที่ให้คำแนะนำปรึกษาเรื่องการสกัดซิลิกาจากแกลบข้าว ผศ.ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่แนะนำเครื่องมือในการวิเคราะห์ และวิธีในการทดสอบ กราบขอบพระคุณอย่างสูงอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผศ.ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์ ที่ให้คำปรึกษาทุกขั้นตอน และสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำงานวิจัย และผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

นิทัศน์ ทิพย์โสตนัยนา

ตุลาคม 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์	32
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
สรุป	89
ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	94
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ	104
ภาคผนวก ข ภาพถ่ายจากการทำวิจัย	128
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	137

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบของเกลบ	5
2	ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์เกลบ	5
3	ค่าพิคตสปีนพื้นทึบของงานเฟล็กโซกราฟีและค่าความแตกต่างสีที่ยอมรับได้ ตามมาตรฐาน ISO 12647-6/TIS 2260-6	23
4	สภาวะการต้มเกลบข้าวในกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ใน การต้มที่แตกต่างกัน	35
5	สูตรสารเคลือบกระดาษ	38
6	พิคตสี CIE L*a*b* ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่ อัตราส่วนต่างๆ	62
7	พิคตสี CIE L*a*b* ของกระดาษกราฟที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสม ซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	65
ตารางผนวกที่		
ก1	องค์ประกอบเคมีของซีเมนต์เกลบ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุและ สารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	105
ก2	พิคตสีด้วยเครื่องวัดค่าพิคตสี (spectrophotometer)	105
ก3	ความขาวของซิลิกาด้วยเครื่องวัดค่าพิคตสี (spectrophotometer)	106
ก4	องค์ประกอบเคมีของของซิลิกานาโนจากเกลบข้าว ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ ธาตุและสารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	106
ก5	ขนาดของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวด้วยวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD)	107
ก6	ปริมาตรของรูพรุนซิลิกาและซิลิกานาโนจากเกลบข้าวและพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ด้วยวิธีการ (BET method) เพื่อดูความสามารถในการ ดูดซับปริมาณก๊าซไนโตรเจน	107
ก7	พิคตสีและความขาวของซิลิกาด้วยเครื่องวัดค่าสี (visible spectrophotometer)	108
ก8	ความขาวของซิลิกาด้วยเครื่องวัดค่าสี (visible spectrophotometer)	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก9 ปริมาณของแข็งที่ไม่ระเหย (solid content) เพื่อหาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของสารเคลือบเมื่อแห้งตัว (ASTM D7232-06)	109
ก10 ความหนืดของสารเคลือบที่ผสมซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ด้วยเครื่องวัดค่าความหนืด Brookfield viscometer (ASTM D 2196-10)	109
ก11 ความโปร่งใส (transparent) ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (ASTM D1003-11e1)	110
ก12 พิกัดสีของสารเคลือบที่ผสมซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (ASTM D1003-11e1)	110
ก13 ความเป็นเหลืองหรือค่า yellowness ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (ASTM E313-10)	111
ก14 พิกัดสีของกระดาษกราฟต์ขาวเมื่อเคลือบสารที่ผสมซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (ISO 12647-1, ASTM D2244-11)	111
ก15 ความแตกต่างสี (ΔE) ของกระดาษกราฟต์ที่เคลือบสารซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานกระดาษสำหรับการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 (มอก 2260-6 และ CIE 1391)	112
ก16 ความหนาของชั้นสารเคลือบบนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	113
ก17 ความมันวาว (gloss) (ASTM D1223-93 : 2006)	113
ก18 การดูดซึมน้ำ (cobb test) ของกระดาษที่เคลือบซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่าง ๆ (TAPPI 441)	114
ก19 ความขรุขระ (roughness) ของกระดาษที่เคลือบซิลิกาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ (TAPPI T555)	115
ก20 ค่าความดำของหมึกพิมพ์ (density) แต่ละสี (ASTM D7305-08a)	115
ก21 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เม็ดสกรีน (tone value increase, TVI) แต่ละสีของงานพิมพ์ (มอก. 2260-1, 2006)	117

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก22	ความแตกต่างสี (ΔE) งานพิมพ์แต่ละสี เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 (ASTM D2244-11 และ CIE 1931)	125
ก23	ความทนทานต่อการขัดถูของงานพิมพ์บนสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจาก แคลบข้าว (ASTM D5264-98)	127

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 รูปแบบการเชื่อมต่อในรูปแบบเตตระฮีดรอลของซิลิกเกต	7
2 การเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาผลึก	8
3 โครงสร้างของซิลิกาผลึก	9
4 เฟสของซิลิกา ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่แตกต่างกัน	10
5 รูปแบบโครงสร้างและรูพรุนของวัสดุซิลิกาเมโซพอร์ MCM-41	13
6 หลักการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี	14
7 การเคลือบผิวกระดาษ	16
8 แผนภูมิสี CIE L*a*b*	20
9 แผนภูมิขอบเขตสี (CIE color gamut 1976)	22
10 ลักษณะที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าของแถบขาวที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน และแถบที่เผาอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง	44
11 องค์ประกอบทางเคมีของแถบขาวที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน	45
12 X-ray diffractogram ของซิลิกาที่ได้จากการเผาแถบขาวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน	46
13 ลักษณะพื้นผิวของของซิลิกาที่ได้จากการเผาแถบขาว ที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า	47
14 พิกัดสีและค่าความขาวของซิลิกาที่ได้จากการ เผาแถบขาวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน และค่าความแตกต่างสี เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าพิกัดสีและความขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6	49
15 ซิลิกาที่เตรียมจากแถบขาวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เผาในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง และผงซิลิกานาโน	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ปริมาณของธาตุและความบริสุทธิ์ของซิลิกานาโน (MCM-41) และซิลิกาจาก แคลบข้าวที่เตรียมจากแคลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เฝ้าในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	52
17	ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของของซิลิกาจากแคลบข้าวและซิลิกานาโนจาก แคลบข้าวที่เตรียมจากแคลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เฝ้าในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง โดยเทคนิคการ ถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า	53
18	ขนาดอนุภาคของซิลิกาจากแคลบข้าวและซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เตรียม จากแคลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เฝ้าในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PSD	54
19	ขนาดอนุภาคของซิลิกาจากแคลบข้าวและซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เตรียม จากแคลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เฝ้าในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET method	55
20	ค่าพิคัสและค่าความขาวของซิลิกาจากแคลบข้าวและซิลิกานาโนจากแคลบ ข้าวที่เตรียมจากแคลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โม ลาร์ 120 นาที เฝ้าในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง และค่าความ แตกต่างสีเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าพิคัสและความขาวของมาตรฐาน ทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6	57
21	ค่าของแข็งที่ไม่ระเหยตัวของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่ อัตราส่วนต่างๆ	59
22	ความหนืดของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	60
23	ความโปร่งใสของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วน ต่างๆ	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ความเป็นเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้มหรือค่า yellowness ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	63
25	FT-IR สเปกตรัมของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	64
26	ความแตกต่างสีของกระดาษกราฟด์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ เปรียบเทียบกับกระดาษกราฟด์ขาวที่ไม่ได้เคลือบผิว	66
27	ผิวหน้ากระดาษกราฟด์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 เท่า	69
28	ภาพตัดขวางและความหนาของชั้นสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ บนกระดาษกราฟด์ โดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 250 เท่า	70
29	ความมันวาวของกระดาษกราฟด์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	71
30	การดูดซึมน้ำของกระดาษกราฟด์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	72
31	ความขรุขระของกระดาษกราฟด์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	74
32	แบบจำลองงานพิมพ์ (TC3.5) สำหรับวิเคราะห์คุณภาพทางการพิมพ์	75
33	ความดำของหมึกพิมพ์สี cyan magenta yellow และ black บนกระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน	76
34	ความคมชัดของตัวอักษรที่พิมพ์ขนาดต่างๆ บนกระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน	77
35	ความคมชัดของเส้นขนาดต่างๆ บนกระดาษกราฟด์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	ความคมชัดของขอบตัวอักษรขนาด 6 พอยต์ บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน	78
37	ภาพพิมพ์สีบนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน	80
38	ปริมาณการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เม็ดสกรีนของงานพิมพ์สี cyan, magenta, yellow และ black บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน	82
39	แผนภูมิโปรไฟล์สีสามมิติของงานพิมพ์สี บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน	84
40	ขอบเขตสีของงานพิมพ์สีบนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆกัน	85
41	กราฟแสดงความแตกต่างสีของงานพิมพ์สี cyan, magenta, yellow และ black บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆเปรียบเทียบกับหมึกพิมพ์ตามมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟฟี ISO 12647-6	87
42	กราฟแสดงความทนทานต่อการขัดถู ของงานพิมพ์สี บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ	88
ภาพผนวกที่		
ข1	แคลบข้าวเปลือก	129
ข2	ต้มแคลบข้าวด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน	129
ข3	แคลบข้าวก่อนเผา	129
ข4	แก้วแคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 240 นาที	130
ข5	เครื่องบดลูกแก้วชนิด 2 แกน	130
ข6	ซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่ได้จากการสังเคราะห์	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข7	ปั่นกวนให้เรซินและน้ำละลายเป็นเนื้อเดียวกัน 131
ข8	เติมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน แล้วปั่นกระจายตัวโดยมี การใส่สารช่วยกระจายตัวและสารลดฟอง 131
ข9	อุปกรณ์วัดค่าความหนืด (Brookfield viscometer) 131
ข10	อุปกรณ์วัดค่าสีของเหลว (x-rite i5) ขณะวัดค่าสีสารเคลือบ 132
ข11	หาค่าของแข็งที่ไม่ระเหย (solid content) 132
ข12	วิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อดูหมู่ฟังก์ชันภายในของตัวสารเคลือบที่ผสมซิลิ กานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้เครื่อง FT-IR 132
ข13	เคลือบผิวกระดาษกราฟต์ด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่ อัตราส่วนต่างๆ ด้วยการเคลือบระบบลูกกลิ้งกราเวียร์ ขนาด 23.5 lpc 133
ข14	วัดค่าความมันวาวกระดาษกราฟต์ด้วยเครื่องวัดค่าความมันวาว มุม 75 องศา 133
ข15	ถ่ายภาพกำลังขยายสูงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 133
ข16	วิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำ (Tappi 441) 134
ข17	ไฟล์งานทดสอบสี (test chart) สำหรับวิเคราะห์คุณภาพงานพิมพ์ 134
ข18	แม่พิมพ์เพล็กโซกราฟี สี C M Y K เป็นยางสังเคราะห์พื้นนูน แม่พิมพ์มีความ หนา 1.14 มิลลิเมตร มีรายละเอียด 31.5 lpc 134
ข19	พิมพ์งานทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์เพล็กโซกราฟี Nilpeter รุ่น 200 FB 135
ข20	งานพิมพ์ 4 สีบนกระดาษกราฟต์ขาวที่ผ่านเคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่ อัตราส่วนผสมต่างร้อยละ 0-5 ของน้ำหนักเรซิน 135
ข21	วิเคราะห์ความคมชัดของตัวอักษรและลายเส้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ 135
ข22	การหาค่าขอบเขตสีทางการพิมพ์ (color gamut) 136
ข23	วัดค่าฟิสิกส์ของกระดาษและงานพิมพ์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ 136
ข24	ทดสอบความทนทานต่อการขัดถูของงานพิมพ์ ด้วยเครื่อง Sutherland Rub Tester (ASTM D 5264-98) 136

นาโนซิลิกาสังเคราะห์จากแกลบข้าวเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี บนกระดาษkraftข้าว

Synthesized Nano-silica from Rice Husk to Improve Printing Quality of Flexography on White Kraft Paper

คำนำ

แกลบ เป็นวัสดุพลอยได้จากการสีข้าว ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตข้าวสำหรับเลี้ยงประชากรในประเทศและส่งออกเป็นอันดับต้นๆ ของโลก โดยประเทศไทยมีตัวเลขกำลังการผลิตข้าวในแต่ละปีเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 27-30 ล้านตันข้าวเปลือก (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) เมื่อสีข้าวเปลือกแล้วเหลือแกลบข้าวอยู่ในปริมาณมาก แกลบข้าวจัดเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จึงหาได้ง่ายมีราคาถูกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยในปัจจุบันมีการนำแกลบที่เหลือจากการสีข้าวมาใช้ในอุตสาหกรรมการเผาอิฐ การผสมในดินเพื่อทำปุ๋ยหรือแม้แต่นำไปเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน และยังมีอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวล โดยนำแกลบข้าวไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า (Electricity Generation from biomass, 2011)

องค์ประกอบภายในของแกลบข้าวประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก ลิกนินร้อยละ 19-47 โดยน้ำหนัก และสารประกอบอินทรีย์ร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก ในส่วนประกอบหลักของสารอินทรีย์มีซิลิกาอยู่ในช่วงร้อยละ 85-99 โดยน้ำหนัก โดยปริมาณของซิลิกาขึ้นอยู่กับดินในพื้นที่เพาะปลูก ปุ๋ยที่ใช้ และชนิดพันธุ์ของข้าว (สำนักพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว, 2554) โดยกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบนั้นสามารถใช้แกลบดิบหรือขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผามาแล้ว เมื่อนำมาเผาซ้ำมีสารประกอบซิลิกาอยู่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก (นิคยา, 2550) แต่ขี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาแล้วมีสีเทาหรือสีดำ เนื่องจากมีเขม่าและคาร์บอนของสารอินทรีย์เข้าไปปะปน แต่การสกัดซิลิกาที่สังเคราะห์จากการเผาแกลบดิบภายใต้การควบคุมอากาศในการเผาไหม้ได้ซิลิกาที่มีความขาวบริสุทธิ์ และซิลิกาที่ได้เป็นอสัณฐานซิลิกา (amorphous silica) ที่มีรอยแตกรูพรุนอยู่ในเนื้อ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง สารขัดถู สารดูดความชื้น สารเพิ่มความหนืด สารเคลือบและสารดูดซับตะกอนน้ำเสียจากโรงพิมพ์ (Yalcin and Servinc, 2001)

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจนำแถบข้าวมาสกัดซิลิกา และลดขนาดอนุภาคของซิลิกา ให้มีขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตร เนื่องจากซิลิกานาโนมีจุดเด่นด้านขนาดรูพรุนที่ลดลง แต่พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนซิลิกานาโนก็เพิ่มสูงถึง 200 ตารางเมตรต่อกรัม มากกว่าซิลิกาทั่วไปที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 60 ตารางเมตรต่อกรัม (Chiarakorn, 2004) โดยอาศัยสมบัติเด่นของซิลิกานาโนมาผสมกับสารเคลือบผิวกระดาษ เพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับกระดาษกราฟด์ที่ใช้พิมพ์งานทางด้านบรรจุภัณฑ์ สามารถพิมพ์ได้ภาพที่มีสีสันสดใสและความคมชัดสูง หมึกพิมพ์ถูกดูดซับไม่กระจายตัว มีขอบเขตสีงานพิมพ์กว้างมากขึ้นดังตัวอย่างเช่น การเคลือบซิลิกาบนผิวกระดาษสำหรับการพิมพ์ภาพหรือกระดาษอิงก์เจ็ทที่สามารถพิมพ์ภาพสีสันสดใสและความคมชัดสูง (อนันต์, 2548)

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากซิลิกานาโนที่สกัดจากแถบข้าวเพื่อปรับปรุงชั้นผิวหน้าของกระดาษกราฟด์สำหรับการพิมพ์ด้วยระบบเพล็กโซกราฟี โดยมีการใช้ซิลิกานาโนจากแถบข้าวในปริมาณน้อยกว่าการใช้ซิลิกาทั่วไปผสมกับสารเคลือบกระดาษก่อนพิมพ์ เป็นการพัฒนาบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษถูกฟูและสร้างมูลค่าให้แก่แถบข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสกัดซิลิกาจากแกลบข้าวให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงจนถึงระดับนาโน และมีสมบัติเหมาะสมในการผลิตสารเคลือบกระดาษกราฟต์
2. เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในสารเคลือบกระดาษฐานน้ำ
3. เพื่อทดสอบสมบัติทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีของสารเคลือบที่ผลิตได้
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารเคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในการปรับปรุงคุณภาพงานพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบนกระดาษกราฟต์

การตรวจเอกสาร

แกลบข้าว

แกลบข้าวเป็นส่วนประกอบในเมล็ดข้าวเป็นผลชนิด caryopsis มีเยื่อหุ้มเมล็ด (testa) อยู่ติดกับผนังรังไข่ (ovary wall) เมล็ดข้าวประกอบด้วย แกลบ (hull or husk) และ ข้าวกล้อง (brown rice) แกลบเป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) หาง (awn) ข้าวเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmae) เปลือกใหญ่จะปกคลุมอยู่ 2 ใน 3 ของเนื้อที่ เมล็ดเปลือกเล็กยึดแน่นอยู่ภายในส่วนของเปลือกใหญ่ด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายตะขอปิดแน่น (hook like structure) โดยแกลบมีความยาว 4-5 มิลลิเมตร กว้าง 1-2 มิลลิเมตร หยาบ 0.5 มิลลิเมตร มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ คือ 95-150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้ค่าความร้อนประมาณ 3,000-3,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

แกลบข้าวเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว เป็นส่วนผสมของเปลือกเมล็ด กลีบเลี้ยง ฟาง และ ข้าวเมล็ดประมาณร้อยละ 20-24 โดยน้ำหนักของข้าวเปลือก องค์ประกอบส่วนใหญ่ของแกลบได้แก่ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 30-40 ลิกนินประมาณร้อยละ 19-47 และเถ้าประมาณ ร้อยละ 20-25 โดยน้ำหนัก ส่วนประกอบต่างๆ ของแกลบข้าวและเถ้าแกลบข้าวในแต่ละแห่ง แตกต่างกันไปแปรเปลี่ยนไปตามสภาพของดินและธรรมชาติของการเพาะปลูก การวิเคราะห์ทางเคมี ของแกลบข้าวพบซิลิคอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2) ร้อยละ 22.12 คาร์บอนและน้ำรวมกัน ร้อยละ 74 และอลูมินา (Al_2O_3) เร็ดเฮมาไตต์หรือเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ปูนขาว หรือแคลเซียม ออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) รวมกันประมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก

หากการเผาแกลบข้าวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ได้ขี้เถ้าแกลบซึ่งมีอัตราส่วนของซิลิกาเป็น ส่วนประกอบ โดยองค์ประกอบทางเคมีของแกลบข้าวและขี้เถ้าแกลบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของแกลบ

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ถ่าน	38 - 42
ไฮโดรเจน	4.9 - 5.3
ออกซิเจน	30 - 32
ไนโตรเจน	0.3 - 2.2
กำมะถัน	0.07 - 0.12
ความชื้น	< 10
จีเถ้า	16 - 25

ที่มา: กัญญา (2547)

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของจีเถ้าแกลบ

ส่วนประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	91 - 97
โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.6 - 2.5
นิกเกิลออกไซด์ (Ni_2O)	< 1.75
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.2 - 1.5
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.1 - 2
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	< 0.5
ฟอสฟอรัส (P_2O_5)	0.2 - 2.85
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)	0.1 - 1.15
คลอไรด์ (Cl_2)	< 0.4

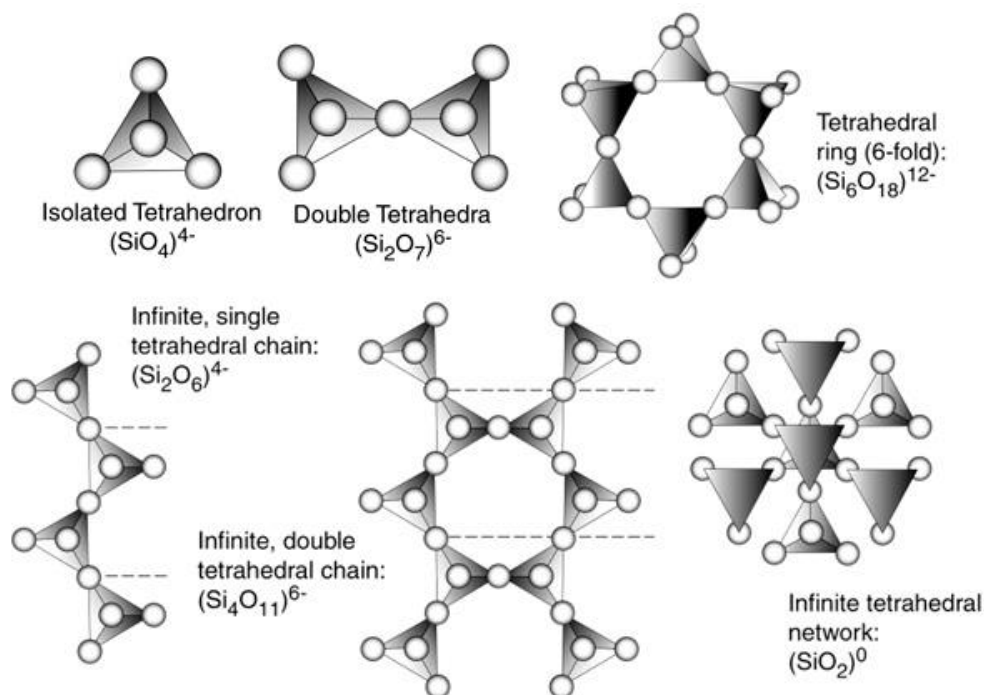
ที่มา: กัญญา (2547)

ซิลิกา

ซิลิกา หรือ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน เป็นผลึกไม่มีสี หรือเป็นผลึกสีขาว (free crystalline silica) ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.2-2.6 โดยขึ้นกับรูปแบบของซิลิกา ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อย ไม่ละลายในกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก แต่สามารถละลายได้โดยการหลอมกับด่าง และรวมตัวกับออกไซด์ของโลหะส่วนใหญ่ได้ ไม่ลุกติดไฟ มีจุดเดือดมากกว่า 2,200 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวประมาณ 1,713 องศาเซลเซียส (กรมควบคุมมลพิษ, 2555) โดยซิลิกาเป็นแหล่งผลิตซิลิคอนและใช้เป็นส่วนของวัสดุก่อสร้างในปริมาณมาก หรือใช้ในการผลิตแก้ว ส่วนซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ถูกใช้เป็นส่วนผสมความชื้นสารดูดซับ สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา (ธีรศักดิ์, 2548)

โครงสร้างและพันธะทางเคมี

ซิลิกาเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ คือ ซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) ลักษณะที่พบอาจอยู่ในรูปซิลิเกต ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของตัวซิลิกาและซิลิเกตมีการจัดเรียงตัวในรูปแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral) โดยมีซิลิคอนเป็นอะตอมกลางและล้อมด้วยอะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม เป็นซิลิเกต (SiO_4) ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเป็นตัวเชื่อมต่อกับตัวซิลิคอนที่อยู่ในซิลิเกตที่อยู่ใกล้เคียงกัน โดยทางโครงสร้างซิลิกามีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จบ (infinite three dimensional network) (ภาพที่ 1) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปของซิลิกาเกิดขึ้นได้ช้ามากเนื่องจากการจัดเรียงตัวของซิลิเกตซึ่งเป็นรูปแบบเตตระฮีดรอล แต่เกิดขึ้นได้เร็วมากเมื่อหลอมรวมกับอะคริลิก วานาเดต คลอไรด์ หรือบอแรต การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของซิลิกาไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพของซิลิกาเปลี่ยนแปลงไปมากนัก (นิตยา, 2550)



ภาพที่ 1 รูปแบบการเชื่อมต่อในรูปแบบเตตระฮีดรอลของซิลิเกต

ที่มา: Bunch and Wittke (2008)

สมบัติทางเคมีของซิลิกา

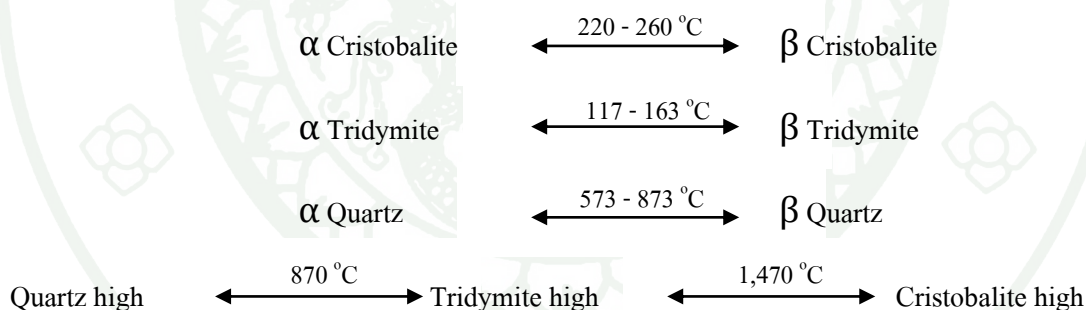
ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิดเนื่องจากซิลิกาสามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ แต่ที่อุณหภูมิสูงความว่องไวในปฏิกิริยาของซิลิกาขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกา โดยซิลิกาชนิดอสัณฐาน (amorphous silica) ว่องไวมากกว่าผลึกซิลิกา (crystalline silica) เนื่องจากซิลิกาอสัณฐานมีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งโดยปกติแล้วสารละลายกรดไม่มีผลต่อซิลิกา ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ซึ่งทำปฏิกิริยากับซิลิกาแล้วเปลี่ยนเป็น H_2SiF_6 ซิลิกาในรูปแบบต่างๆ เกิดปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้ไม่เท่ากันขึ้นกับความหนาแน่น (σ) ของซิลิกา โดยรูปแบบของซิลิกาที่มีความหนาแน่นสูงๆ ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้ต่ำ ซึ่งรูปแบบของซิลิกาที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีเรียงลำดับจากน้อยไปมากตามลำดับดังนี้

- วิเทรียส ซิลิกา (vitreous silica) มีความหนาแน่น 2.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- ทริไคไมท์ (tridymite) ที่มีความหนาแน่น 2.22 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

- คริสโตบาไลต์ (cristobalite) มีความหนาแน่น 2.33 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- ควอตซ์ (quartz) มีความหนาแน่น 2.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- โคอีไซต์ ซิลิกา (coesite silica) มีความหนาแน่น 3.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- สทิสโฮไวท์ ซิลิกา (stishovite silica) มีความหนาแน่น 4.35 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

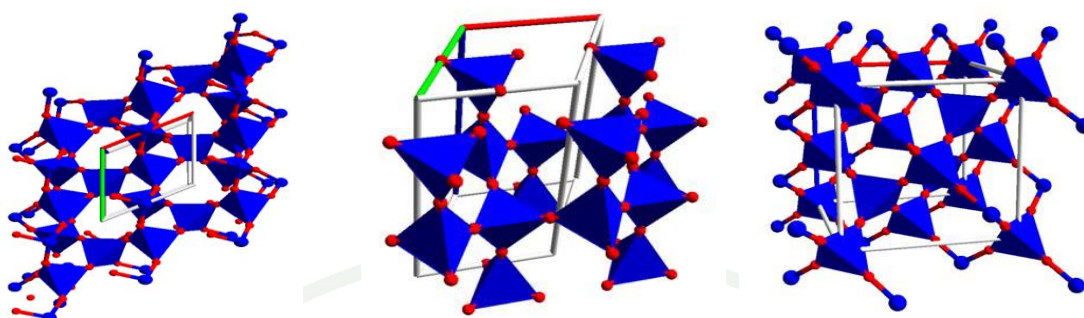
ซิลิกาผลึก (crystalline silica)

ผลึกซิลิกาในธรรมชาติที่พบบ่อยมี 3 รูปแบบ ได้แก่ ควอตซ์ ทริไคไมท์ และคริสโตบาไลต์ ซึ่งรูปผลึกทั้ง 3 แบบนี้มีสูตรทางเคมีเป็นสูตรเดียวกันคือ SiO_2 แต่แตกต่างกันในตำแหน่งการจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้าง กล่าวคือ ในรูปผลึกของคริสโตบาไลต์ และทริไคไมท์ นั้นอะตอมต่างๆ จัดวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กันน้อยกว่าควอตซ์ จึงทำให้ทั้งคริสโตบาไลต์ และทริไคไมท์มีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่า (ควอตซ์ 2.65 คริสโตบาไลต์ 2.33 และ ทริไคไมท์ 2.27) ซึ่งผลึกเกิดจากการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ดังภาพที่ 2 (นิตยา, 2550)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาผลึก

ที่มา: ไพจิตร (2541)



A: quartz

B: tridymite

C: cristobalite

ภาพที่ 3 โครงสร้างของซิลิกาผลึก

ที่มา: Dutch (2001)

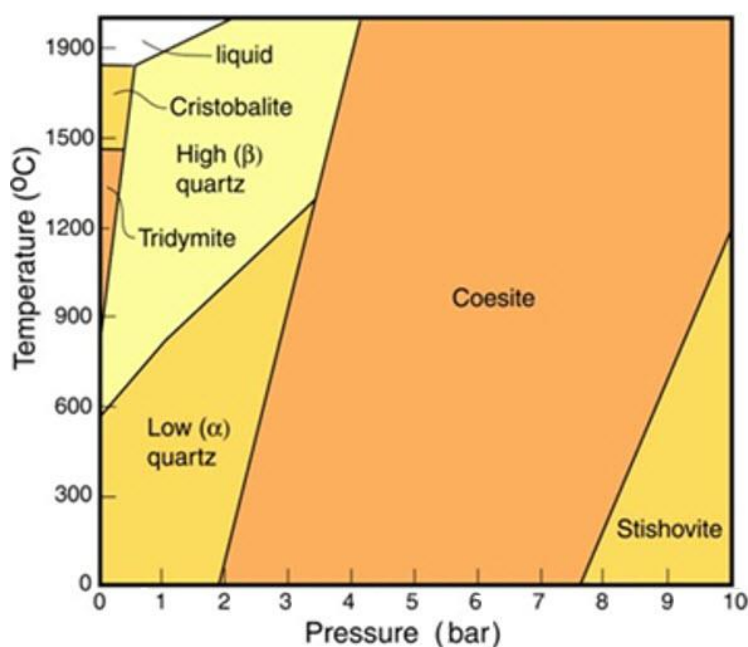
ควอตซ์ (ภาพที่ 3A) เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงตัวดังภาพที่ 3 โดยแอลฟา-ควอตซ์ (α -quartz) เกิดขึ้นในรูป SiO_2 ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 573 องศาเซลเซียส และเบตาควอตซ์ (β -quartz) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 573-873 องศาเซลเซียส

ไตรไคไมท์ (ภาพที่ 3B) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 870-1,470 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงตัวโดยมีแอลฟา-ไตรไคไมท์ (α -tridymite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 117 องศาเซลเซียส และเบตา-ไตรไคไมท์ (β -tridymite) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 870-1,470 องศาเซลเซียส

คริสโตบาไลต์ (ภาพที่ 3C) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 1,470-1,710 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงตัวแบบแอลฟา-คริสโตบาไลต์ (α -cristobalite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 200-275 องศาเซลเซียส แต่ไม่เสถียรแต่บีตา-คริสโตบาไลต์ (β -cristobalite) เป็นเฟสที่แฝงอยู่ในเฟสอื่น เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 200-275 และ 275-1,470 องศาเซลเซียส และเสถียรในรูปซิลิกาที่อุณหภูมิ 1,470 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะเริ่มหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,713 องศาเซลเซียส

เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าเฟสของคริสโตบาไลต์ ยังมีเฟสของซิลิกาอีกสองเฟสที่เกิดขึ้นภายใต้ภาวะความดันและอุณหภูมิสูงๆ คือ โคอีไซต์ (coesite) ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะความดันสูงประมาณ

2.3 กิโลปาสกาล ถึง 7.8 กิโลปาสกาล และ สทิสโฮไวท์ (stishovite) เกิดขึ้นที่ความดันสูงกว่า 7.8 GPa เฟสการเกิดเนื่องจากความร้อนโดยการเพิ่มอุณหภูมิและความดัน สามารถแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เฟสของซิลิกา ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่แตกต่างกัน

ที่มา: Bunch and Wittke (2008)

การเปลี่ยนแปลงจากรูปผลึกหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งนั้น รูปผลึกแต่ละรูปอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสเล็กน้อยภายในโครงสร้างที่เรียกว่า “Inversions” ได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นจากการหมุนตัว (rotation) ของพันธะวาเลนซ์ระหว่างอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนเท่านั้น โดยมีปริมาณของพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพียงเล็กน้อย และโครงสร้างที่สำคัญๆ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง รูปผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่าเรียกว่าแอลฟา (alpha form) ส่วนรูปที่อุณหภูมิสูงเรียกว่าเบต้า (beta form) โดยการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเฟสของซิลิกาน้อยมาก ซิลิกาในรูปที่ต่างกันแสดงสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดคือ ส่งผลให้เกิดการขยายตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันเมื่อแอลฟาควอตซ์เปลี่ยนไปเป็นเบต้าควอตซ์ เกิดการขยายตัวของปริมาตรเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของคริสโตบาไลต์นั้นทำให้เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 และการเปลี่ยนแปลงเฟสของทริไคไมท์จากแอลฟาไปเป็นเบต้า เกิดการขยายตัว

ของปริมาตรเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.3 ซึ่งไม่เหมือนกันกับการเปลี่ยนแปลงรูป (conversions) เพราะการเปลี่ยนแปลงเฟส (inversions) เกิดขึ้นเกือบทันทีทันใด ดังนั้น ณ อุณหภูมิใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างรวดเร็วเช่นนี้นำไปสู่การหดหรือขยายตัวของซิลิกา (ไพจิตร, 2541)

ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica)

ซิลิกาอสัณฐานเกิดจากการรวมตัวกันระหว่างซิลิคอนและออกซิเจนอย่างไม่เป็นระเบียบ ประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งซิลิกาอสัณฐานเป็นรูปแบบของซิลิกาชนิดไม่มีผลึก (noncrystalline silica) สามารถตรวจสอบโครงสร้างได้ด้วยวิธีรังสีเลี้ยวเบน (X-ray diffraction) ซึ่งพบความเป็นผลึกประเภทแอลฟา-ควอตซ์เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 573 องศาเซลเซียส และเบตา-ควอตซ์ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 573- 873 องศาเซลเซียส โดยซิลิกาอสัณฐานสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ วิเทรียส ซิลิกา (vitreous silica) เอ็มซิลิกา (silica M) หรือซิลิกาชนิดผลึก (crystalline silica) และพวกสุดท้ายคือซิลิกาอสัณฐานชนิดเล็ก (micro amorphous silica) ซึ่งรวมถึง โซล (sols) พงเจต (gels powder) และแก้วที่มีความพรุนสูง (porous glasses) ซึ่งทั้งหมดมีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิวสูง โดยทั่วไปพื้นที่ผิวมากกว่า 3 ตารางเมตรต่อกรัม โดยถ้าแก้วที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิไม่ถึง 873 องศาเซลเซียสจะได้ซิลิกาอสัณฐาน และซิลิกาอสัณฐานยังมีชื่อเรียกอื่นต่างกันไป เช่น ซิลิกาเจล (silica gel), ปริซิพิเตตซิลิกา (precipitated silica) พูมซิลิกา (fumed silica) และ คอลลอยด์ซิลิกา (colloidal silica) เป็นต้น

ซิลิกาเจล ประกอบด้วยอนุภาคของซิลิกาที่รวมตัวกัน (colloidal) เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ ซึ่งมีน้ำภายในโครงสร้างเป็นตัวกลางระหว่างอนุภาคเมื่อกำจัดน้ำออกจากโครงสร้าง ทำให้เกิดการหดตัวอย่างรุนแรงและเรียกซิลิกาเจล ที่ไม่มีน้ำในโครงสร้าง หรือมีชื่อเรียกว่า ซีโรเจล (xerogels)

ปริซิพิเตตซิลิกา เป็นผงที่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกาที่ตกผลึกมาจากสารละลายซิลิเกต (silicate solution) มีลักษณะเป็นผงสีขาว

พูมซิลิกา ประกอบด้วยอนุภาคเล็กละเอียดมีลักษณะใสคล้ายแก้วมีพื้นที่ผิว 20 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยารีดักชันควอตซ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยผงถ่านภายในเตาไฟฟ้า ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือซิลิคอน (silicon) และเฟอร์โรซิลิคอนอัลลอยด์ (ferrosilicon alloys)

คอลลอยด์ซิลิกา อนุภาคของซิลิกามีขนาด 3-100 นาโนเมตร กระจายลอยตัวอยู่ในน้ำมีพื้นที่ผิว 50–270 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาณซิลิการ้อยละ 15-50 โดยน้ำหนักและมีสารช่วยกระจายตัว (stabilizer, Na^+) ประมาณร้อยละ 1 โดยเป็นซิลิกาที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมีลักษณะใส ไม่มีสี (ทิวา สวัสดิ์, 2553)

อนุภาคนาโน

อนุภาคที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับนาโน (10^{-9} เมตร) เป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์กับอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา สารเคลือบผิว สารเคลือบเส้นใย อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ พลังงานสิ่งแวดล้อม หรือผสมลงในวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (Ozin *et al.*, 2009)

วัสดุนาโนในกลุ่มเมโซพอร์ (mesopore nanoparticle)

วัสดุเมโซพอร์ เป็น วัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร มีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดและการจัดเรียงโครงสร้างของรูพรุน โดยมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงถึง 700-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม วัสดุเมโซพอร์มีหลายชนิด ได้แก่ ซิลิกาเมโซพอร์จำพวก MCM-41, SBA-15, MSU, FDU, HMS และ KIT โดยซิลิกาเมโซพอร์ที่นิยมสังเคราะห์กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดคือ MCM-41 เนื่องจากการกระจายขนาดของรูพรุนแคบ และรูพรุนมีความเป็นระเบียบสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ (อรอนงค์ และคณะ, 2545)

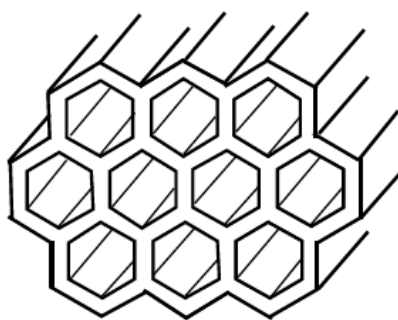
การสังเคราะห์ซิลิกาเมโซพอร์มักนิยมใช้สารกำหนดโครงสร้าง (structure-directing agents) เพื่อช่วยในการกำหนดลักษณะรูพรุน และใช้สารประกอบซิลิกา เช่น เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethyl orthosilicate, TEOS) หรือ โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate หรือ water glass) เป็นวัตถุดิบ โดยกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาเมโซพอร์ มี 3 ขั้นตอนดังนี้ (Selvam *et al.*, 2001)

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการเคมีไมเซลล์ (micelle chemistry) ใช้สารอนินทรีย์ (inorganic materials) ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นซิลิกาหรือโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethyl orthosilicate, TEOS) โดยเริ่มจากการนำสารกำหนดโครงสร้างมาละลายในตัวทำละลาย จากนั้นโมเลกุลสารกำหนดโครงสร้างในตัวทำละลายซึ่งมีสภาพเป็นขั้วเกาะกันเป็นกลุ่มใน

ตัวกลางที่เป็นน้ำหรือตัวทำละลายอื่น โดยโมเลกุลที่มีขั้วเกาะกันล้อมรอบโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งสามารถเกาะกลุ่มกันเป็นรูปทรงกลม กลมรี หรือแท่ง ขึ้นกับความเข้มข้นของสารกำหนดโครงสร้างในตัวทำละลายนั่นๆ

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการโซล-เจล (sol-gel process) มีการใช้สารกำหนดโครงสร้าง เช่น ซิลิโคนไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (cetyltrimethyl ammonium bromine, CTAB) โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecylsulfonate, SDS) และพลูโรนิค พี123 (pluronic, P123) เป็นขั้นตอนที่มีการเติมสารอินทรีย์ซึ่งในที่นี้คือ ซิลิกา เพื่อกำหนดให้เป็นโครงสร้างหลักเพื่อให้ไปเกาะกับสารกำหนดโครงสร้าง ขั้นตอนนี้เรียกว่า กระบวนการโซล-เจล ในขั้นตอนของกระบวนการโซล-เจล เริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ได้อนุภาคของแข็ง ขนาดเล็กที่เรียกว่า โซล (sol) อนุภาคโซลเหล่านี้เกิดการรวมตัวกันกลายเป็นโครงข่าย ผ่านกลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบ คอนเดนเซชัน (condensation polymerization) เกิดเป็นเจล (gel)

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการอบแห้งและการเผาที่อุณหภูมิสูง (drying and calcination) โดยมีการใช้ตัวทำละลาย เช่น เอทานอล และน้ำ มาล้างแล้วนำไปอบแห้งและเผาให้เกิดการผืนึกตัว (calcined) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศของออกซิเจน หรืออากาศ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป เพื่อกำจัดสิ่งเจือปน เช่น สารอินทรีย์ต่างๆ เมื่อสารกำหนดโครงสร้างสลายตัวออกไป เหลือเพียงโครงสร้างของสารที่เราต้องการที่มีรูพรุนขนาดนาโนดังภาพ ที่ 5

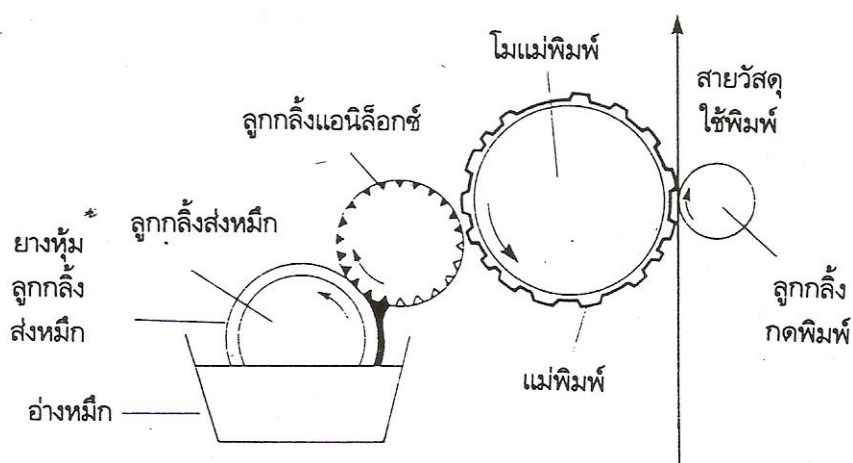


ภาพที่ 5 รูปแบบโครงสร้างและรูพรุนของวัสดุซิลิกาเมโซพอร์ MCM-41

ที่มา: Beck *et al.* (1992)

การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี

เฟล็กโซกราฟีเป็นการพิมพ์ที่นิยมพิมพ์ลงบนกระดาษกราฟมากที่สุด โดยจัดเป็นการพิมพ์แบบทางตรงจากแม่พิมพ์สู่วัสดุพิมพ์ ใช้หลักการแม่พิมพ์พื้นฐาน บริเวณภาพบนแม่พิมพ์สูงกว่าบริเวณที่ไม่ใช่ภาพ ซึ่งแม่พิมพ์ทำจากยางหรือพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นสูง (อรัญ, 2545) มีการถ่ายโอนหมึกเหลวจากรางหมึก (fountain pan) ผ่านระบบควบคุมปริมาณหมึก ซึ่งมีใบมีดปาดหมึก (doctor blade) ทำหน้าที่ปาดหมึกส่วนเกินออกจากลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์ (anilox roll) ส่งต่อไปยังแม่พิมพ์และวัสดุพิมพ์ตามลำดับ (ดังภาพที่ 6) โดยการถ่ายโอนหมึกพิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์นั้นอาศัยลูกกลิ้งกดพิมพ์ เนื่องจากวัสดุพิมพ์แต่ละชนิดมีความหนาแตกต่างกัน ดังนั้น ลูกกลิ้งกดพิมพ์นี้จึงต้องมีการตั้งแรงกดพิมพ์ระหว่างแม่พิมพ์และวัสดุพิมพ์ให้เหมาะสมตามความหนาของวัสดุที่ใช้พิมพ์เพื่อให้ได้ภาพออกมามีความคมชัดและสวยงาม



ภาพที่ 6 หลักการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี

ที่มา: อนุตรา และ สมชาย (2539)

การเคลือบกระดาษ

มีวัตถุประสงค์เพื่อให้กระดาษที่นำมาพิมพ์มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการพิมพ์มากขึ้น ช่วยให้การผลิตสิ่งพิมพ์มีความคมชัดเทียบเท่าต้นฉบับและสามารถพิมพ์ได้อย่างต่อเนื่อง ภาพพิมพ์บนสิ่งพิมพ์ดีเท่ากับต้นฉบับหรือไม่ขึ้นกับสมบัติที่เห็นโดยรวมของกระดาษ เช่น สี ความมันวาว ความเปรียบต่าง (contrast) ความง่ายในการอ่านและความสม่ำเสมอของหมึกพิมพ์ สมบัติเหล่านี้สามารถประเมินผลได้จากการวัดค่าต่างๆ เช่น น้ำหนักต่อเนื้อของสี ความดำในการพิมพ์ ความมันวาวของสิ่งพิมพ์ ความเรียบของผิวหมึก ความกลมกลืน และความสามารถในการพิมพ์ให้เหมือนต้นฉบับ (เครือวัลย์, 2542)

น้ำยาเคลือบกระดาษ

การเตรียมน้ำยาเคลือบกระดาษจำเป็นต้องเตรียมส่วนผสมต่างๆ ให้เหมาะสมกับสมบัติกระดาษที่นำไปพิมพ์และระบบการพิมพ์ โดยทำให้กระดาษเคลือบมีสมบัติต่างกันไปขึ้นกับความต้องการของผู้ใช้ โดยองค์ประกอบของน้ำยาเคลือบกระดาษมีองค์ประกอบ 4 ส่วน ได้แก่ ผงสีขาว สารยึด สารเติมแต่ง และตัวทำละลายประเภทน้ำ

ผงสีขาวในน้ำยาเคลือบช่วยให้กระดาษมีสีขาวขึ้น เรียบขึ้น พร้อมทั้งมีความสามารถในการรับหมึกที่ดี ร่วมกับการขัดผิวหน้าของกระดาษเป็นผลให้ได้สิ่งพิมพ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น ผงสีขาวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเคลือบ ได้แก่ ดินขาว แคลเซียมคาร์บอเนต ไทเทเนียมไดออกไซด์ อะลูมิเนียมไดออกไซด์ และผงซิลิกา

สารยึดที่อยู่ในน้ำยาเคลือบช่วยยึดผงสีขาวให้ติดกับกระดาษรองรับได้ดีขึ้น สามารถแบ่งได้เป็น สารยึดธรรมชาติ และสารยึดสังเคราะห์

แป้งเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นสารยึดธรรมชาติเนื่องจากมีสมบัติที่มีแรงยึดติดสูง ความหนืดต่ำ มีสมบัติการไหลที่ดี มีความหนืดเพิ่มขึ้นน้อยเมื่อมีอุณหภูมิต่ำ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเมื่อเวลาเปลี่ยนไป มีความสามารถในการอุ้มน้ำและสมบัติทางการพิมพ์ที่ดี สมบัติต่างๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง การดัดแปรและระดับของการดัดแปร โดยปกติแป้งเป็นสารที่ประกอบด้วยโพลีเมอร์ธรรมชาติ 2 ชนิด คือ อะไมโลส และอะไมโลเพคติน โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินต่างกัน

ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากจึงที่ละลายน้ำได้ดี แต่โมเลกุลอะไมโลสเป็นแบบเส้นตรง จึงมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นลงและเปลี่ยนสภาพเป็นเจลถาวรเกิดการยึดติดได้ ส่วนโมเลกุลอะไมโลเพกตินมีความหนืดที่ต่ำกว่า และมีแนวโน้มที่เป็นไปได้้น้อยมากที่เกิดเป็นเจลที่ถาวร

การนำแป้งมาใช้งานต้องนำมาต้มเพื่อให้แป้งมีการกระจายตัวที่ดี โดยปกติแป้งมีสมบัติละลายน้ำได้ดี คือชอบน้ำ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับสารป้องกันการละลายน้ำด้วย โดยเฉพาะกระดาษเคลือบที่นำไปพิมพ์ด้วยระบบการพิมพ์ออฟเซต แป้งคัดแปรที่ใช้ในน้ำยาเคลือบมีความหนืดที่แตกต่างกัน แป้งที่มีความหนืดต่ำโดยเฉพาะแป้งเอทีเลตสามารถใช้ปริมาณมากกับน้ำยาเคลือบที่มีปริมาณเนื้อสารมากได้ ขณะเดียวกันแป้งที่มีความหนืดสูงใช้กับเครื่องฉาบผิว (size press) ในกรณีที่ต้องการให้กระดาษนั้นมีความต้านทานการซึมน้ำและผิวเรียบขึ้น

สารยึดสังเคราะห์เป็นสารที่ได้จากสารสังเคราะห์นิยมใช้ในรูปลาเท็กซ์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-0.5 ไมครอน และใช้ผสมในน้ำยาเคลือบในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อเนื้อสารทั้งหมด ลาเท็กซ์มีอิทธิพลต่อสมบัติที่เกี่ยวกับการพิมพ์ของกระดาษเคลือบ ต้นทุนการผลิต และความสามารถในการผลิตของเครื่องเคลือบกระดาษ โดยลาเท็กซ์สำหรับอุตสาหกรรมกระดาษเคลือบสามารถแบ่งได้เป็น ลาเท็กซ์สไตรีนบิวตาไดอิน พอลิไวนิลอะซิเตต ลาเท็กซ์ไวนิลอะคริลิก และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

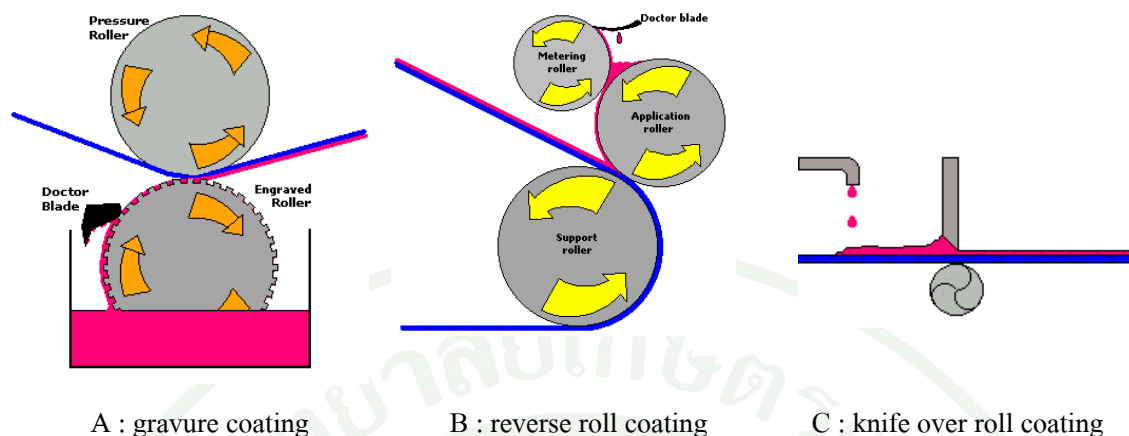
ลาเท็กซ์สไตรีนบิวตาไดอิน เป็นสารยึดสังเคราะห์ประเภทลาเท็กซ์ที่มีแรงยึดติดที่แข็งแรงมาก นิยมใช้ผลิตเป็นสารเคลือบมากที่สุด สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนกับบิวตาไดอินเกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมกระจายตัวในน้ำร่วมกับสารลดแรงตึงผิว ลาเท็กซ์ชนิดนี้ให้ชั้นฟิล์มที่แข็งหรือนิ่มขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิที่ลาเท็กซ์เริ่มแข็งตัวกลายเป็นฟิล์มแห้ง (glass transition temperature, T_g) ปกติอัตราส่วนของสไตรีนที่น้อย คือระหว่างร้อยละ 50-55 ให้ค่า T_g ต่ำ กล่าวคือฟิล์มนิ่ม หักงอ อ่อนตัวได้ดี และมีความเหนียวหนืด โดยทั่วไปลาเท็กซ์ชนิดนี้มีสมบัติที่ดีในด้านความมันวาว การหักงออ่อนตัวง่าย ความเหนียวหนืดต่ำ และมีแรงยึดติดกับสารอื่นดี น้ำยาเคลือบกระดาษที่ใช้ลาเท็กซ์ชนิดนี้มีสีเหลืองเมื่อถูกแสงแดด และลาเท็กซ์ที่ใช้มากเป็นอันดับรองลงมาคือ ลาเท็กซ์อะคริลิก ให้สมบัติด้านการหักงออ่อนตัวดี แรงยึดติดกับสารอื่นดีคล้ายกับลาเท็กซ์สไตรีนบิวตาไดอิน แต่มีราคาแพง ลาเท็กซ์อะคริลิกมีกลิ่นจากพอลิเมอร์ร่วนน้อย ความทนต่อแสงแดดดีมาก ปกติใช้กับกระดาษเคลือบที่ต้องการคุณภาพสูง (พรชัย, 2547)

สารเติมแต่งที่ใช้ในน้ำยาเคลือบส่วนมากเป็นสารเคมีที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีหน้าที่เฉพาะ สารที่ช่วยทำให้กระจาย สารช่วยอุ้มน้ำหรือสารปรับความหนืด สารหล่อลื่น สารป้องกันการละลายน้ำ หรือสารช่วยเกิดพันธะระหว่างโซ่ สารกันบูด สารปรับความเป็นกรด-ด่าง สารต้านทานการซึมน้ำ สารเพิ่มความขาวสว่าง สีข้อม และสารควบคุมการเกิดฟอง ส่วนสารอื่นที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วต้องใช้น้ำยาเคลือบน้อยมาก เช่น สารช่วยจับตัวที่มีประจุบวก สารต้านการออกซิไดส์ พอลิเมอร์จับประจุ และพลาสติกไซเซอร์ (อรอุษา, 2546)

น้ำเป็นตัวกลางที่ใช้เป็นสารกระจายตัวของสารผสมต่างๆ ของน้ำยาเคลือบให้เกิดการแขวนลอย ส่วนมากนิยมใช้น้ำบาดาลหรือน้ำประปาที่มีความกระด้างของน้ำไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำมาทำให้เป็นน้ำบริสุทธิ์ด้วยการกลั่น ให้ได้เป็นน้ำกลั่น (distillated water) ที่มีความเป็นกลาง ที่มีค่าความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 7 (พรชัย, 2547)

กระบวนการเคลือบ

การเคลือบผิววัสดุต่างๆ สามารถทำได้โดยการทา (spreading process) และการพ่น (spraying process) สำหรับวิธีการทายังแบ่งได้เป็นการใช้แปรงทา การใช้ลูกกลิ้ง การจุ่ม เป็นต้น ส่วนวิธีการพ่นก็ยังรวมไปถึงการใช้ผงสีและชุบด้วยไฟฟ้า (electro deposition) ด้วย (อรอุษา, 2544) แต่สำหรับทางด้านการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์มีเทคนิคการเคลือบผิวที่สามารถทำได้หลากหลายวิธี โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยเรื่องของค่าความหนืดและวิทยากระแส ความหนาของชั้นฟิล์มรูปร่างของวัสดุที่ใช้เคลือบและความสามารถในการนำไปใช้ได้หลากหลายโดยกระบวนการเคลือบผิวสามารถแบ่งตามระบบการเคลือบดังภาพที่ 7 (นุศตรรา, 2542)



ภาพที่ 7 การเคลือบผิวกระดาษ

ที่มา: Technical Coating International (2012)

การเคลือบด้วยระบบกราเวียร์ (gravure coating) (ภาพที่ 7A) โดยใช้ลูกกลิ้งแกะสลัก (engraved roller) หมุนอยู่ในอ่างสารเคลือบ ทำให้สารเคลือบเกาะติดบนหลุมของลูกกลิ้ง สารเคลือบส่วนเกินถูกปาดออกโดยมีดปาด (doctor blade) เมื่อวัสดุวิ่งผ่านระหว่างลูกกลิ้งแกะสลักและลูกกลิ้งกด (pressure roller) สารเคลือบไปติดบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ นิยมใช้เคลือบหมึกเหลว โดยเป็นวิธีการเคลือบด้วยเครื่องพิมพ์ระบบกราเวียร์สามารถเคลือบได้ที่มีความหนาของสารเคลือบไม่เกิน 5-7 ไมโครเมตร ประโยชน์หลักคือสามารถเพิ่มน้ำหนักสารเคลือบ โดยการปรับตั้งใบปาดหมึกหรือแรงดึงของกระดาษม้วนและความเร็วของกระดาษม้วนดังภาพที่ 7A

การเคลือบด้วยระบบลูกกลิ้ง (reverse roll coating) ดังภาพที่ 7B เป็นการให้ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งกำหนดความหนาของสารเคลือบ (upper metering roller) และลูกกลิ้งเคลือบผิว (application roller) เป็นตัวปล่อยสารเคลือบมาเคลือบผิววัสดุที่วิ่งผ่านลูกกลิ้งกด (support roller) ซึ่งเป็นการเคลือบที่เหมาะสมกับสารเคลือบที่มีความหนืดสูงมากๆ เช่นสารเคลือบที่มีความหนืดที่สูงมากกว่า 10,000-20,000 เซนติพอยส์ สามารถใช้กับงานคุณภาพสูง เช่น รูปลอก หรืองานกราฟิก โดยน้ำหนักสารเคลือบสามารถควบคุมได้ด้วยความเร็วของโมสั่มพันซ์กับความเร็วของโมถ่ายทอดด้านหลัง โดยถ้าความเร็วสูงขึ้นน้ำหนักสารเคลือบเพิ่มมากขึ้น

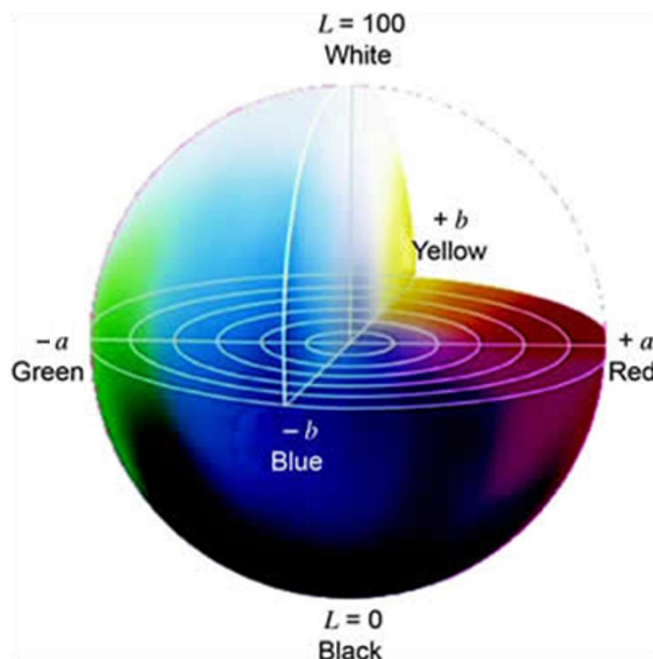
การเคลือบด้วยระบบใบมีด (knife over roll coating) ดังภาพที่ 7C วิธีนี้สารที่นำมาเคลือบสัมผัสกับวัสดุโดยตรง ระยะห่างระหว่างใบมีดปาดและวัสดุเป็นส่วนที่ควบคุมความหนาของสารเคลือบ เป็นการเคลือบที่ใช้ใบมีดวางอยู่เหนือโมซึ่งใช้กับสารยัดที่มี ความหนืดสูงหรือสารเคลือบที่มีน้ำหนักสารเคลือบสูง เช่นสารเคลือบที่มีความหนืดประมาณ 10,000-100,000 เซนติพอยส์ และสามารถเคลือบให้ความหนาประมาณ 5-10 ไมโครเมตร

การประเมินคุณภาพการพิมพ์

การที่มนุษย์มองเห็นสีต่างๆ ได้ เกิดจากการรับรู้แสงซึ่งเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง โดยเป็นการแผ่รังสีในรูปแบบสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) โดยตาของมนุษย์สามารถมองเห็นแสงในช่วงคลื่นระหว่าง 390-720 นาโนเมตร ส่วนแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 390 นาโนเมตรและแสงอินฟราเรด (infrared) เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสูงกว่า 720 นาโนเมตร มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ และการที่เรามองเห็นสีต่าง ๆ เช่น ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง ภายใตแสงขาวได้เนื่องจากแสงไปกระทบกับวัตถุ และวัตถุนั้นๆ ดูดกลืนและสะท้อนพลังงานแสงออกมาในช่วงพลังงานตามความยาวคลื่น

แผนภูมิสีซีแอลบี (CIE L*a*b*)

ตามนุษย์เมื่อมองเห็นสีเรียกเป็นชื่อสีต่างๆ เช่นสีแดงเลือดนก สีฟ้าน้ำทะเล แต่เมื่อมาสื่อสารกันแล้ว พบว่าอาจไม่ได้เป็นสีเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเนื่องจากความชอบส่วนบุคคลและความทรงจำของสีที่เคยเห็นมา ดังนั้นองค์กรระหว่างชาติได้กำหนดมาตรฐานสี The International Commission on Illumination หรือ ซีไอไอ (Commission International Del'Eclairage, CIE) และใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อระบุพิกัดสีที่เป็นมาตรฐานและมีประสิทธิภาพต่อการสื่อสารและเข้าใจที่ตรงกัน แผนภูมิสีซีไอไอ แอลสตาร์ เอสตาร์ บีสตาร์ 1976 (1976 CIE L*a*b color space) หรือแผนภูมิสีซีแอลบี (CIElab color space) เป็นแผนภูมิที่สร้างขึ้นตามทฤษฎีการมองเห็นสีไตรโครมาติก แผนภูมิซีแอลบีนี้เป็นภูมิสีสามมิติ ประกอบด้วยแกน 3 แกน คือ แกน L* แกน a* แกน b* ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนภูมิสี CIE $L^*a^*b^*$

ที่มา: อรัญ (2546)

แกน L^* เป็นแกนที่ใช้แสดงมิติความสว่างสีสัมพัทธ์ของสามสี มีมาตราอยู่ระหว่าง 0-100 ส่วนแกน a^* เป็นแกนที่มีมาตราอยู่ระหว่าง +128 ถึง -128 ใช้แสดงความเป็นสีแดงและความเป็นสีเขียวของสีโดยส่วนของแกนที่เป็นเครื่องหมายบวก ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีแดง ยิ่งค่า a^* มีค่าเป็นบวกมากเท่าไร สีก็มีความเป็นสีแดงเท่านั้น และส่วนของแกนที่เป็นเครื่องหมายลบ ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีเขียว ยิ่งค่า a^* เป็นลบมากเท่าไร สีก็มีความเป็นสีเขียวมากขึ้น และแกน b^* เป็นแกนที่มีมาตราอยู่ระหว่าง +128 ถึง -128 เป็นแกนที่ใช้แสดงความเป็นสีเหลืองและความเป็นสีน้ำเงินของสี โดยส่วนของแกนที่เป็นเครื่องหมายบวก ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีเหลือง ยิ่งค่า b^* มีค่าเป็นบวกเท่าไร สีก็มีความเป็นสีเหลืองมากขึ้นเท่านั้นและส่วนของแกนที่เป็นเครื่องหมายลบ ใช้เพื่อแสดงความเป็นสีน้ำเงิน ยิ่งค่า b^* มีค่าเป็นลบมากเท่าใด สีก็มีความเป็นสีน้ำเงินมากขึ้น แต่สีเอกรงค์ทั้งหลายเป็นสีที่ค่า a^* และ b^* เท่ากับ 0 แต่มีค่า L^* แตกต่างกัน โดยสีที่ขาวที่สุดมีค่า L^* เท่ากับ 100 และสีที่ดำที่สุดมีค่า L^* เท่ากับ 0 ส่วนสีเทาเป็นสีที่มีค่า L^* อยู่ระหว่างค่า L^* สีขาวและ L^* สีดำ

ค่าความแตกต่างสี (color difference, ΔE)

การใช้งานค่าสีในระบบการวัดสีต่างๆ ในลักษณะหนึ่งนอกเหนือไปจากการใช้เพื่อกำหนดสีก็คือ การหาค่าความแตกต่างระหว่างสีสองสีใดๆ เพื่อนำค่าความแตกต่างในการคำนวณได้ไปใช้เป็นเกณฑ์ในการผลิตสี โดยในการผลิตสีที่ต้องการผลิตสีให้ใกล้เคียงกับสีมาตรฐาน ก็สามารถนำค่าสี CIE ของสีมาตรฐานและของสีที่ผลิตได้มาเปรียบเทียบ และคำนวณความแตกต่างระหว่างสีที่ผลิตได้กับสีมาตรฐาน ตามสมการที่ 1 (ISO 12647-1, ASTM D2244-11)

$$\Delta E_{ab}^* = [(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2]^{1/2} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

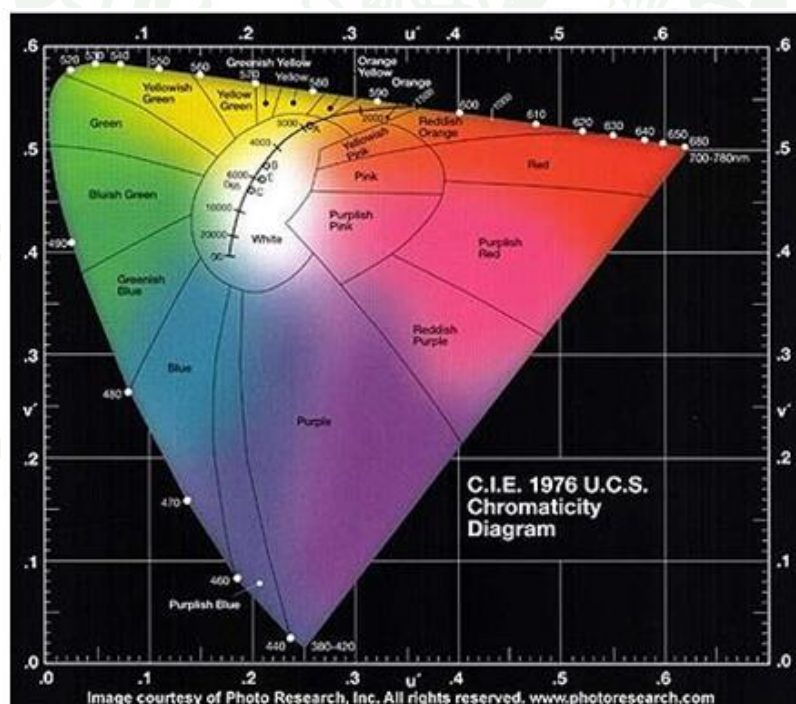
เมื่อ	ΔE_{ab}^*	คือ ความแตกต่างสีรวมระหว่างมาตรฐานและงานพิมพ์
	$L_1^* \ a_1^* \ b_1^*$	คือ ค่าสีพิกัดสีเฉลี่ยของมาตรฐานหรืองานที่อ้างอิง
	$L_2^* \ a_2^* \ b_2^*$	คือ ค่าสีพิกัดสีเฉลี่ยของงานพิมพ์หรืองานที่ต้องการวัดความแตกต่าง

ในการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์โดยทั่วไปใช้ค่าความแตกต่างสีรวมเป็นหลัก ยิ่งความแตกต่างสีรวมระหว่างสีบนแผ่นพิมพ์มาตรฐานกับสีเดียวกันบนแผ่นพิมพ์จริงมีค่าน้อยมากเท่าใด ก็มีสีเหมือนมากเท่านั้น ในการกำหนดตัวเลขค่าความแตกต่างสีรวมที่ใช้เป็นค่ามาตรฐานในการควบคุมคุณภาพงานพิมพ์ ว่าควรมีค่าเป็นเท่าไรนั้นขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของงานพิมพ์ที่ต้องการเป็นสำคัญ ถ้าเป็นงานพิมพ์ที่ต้องการคุณภาพสูงก็ต้องกำหนดให้ตัวเลขค่าความแตกต่างสีรวม เป็นตัวเลขน้อยๆ เช่น 2 หรือ 3 เป็นต้น ส่วนงานพิมพ์ที่ไม่ต้องการคุณภาพมากนักก็สามารถกำหนดให้ตัวเลขค่าความแตกต่างสีรวมมีค่าสูงขึ้นได้

ขอบเขตของสี (color gamut)

ขอบเขตสี หมายถึง ความสามารถของแม่สีที่ผลิตสีได้จำนวนมาก (color rendering) และมีความบริสุทธิ์ (purity) สูงสุด ทั้งนี้ต้องสัมพันธ์กับความไวแสงของเซลล์รับแสงในตามนุษย์ด้วย ตามนุษย์มีเซลล์รับแสงสีที่เรียกว่า cone cell อยู่ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มเซลล์ที่ไวต่อแสงสีน้ำเงิน (blue-cone cell) กลุ่มเซลล์ที่ไวต่อแสงสีเขียว (green-cone cell) และกลุ่มที่เซลล์ที่ไวต่อแสงสีแดง (red-cone cell) พบว่าระบบเกิดสีแบบบวกหรือการผสมสีของอุปกรณ์กำเนิดแสงสี เช่นจอภาพ ให้ขอบเขตของสีมากที่สุด แต่สำหรับการเกิดสีระบบลบหรือการผสมสีทางการพิมพ์นั้นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดสภาพ

ของแสงที่เรามองภาพด้วย สิ่งที่เราหลีกเลี่ยงไม่ได้คือ สีอาจเปลี่ยนแปลงได้ถ้ามองสีนั้นภายใต้แสงไฟที่แตกต่างกัน เช่น ไฟทังสเตน หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ หรือแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ สมบัติของแม่สีระบบสีในอุดมคติต้องมีการดูคลื่นและสะท้อนแสงที่เหมาะสมคือ หมึกพิมพ์สีเหลืองควรมีสมบัติดูดกลืนแสงสีน้ำเงินเท่านั้นและสะท้อนแสงสีเขียวกับแสงสีแดงให้เข้าตามนุษย์มองเห็นเป็นสีเหลืองได้ และเช่นเดียวกัน หมึกพิมพ์สีแมกเจนต้า ควรมีสมบัติดูดกลืนแสงสีเขียวและสะท้อนแสงสีน้ำเงินกับแสงสีแดง ส่วนหมึกไซแอนสามารถดูดกลืนแสงสีแดงและสะท้อนแสงสีน้ำเงินกับแสงสีเขียว โดยองค์กรระหว่างชาติสำหรับกำหนดมาตรฐานสี (CIE) ได้กำหนดไดอะแกรมขอบเขตของธรรมชาติสี (chromaticity diagram) มีรูปร่างคล้ายเกือกม้ามีสเกลรอบๆ เป็นค่าความยาวคลื่นของแสง เพื่อกำหนดคุณลักษณะของสีที่เกิดขึ้น (dominant wavelength) และเส้นตรงจากสเกลนี้เข้าหาบริเวณศูนย์กลาง ซึ่งเป็นตำแหน่งของกำเนิดแสงที่เรามองภาพ สามารถใช้บอกความบริสุทธิ์ (purity) ของสีที่เกิดขึ้น สีใดที่เกิดขึ้นใกล้กับเส้นขอบมาก สีนั้นมีความบริสุทธิ์มาก ซึ่งขอบเขตของสี (color gamut) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แผนภูมิขอบเขตสี (CIE color gamut 1976)

ที่มา: อรัญ (2546)

มาตรฐานการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

TIS.2260-6 หรือ ISO 12647-6 เป็นเกณฑ์ข้อกำหนดของมาตรฐานการพิมพ์สากล สำหรับงานพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบนวัสดุกระดาษ ฟอยล์และพลาสติกอ่อนตัว โดยใช้พารามิเตอร์การพิมพ์ เช่นเดียวกับมาตรฐานการพิมพ์ระบบอื่นๆ เช่น ค่าสี ค่าพื้นที่ของสีที่พิมพ์ CMYK และค่าการเพิ่มขึ้นของเม็ดสกรีน (TVI) นั้น โดยขึ้นอยู่กับชนิดของลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์ประเภทของหมึกพิมพ์ และวิธีในการวัดค่าสีงานพิมพ์ใช้แสงยูวีเป็นตัววัดค่าสี โดยต้องรองพื้นหลังงานพิมพ์ด้วยวัสดุสีขาวที่มีค่าฟักดสี $L^* > 92$ (ISO 13655)

การทำแม่พิมพ์ตามมาตรฐานใช้ควบคุมคุณภาพงานพิมพ์ที่มีรายละเอียดตั้งแต่ 18-40 เส้นต่อตารางเซนติเมตร กำหนดมุมสกรีนเช่นเดียวกับการพิมพ์ระบบออฟเซต มีค่ามุมของสี ไซ-แอน มาเจนต้าและดำ ห่างกัน 30 องศา และสีเหลืองห่างจากสีมาเจนต้าหรือไซแอน 15 องศา การจ่ายหมึกให้แม่พิมพ์ต้องใช้ลูกกลิ้งแอนนิลออกซ์เซรามิกส์ที่มีบ่อหมึกทำมุม 45 หรือ 60 องศา เม็ดสกรีนงานพิมพ์ควรใช้รูปร่างวงกลม และค่าผลรวมหมึกพิมพ์ทั้งหมด 4 สีรวมกัน (CMYK) ในบริเวณที่พิมพ์พื้นที่ (shadow tone) ไม่เกินร้อยละ 320

ตารางที่ 3 ค่าฟักดสีบนพื้นที่ของงานเฟล็กโซกราฟีและค่าความแตกต่างสีที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ISO 12647-6

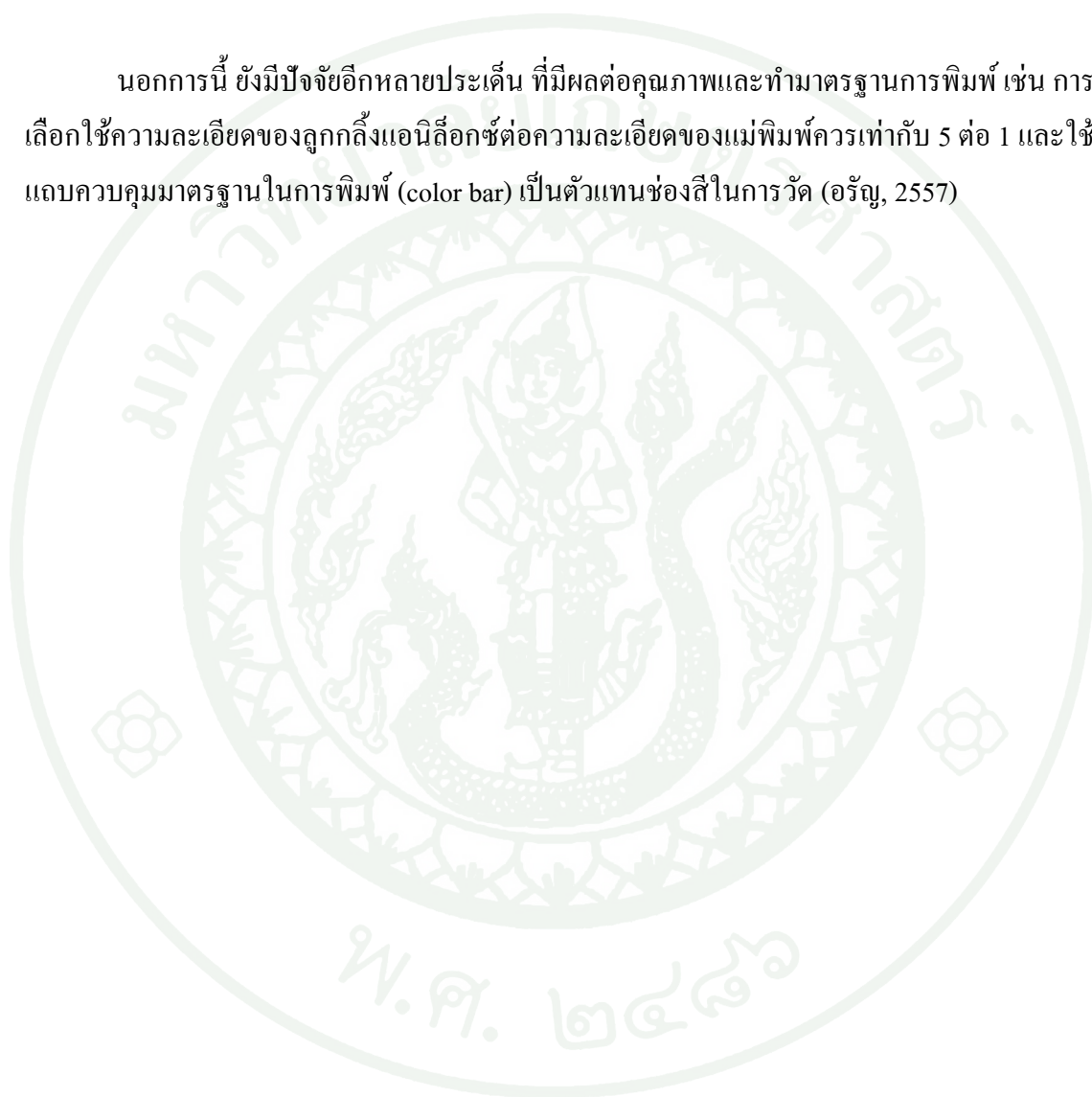
สี (color)	ค่าฟักดสี CIE			การยอมรับความแตกต่างสี (variation tolerance, ΔE)**
	L^*	a^*	b^*	
C	58	-25	-43	≤ 5
M	54	58	-2	≤ 5
Y	86	-4	75	≤ 5
K	31	1	1	≤ 6

หมายเหตุ ** ΔE_{2000}

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2549)

มาตรฐานการพิมพ์ได้กำหนดค่าสีของผิววัสดุใช้พิมพ์ให้ค่าพิกัดสี $L^* > 88$, $-3 < a^* < +3$ และ $-5 < b^* < +5$ และมาตรฐานได้กำหนดขอบเขตสีงานพิมพ์ทั้งหมดต้องมีปริมาณงานมากกว่าร้อยละ 68 มีค่าการยอมรับความแตกต่างสีระหว่างงานพิมพ์กับค่าสีอ้างอิง (OK sheet) สี Cyan, Magenta, Yellow ไม่เกิน 5 และสี Black ไม่เกิน 6 (ดังตารางที่ 3)

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอีกหลายประเด็น ที่มีผลต่อคุณภาพและทำมาตรฐานการพิมพ์ เช่น การเลือกใช้ความละเอียดของลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์ต่อความละเอียดของแม่พิมพ์ควรเท่ากับ 5 ต่อ 1 และใช้แถบควบคุมมาตรฐานในการพิมพ์ (color bar) เป็นตัวแทนช่องสีในการวัด (อรัญ, 2557)



งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yalcin and Sevinc (2001) ทดลองแช่แกลบข้าวด้วยสารละลายสามชนิดได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และโซดาไฟ (NaOH) และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติ พบว่า แกลบที่เตรียมจากการแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก มีความสามารถในการสกัดซิลิกามากที่สุด เนื่องจากได้ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ซิลิกามีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.66 ขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.030-100 มิลลิเมตร พื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคมีขนาด 321 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุนมีขนาด 0.0045 มิลลิเมตร และการกระจายขนาดของรูพรุนอยู่ที่ 4.7297 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

Della *et al.* (2002) ศึกษาการเตรียมซิลิกาจากแกลบข้าวที่เผาในบรรยากาศปกติ โดยนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีก่อนเผาซ้ำด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) พบว่า มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 72.10 หลังจากนั้นได้นำแกลบข้าวไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า ในแกลบข้าวมีซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 94.95 และซิลิกาที่ได้มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน และเมื่อนำไปบดได้ซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาคเพิ่มขึ้นจาก 54 เป็น 81 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การสังเคราะห์ซิลิกาได้ปริมาณและความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น สามารถกำจัดสิ่งที่ไม่ใช่ซิลิกาออกไปได้ และอนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์ได้เมื่อนำไปบดได้จำนวนรูพรุนเพิ่มขึ้น

สุดาพร (2550) ศึกษาการผลิตซิลิกาจากแกลบเพื่อใช้ในเทคนิคโครมาโทกราฟีพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์รีฟลักซ์แกลบเป็นเวลา 15 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้เตรียมซิลิกา ได้ปริมาณร้อยละของซิลิกาสูงที่สุดคือ 98.49 และลักษณะของซิลิกาที่ได้เป็นสีขาวเมื่อนำวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ซิลิการ้อยละ (SiO_2) 99.8685

Panpa and Jinawath (2008) สังเคราะห์วัสดุซีโอไลต์ (ZSM-5 zeolite) ด้วยซิลิกาจากแกลบข้าว และตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดฟูเรียรทรานส์ฟอร์ม (FT-IR) พบว่าฟingerprinting การดูดกลืนที่ 798 cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับฟingerprinting ของหมู่ฟังก์ชัน Si-OH ที่แสดงฟingerprinting การดูดกลืนที่ 805 cm^{-1} และฟingerprinting การดูดกลืนที่ $1,107 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นฟingerprinting ของหมู่ฟังก์ชัน Si-O แบบสั้น

ที่แสดงฟีกแถบแถบดูดกลืนที่ $1,100 \text{ เซนติเมตร}^{-1}$ โดยซีโอไลต์ (ZSM-5 zeolite) ที่สังเคราะห์ได้แสดงฟีกตรงกันทุกตัวอย่างการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าทุกตัวอย่างประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา

Sarangi *et al.* (2011) ศึกษาเรื่องอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลึกนาโนซิลิกาและการบอนด์คอมโพสิตที่สกัดจากเถาวัลย์กล้วย พบว่าอุณหภูมิและการล้างเถาวัลย์สามารถกำจัดธาตุอื่นที่ไม่ใช่ซิลิกาออกไป อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากกว่า $1,100$ องศาเซลเซียสมีผลต่อโครงสร้างผลึกของซิลิกา ทำให้ซิลิกาออสติฐานเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากแอลฟา-ควอตซ์ (α -quartz) ที่มี $2\theta = 22$ ไปเป็นเบตาคริสโตบาไลต์ (β -cristobalite) $2\theta = 21$ แต่ในโครงสร้างผลึกอื่นของซิลิกาที่ทนความร้อนสูงไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกหรือเปลี่ยนแปลงเฟส

Tang *et al.* (2012) ศึกษาการคายน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาเมทานอลเปรียบเทียบกับวัสดุรูพรุนแบบ ZSM-5/MCM-41 ในระดับโมเลกุล โดยใช้เทคนิคถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อวิเคราะห์สภาพของวัสดุ ZSM-5/MCM-41 ที่สังเคราะห์ใหม่กับวัสดุ ZSM-5/MCM-41 ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่าง (alkali-treated) โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น $0.5, 1.5, 2.5, 3.0$ และ 3.5 โมลาร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นส่งผลต่อตัววัสดุรูพรุน ZSM-5/MCM-41 โดยทำให้อนุภาคยิ่งแตกตัวแยกออกจากกันและเสถียรภาพไปจากเดิม

อรอนงค์ และคณะ (2545) ศึกษาวัสดุเมโซพอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ซึ่งมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดและการจัดเรียงโครงสร้างของรูพรุน โดยขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง $2-50$ นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงถึง $700-1,500$ ตารางเมตรต่อกรัม วัสดุเมโซพอร์มีหลายชนิด แต่การศึกษานี้ใช้วัสดุเมโซพอร์ MCM-41 มาวิเคราะห์เนื่องจากมีการกระจายขนาดของรูพรุนแคบ และรูพรุนมีความเป็นระเบียบสูง จึงนิยมนำไปเป็นวัสดุดูดซับ

Tadjarodi *et al.* (2012) เตรียมซิลิกาเจลที่มีรูพรุนแบบนาโนจากเถาวัลย์ด้วยวิธีการเตรียมแบบโซล-เจลและทำแห้งภายใต้ความกดอากาศ และตรวจสอบลักษณะของซิลิกาที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคต่างๆ จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) พบว่าซิลิกานาโนที่เตรียมได้ด้วยวิธีโซล-เจลมีความกว้างของฟีกอยู่ในช่วง $2\theta = 20-30$ และมียอด

ของฟีกอยู่ที่ 22 ซึ่งเป็นลักษณะยอดฟีกของซิลิกาอสัณฐาน จึงสรุปได้ว่าวิธีการเตรียมแบบโซล-เจล และทำแห้งภายใต้ความกดอากาศ สามารถสังเคราะห์ได้ซิลิกาที่มีรูพรุนภายในจำนวนมาก

Cheng *et al.* (2008) ได้สังเคราะห์วัสดุรูพรุน MCM-22 ซีโอไลต์โดยใช้ซิลิกาจากแกลบข้าว โดยวิธี Hydro-thermal และเผาภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุ MCM-22 ที่สังเคราะห์ได้มีรูปแบบฟีกของ XRD ที่สอดคล้องกับวัสดุ MCM-22 เพราะเป็นวัสดุ non-crystalline โดยแสดงฟีก ที่ $2\theta = 22.5$ ซึ่งบ่งบอกว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้เป็นซิลิกาอสัณฐาน นอกจากนี้ยังแสดงฟีกที่ $2\theta = 6.6, 8.0, 9.7, 13.5$ และ 26.0 แสดงให้เห็นการก่อตัวสมบรูณ์ของสะพานออกซิเจนบนชั้น interlayer โดยฟีกกราฟที่ได้สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่วิเคราะห์ได้จาก MCM-22 แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้เป็นวัสดุ MCM-22 ซีโอไลต์ที่ดี

Chapman (1997) ศึกษาสมบัติของซิลิกาอสัณฐานสังเคราะห์ พบว่ามีระบบรูพรุน 2 แบบคือ รูพรุนระหว่างอนุภาค และรูพรุนภายในอนุภาค ซึ่งลักษณะรูปแบบรูพรุนแบบหลังทำให้ซิลิกามีความสามารถในการรับหิมิกสูง ขณะที่รูพรุนระหว่างอนุภาคของซิลิกาทำหน้าที่ยอมให้ของเหลวไหลผ่านจากพื้นผิวสารเคลือบอย่างรวดเร็วและมีความสามารถในการรับหิมิกได้ สูตรสารเคลือบโดยทั่วไปที่มีการผสมมีซิลิกาที่มีรูพรุนสูงจึงใช้เวลาในการแห้งตัวสั้น สมบัติของซิลิกาอสัณฐานสังเคราะห์อีกประการหนึ่งคือการแพร่ของหยดหิมิกบนสารเคลือบ พบว่าขึ้นกับลักษณะทางเคมีของพลังงานผิวซึ่งสัมพันธ์กับแรงดึงดูดของหิมิกฟิมพ์ นอกจากนี้ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นที่สำคัญเช่น ความหยาบและรูพรุนของสารเคลือบ นอกจากนี้การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลิกาก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบของพื้นผิวด้วย สำหรับสารเคลือบที่มีรูพรุนสูงส่งผลให้หิมิกฟิมพ์ดูดซึมได้รวดเร็วและสารสีของหิมิกฟิมพ์คงอยู่บริเวณผิวของสารเคลือบ การดูดซับตัวทำละลายของหิมิกฟิมพ์ ทำให้สารสีในหิมิกฟิมพ์ถูกแยกอยู่ในบริเวณใกล้ผิวสารเคลือบ ขนาดอนุภาคของซิลิกายังมีผลต่อการปรากฏสีพื้นทึบและความหยาบของพื้นผิวที่มีผลต่อความมันวาวภาพฟิมพ์ ทั้งนี้หากใช้ซิลิกานาโนที่รูพรุนระหว่างอนุภาคและมีขนาดเล็กลง ทำให้มีความสามารถในการรับหิมิกได้เพิ่มขึ้น และการที่มีรูพรุนภายในอนุภาคมากขึ้น งานฟิมพ์ก็แห้งตัวได้เร็วมากขึ้นไปอีก อีกทั้งซิลิกานาโนที่มีอนุภาคขนาดเล็กและใช้ในปริมาณน้อยจึงไม่ส่งผลต่อภาพฟิมพ์ในเรื่องความมันวาว

Grisdanurak *et al.* (2003) ศึกษาการนำขี้เถ้าแกลบจากการผลิตไฟฟ้าที่เป็นของเหลือทิ้ง มาวิเคราะห์พบว่ามีปริมาณซิลิกาสูงกว่าร้อยละ 90 เมื่อนำไปสังเคราะห์เป็นวัสดุนาโน MCM-41 เป็นวัสดุรูพรุนประเภท mesoporous molecular sieve มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนประมาณ 2.5-3.0 นา

โนเมตร พื้นที่ผิวเฉลี่ย 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นหกเหลี่ยมสม่ำเสมอ และมีสมบัติทนต่อความร้อนได้ดี ด้วยลักษณะเด่นดังกล่าวจึงสามารถนำมาใช้เป็นสารซับพอร์ตสำหรับตัวเร่ง ปฏิกิริยา (catalyst support) สารแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchanger) และสารดูดซับ (adsorbent) ซึ่ง MCM-41 มีความสามารถดูดซับสารอินทรีย์ระเหยได้ (VOCs) ได้แก่ ไตรคลอโรเอธิลีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ และเปอร์คลอโรเอธิลีน ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสี และซักแห้ง และสารไฮโดรคาร์บอนกลุ่มอะโรมาติกเช่น เบนซีน โทลูอิน ไซลีน ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในหมึกพิมพ์และเรซิน นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำละลายในการทำมาสะอาดลูกกลิ้งหมึก และฝ้ายางได้อีกด้วย

Rafiee and Shahebrahimi (2012) ศึกษาซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวสูงเพื่อใช้เป็นสารดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา เปรียบเทียบกับซิลิกาผสมฟอสฟอรัส (PW/N-SiO₂) ร้อยละ 40 ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม โดยวิเคราะห์ซิลิกานาโนจากการสังเกตการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N₂) แล้วคำนวณด้วยวิธี BET พบว่าซิลิกานาโนมีพื้นที่ผิว (surface area) 275 ตารางเมตรต่อกรัม และ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.0082 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม แต่ซิลิกาผสมฟอสฟอรัสร้อยละ 40 มีพื้นที่ผิว 623 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนก็ 0.0241 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม จึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่า เหมาะสมนำไปเป็นส่วนผสมในการผลิตสารเคลือบกระดาดเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวจับสารให้สีในหมึกพิมพ์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพงานพิมพ์ให้ดีและสามารถใช้ในปริมาณที่ลดลง

Adam *et al.* (2012) ศึกษาซิลิกาจากแกลบข้าวที่สกัดได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 500–800 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเมื่อนำมาวัดด้วยการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N₂) แล้วคำนวณด้วยวิธี BET พบว่าซิลิกามีการดูดซับแบบชนิดที่ 4 (Type IV) ซึ่งพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบเมโซพอร์ (mesopore) และพบอีกว่าซิลิกาที่สกัดได้จากการเผาแกลบข้าวที่อุณหภูมิต่ำได้ซิลิกาอสัณฐานที่มีพื้นที่ผิว (surface area) 65.1 ตารางเมตรต่อกรัม แต่การเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสขึ้นไป ได้ซิลิกาอสัณฐานเหมือนเดิมแต่มีพื้นที่ผิวลดลงเหลือเพียง 10.4 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากซิลิกาเกิดการรวมตัวกันของผลึก (condensation) ได้ดีและแน่นยิ่งขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น

Dey *et al.* (2012) สังเคราะห์วัสดุซีโอไลต์ ชนิด ZSM-5 จากเถ้าแกลบข้าว โดยใช้ Teflon-lined stainless steel เป็นแม่แบบ สำหรับกำหนดโครงสร้างใหม่ด้วยวิธี โซล-เจลในขั้นตอน

hydrothermal reaction ใช้อุณหภูมิที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 – 96 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์การดูดซับแก๊สไนโตรเจนแล้วคำนวณด้วยบีอีที (BET Method) พบว่าอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 96 ชั่วโมง วัสดุรูปพรุนมีพื้นที่ผิว 73.99 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าการสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งได้วัสดุรูปพรุนที่มีพื้นที่ผิวเพียง 54.38 ตารางเมตรต่อกรัม ซิลิกาที่ละลายมาเกาะบนสารกำหนดโครงสร้างได้เพิ่มขึ้น มีจำนวนชั้นระหว่างโมเลกุล (multi-molecular layer) ที่มากกว่า ส่งผลให้วัสดุที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณพื้นที่ผิวมากขึ้นตามไปด้วย

Julve *et al.* (2011) ศึกษาหาขนาดรูพรุนของซิลิกาโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์รูพรุนของซิลิกาด้วยเทคนิคการแทนที่ด้วยปรอท (mercury intrusion porosimetry, MIP) กับเทคนิคการดูดซับแก๊สของไนโตรเจน (N_2) พบว่าขนาดรูพรุนที่วัดและคำนวณจากเทคนิคการแทนที่ด้วยปรอท ได้ค่าน้อยกว่าวิธีการดูดซับแก๊สของไนโตรเจน ร่วมกับการคำนวณด้วยวิธีบีจีเอ (BJH method) ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการวิเคราะห์รูพรุนของซิลิกาด้วยวิธี MIP อาศัยแรงดันจากเครื่องมือวัด โดยขนาดของรูพรุนแปรผันตามแรงดันของปรอทที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งสมบัติเฉพาะตัวของปรอทที่มีความสามารถเปียก (wettability) ผิวบนวัสดุได้ต่ำมาก เนื่องจากมีค่าแรงตึงผิวสูง ทำให้ไม่สามารถแผ่หรือกระจายตัวออกเพื่อยึดเกาะบนผิวซิลิกาได้ ส่งผลให้วัสดุซิลิกาได้เฉพาะแต่บริเวณที่เป็นรูพรุนแบบเปิดเพียงชั้นเดียว (mono-molecular layer) เท่านั้น ซึ่งต่างจากแก๊สไนโตรเจน ที่สามารถแทรกผ่านเข้าไปในรูเล็กๆภายในชั้นต่างๆ (multi-molecular layer) ที่แทรกตัวอยู่ในอนุภาคของซิลิกา ดังนั้นเมื่อคำนวณหาขนาดรูพรุน (pore size) ได้ค่าน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด

พรสวรรค์ และ ยุพดี (2548) เปรียบเทียบสารเคลือบชนิดมันวาว (gloss coating) ซึ่งประกอบด้วยอะคริลิกเรซินกับสารพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 2 ชนิดคือ PVA 205 กับ PVA 224 ที่อัตราส่วนต่างกันคือ 1 : 4, 1 : 1 และ 4 : 1 (โดยปริมาตร) และสารเคลือบชนิดด้านที่มีอะคริลิกเรซินกับผงไมครอนซิลิกาเป็นส่วนผสม เคลือบลงบนกระดาษปอนด์ขาว น้ำหนักมาตรฐาน 100 กรัม ให้มีความหนาประมาณ 4 ไมโครเมตร พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบพ่นหมึก พบว่า การเคลือบสารชนิดมันวาวดีกว่าสารเคลือบชนิดด้านเมื่อเปรียบเทียบความสามารถเคลือบ การเกิดเม็ดสกปรกบนความแตกต่างสี และความทนทานต่อการขัดถู แต่กระดาษเคลือบสารชนิดด้านดีกว่ากระดาษเคลือบสารชนิดมันวาวด้านการแห้งตัว ขอบเขตสี (color gamut) ความคงทนต่อแสงและมีความเปรียบต่าง (Contrast) สูงกว่า เนื่องจากซิลิกาเป็นวัสดุที่มีรูพรุนเมื่อผสมลงไป ในสารเคลือบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับหมึกพิมพ์ หมึกพิมพ์แห้งตัวได้ดี และมีสมบัติที่ดีในการจับสารให้สีในหมึก

พิมพ์ทำให้ขอบเขตสีของงานพิมพ์กว้างมากขึ้น แต่ความทนทานต่อการขัดถูต่ำเนื่องจากอนุภาคของซิลิกาที่มีขนาดใหญ่ ไม่จมลงไปในผิวของกระดาษ เกาะกันเหนือชั้นของสารเคลือบ ทำให้พื้นผิวของงานพิมพ์ขรุขระไม่เรียบ เมื่อเกิดการขัดถูบนงานพิมพ์ทำให้สารสีที่อยู่บนตัวอนุภาคของซิลิกาหลุดออก จึงมองเห็นงานพิมพ์จึงเป็นรอยได้ง่าย

Hladnik and Muck (2002) ศึกษาสมบัติของสารสีต่อสมบัติกระดาษและงานพิมพ์ โดยใช้ซิลิกาสัญญาณ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (precipitated calcium carbonate; PCC) เป็นสารสี และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารยึดในการผสมสารเคลือบผิวกระดาษไฮเอนด์อิงก์เจ็ท และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารสีทั้ง 2 ชนิด พบว่า ปริมาณที่เหมาะสม คือ แคลเซียมคาร์บอเนตที่ร้อยละ 7-15 และซิลิกาที่ร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก และเมื่อสารเคลือบซิลิกาสามารถปรับปรุงผิวหน้าของกระดาษโดยจับหมึกพิมพ์ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็นตัวปรับสภาพผิวหน้ากระดาษให้เรียบ

อนันต์ (2548) หาสัดส่วนที่เหมาะสมของซิลิกาต่อดินขาวนาวิวาสสำหรับสารเคลือบกระดาษพิมพ์อิงก์เจ็ทโดยใช้ซิลิกาจากจีเฝ้าแลบมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.083 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 234.52 ตารางเมตรต่อกรัมเป็นสารสียึด ดินขาวนาวิวาสที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 69.04 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 18.85 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นสารสีรวม และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารยึด พบว่า สัดส่วนของซิลิกาต่อดินขาวนาวิวาส 75:25 และ 50:50 ให้สมบัติพิมพ์ที่ดีกว่าถึงเทียบเท่าการใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม สัดส่วนที่ 50:50 ให้ความขาวลดลงเนื่องจากดินขาวนาวิวาสมีสีขาวอมเหลือง

Malla and Devisetti (2005) ศึกษาผลของการใช้ดินขาวที่มีอนุภาคขนาดเล็กขนาด 0.3 ไมโครเมตร เป็นสารสีร่วมกับซิลิกาเป็นสารสียึดสำหรับการเคลือบกระดาษอิงก์เจ็ทชนิดด้าน พบว่า ดินขาวสามารถกระจายตัวได้ ที่เมื่อปริมาณของแข็ง (solid content) เท่ากับร้อยละ 60 และมีค่าของความหนืดที่เหมาะสมดินขาวเข้ากับซิลิกาทำให้ผลิตสารเคลือบมีปริมาณของแข็งสูงขึ้น ความพรุนของชั้นสารเคลือบเพิ่มขึ้น หมึกพิมพ์สามารถแห้งตัวได้รวดเร็ว คุณภาพของเส้นตัวอักษรและการซึมเข้าหากันของหมึกที่ได้จากการพิมพ์ลงบนสารสีผสมดินขาวและซิลิกาในสารเคลือบให้ผลใกล้เคียงกันกับการใช้ซิลิการ้อยละ 100 ทั้งนี้การใช้ดินขาวเป็นสารสีรวมยังเป็นการลดปริมาณการใช้ซิลิกา ลงถึงร้อยละ 50-75 โดยน้ำหนัก

ฐากูร และคณะ (2549) ศึกษาหาอัตราส่วนของซิลิกาและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมสำหรับการผสมสารเคลือบผิวบนกระดาษกราฟ และเปรียบเทียบค่าความแตกต่างสีและขอบเขตสีของงานพิมพ์ก่อนและหลังเคลือบ ด้วยระบบการพิมพ์พ่นหมึกและการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ซิลิการ้อยละ 30, 40 และ 50 โดยปริมาตร ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 100 ส่วน และผสมน้ำให้มีปริมาณของแข็งที่ร้อยละ 8-20 พบว่า กระดาษที่เคลือบด้วยอัตราส่วน 30:100 ปริมาณของแข็งร้อยละ 16 ให้คุณภาพงานพิมพ์ดีที่สุดเมื่อเทียบกับกระดาษไม่เคลือบสาร โดยงานพิมพ์ที่ได้ให้ขอบเขตสีที่กว้างที่สุด และการเกิดเม็ดสกปรกบนน้อยกว่าบนกระดาษไม่เคลือบสาร และเมื่อเปรียบเทียบกับงานพิมพ์เฟล็กโซกราฟี พบว่าค่าความแตกต่างสี ของกระดาษเคลือบสารนั้นมีค่าน้อยกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบสาร ซึ่งการศึกษาดังกล่าวทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการผสมซิลิกาในปริมาณที่มากเกินไปไม่ส่งผลให้ความสามารถในการรับหมึกพิมพ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเติมซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ในปริมาณมากส่งผลให้ความหนืดของสารเคลือบเพิ่มสูงขึ้นจนไม่สามารถเคลือบได้ ทำให้ปริมาณของแข็งลดลง ส่งผลให้ปริมาณซิลิกาที่ผิวกระดาษลดลง ทำให้ความสามารถในการจับตัวสารให้สีในหมึกพิมพ์ลดลงค่าขอบเขตสีของงานพิมพ์จึงลดลง

พิชญดา และคณะ (2552) ศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมของซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับสารเคลือบกระดาษพิมพ์อิงค์เจ็ทโดยทำการสังเคราะห์ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบให้ได้ซิลิกาบริสุทธิ์แล้วนำมาผสมกับส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ก่อนเคลือบด้วยเครื่องเฟล็กโซกราฟี แล้วทำการวิเคราะห์คุณภาพงานพิมพ์ ด้านความทึบแสง ความมันวาว ความขาวสว่าง ความดำพื้นตาย และค่า CIE L* a* b* พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตมีผลให้เกิดความขาว ความขาวสว่าง ความมันวาวของกระดาษเพิ่มขึ้น ส่วนซิลิกามีผลทำให้ความสามารถในการดูดซึมหมึกของกระดาษเพิ่มขึ้น หมึกพิมพ์ซึมออกด้านข้างน้อยลง และค่าความดำของหมึกสูงขึ้น ซึ่งอัตราส่วนที่ดีที่สุดของซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบ : แคลเซียมคาร์บอเนต : พอลิไวนิลแอลกอฮอล์อยู่ในช่วง 0.65-0.81 : 0.10-0.20 : 0.048-0.21 โดยน้ำหนักซึ่งอัตราส่วนนี้ทำให้กระดาษอิงค์เจ็ทมีความขาวอยู่ในช่วง 128-130 ความทึบในช่วง 100-105 ค่าความดำของสีไซแอนในช่วง 0.94-0.96 และการซึมออกด้านข้างของหมึกร้อยละ 6-7

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการสกัดซิลิกานาโน

- 1.1 แกลบข้าวเปลือก จากโครงการสวนพระองค์ สวนจิตรลดา กรุงเทพฯ
- 1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR grade บริษัท Merck
- 1.3 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 37 โมลาร์ AR grade บริษัท Merck
- 1.4 เอทานอล (C_2H_5OH) ร้อยละ 99.8 AR grade บริษัท Merck
- 1.5 เฮกซะไดซัล ไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์ ($[C_{16}H_{33}N(CH_3)_3]Br$, CTAB) บริษัท

Fluka

- 1.6 น้ำประปา
- 1.7 น้ำกลั่น ที่มีความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7

2. วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการผลิตสารเคลือบ

- 2.1 เรซินฐานน้ำชนิดลาเท็กซ์ไดรีนบิวตาไดอิน Joncryl 678 บริษัท BASF
- 2.2 ซิลิกานาโนที่สกัดจากแกลบข้าว
- 2.3 สารช่วยกระจายตัว (Disperbyk-193)
- 2.4 น้ำกลั่น ที่มีความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7
- 2.5 สารลดฟอง (defoaming agent)(Foamaster NXZ)
- 2.6 กระดาษกราฟสีขาวน้ำหนักมาตรฐาน 170 กรัมต่อตารางเมตร
- 2.7 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ 4 สี ได้แก่ หมึกพิมพ์สีเขียวฟ้า สีม่วงแดง สีเหลือง

และสีดำ (flexo ink process color, C M Y K) บริษัท INTER INK

3. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1 เตาเผาที่ควบคุมปริมาณอากาศ (muffle furnace) ที่เผาได้อุณหภูมิสูงสุด 1,100 องศาเซลเซียส
- 3.2 ตู้อบลมร้อน (oven) ที่สามารถอบได้ที่อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส
- 3.3 เครื่องบด (ball mill) ขนาด 2 ลิตร และลูกแก้วบด (glass bead) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-3 มิลลิเมตร

3.4 เครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) บริษัท NANA รุ่น SHP-10

3.5 เครื่องผสมหมึกแบบปั่นความเร็วสูง (homogenous mixer)

3.6 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

3.7 เครื่องวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-rays Fluorescence Spectrometer, XRF)

3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM)

3.9 เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Particle Size Distribution, PSD)

3.10 เครื่องวิเคราะห์ Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

3.11 เครื่องวัดค่าความหนืด (brookfield viscometer)

3.12 ถ้วยวัดความหนืดซันคัพเบอร์ 3 (zahn cup No3.)

3.13 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)

3.14 อุปกรณ์ทดสอบการดูดซึม (cobb test)

3.15 เครื่องเคลือบลูกกลิ้งกราเวียร์ (gravure roll coating) ที่รายละเอียด 23.5 เส้นต่อเซนติเมตร ที่มีระบบทำแห้งด้วยลมร้อน

3.16 เครื่องพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี (flexo printing machine) รุ่น Nilpeter 200 FB บริษัท Nilpeter

3.17 แม่พิมพ์ยางเฟล็กโซกราฟี (flexo printing machine) พื้นฐานหนา 1.14 มิลลิเมตร

3.18 แผ่นทดสอบมาตรฐานทดสอบสีการพิมพ์ (Testchart 3.5 CMYK) มีจำนวนช่องตารางสี 405 ช่อง

3.19 เครื่องวัดค่าความดำแบบสะท้อน (reflection densitometer) รุ่น Spectroeye บริษัท Gretag Macbeth

3.20 เครื่องวัดค่าความขาว (whiteness) รุ่น Spectroeye บริษัท X-rite

3.21 เครื่องวัดค่าฟักติส/ความโปร่งใสของเหลว (liquid spectro-Densito photometer) รุ่น ColorIS บริษัท X-rite

3.22 เซลล์เหล็ยวัดค่าสี/ความทึบแสง (plastic cuvette) ขนาด 10 มิลลิเมตร.

3.23 เครื่องวัดค่าฟักติสแบบสะท้อน (reflection spectrophotometer) ชนิดกราดรุ่น i1 Basic Pro2 บริษัท X-rite

3.24 เครื่องวัดค่าความขรุขระผิว (roughness tester) ชนิด Air-leak รุ่น Bendtsen PO + RO บริษัท PTI

- 3.25 เครื่องวัดค่าความมันวาว (glossmeter) 75° รุ่น micro-gloss 75° บริษัท BYK-Gardner GmbH
- 3.26 เครื่องกราดภาพกำลังขยายสูง (Hi-end scanner) รุ่น Perfection V700 Photo บริษัท Epson
- 3.27 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50-1,000 เท่า (microscopy 50-1,000X) รุ่น ES2 บริษัท Lica
- 3.28 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมประมวลผลภาพ Image J
- 3.29 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม imageplus pro บริษัท Media Cybernetics Inc.
- 3.30 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม X-rite i1 Profiler บริษัท X-rite
- 3.31 คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมจัดการไฟล์สี Gretag Macbeth- Profile Editor บริษัท Gretag Macbeth
- 3.32 เครื่องทดสอบการขีดถู SUTHERLAND Ink Rub Tester พร้อมแท่นกดน้ำหนักทดสอบ 1.81 กิโลกรัม
- 3.33 กล้องถ่ายภาพสะท้อนเลนส์เดี่ยวดิจิทัล (Digital SLR camera)
- 3.34 กระดาษกรองละเอียด เบอร์ 1 บริษัท Whatman
- 3.35 เตาไฟฟ้า (hot plate)
- 3.36 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.37 นาฬิกาจับเวลา
- 3.38 กระชกนาฬิกา (watch glass)
- 3.39 กระชกปิดสไลด์ (cover glass)
- 3.40 โถสุญญากาศ (desiccators)
- 3.41 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.42 แท่งแก้วคนสาร
- 3.43 บีกเกอร์ (beaker)
- 3.44 ตู้ดูดควัน (hood)

วิธีการ

1. การสกัดซิลิกาจากแกลบข้าว

1.1 ทำความสะอาดแกลบข้าว โดยการคัดแยกฝุ่นและล้างแกลบข้าวด้วยน้ำกลั่น อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

1.2 ต้มแกลบข้าวด้วยกรดไฮโดรคลอริกในตู้ดูดควัน โดยมีสภาวะการต้มดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สภาวะการต้มแกลบข้าวในกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการต้มที่แตกต่างกัน

ส่วนประกอบ	ปริมาณ
ปริมาณแกลบข้าว	10 กรัม
ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก	1, 2 และ 3 โมลาร์
ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก	100 มิลลิลิตร
อุณหภูมิในการต้ม	80 ± 5 องศาเซลเซียส
เวลาที่ใช้ในการต้ม	1 และ 2 ชั่วโมง

1.3 ล้างแกลบที่ผ่านการต้มด้วยน้ำสะอาดและล้างน้ำสุดท้ายด้วยน้ำกลั่นจนได้ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 7 อบแห้งแกลบข้าวด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

1.4 เเปาะแกลบข้าวในเตาเผาที่ควบคุมปริมาณอากาศที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

1.5 นำเถ้าจากแกลบข้าว ไปบดด้วยเครื่องบดที่มีลูกแก้วบด ในอัตราส่วนลูกแก้วบดต่อเถ้าแกลบข้าวในอัตราส่วนร้อยละ 30:30 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

1.6 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาที่สกัดได้ดังนี้

- ลักษณะและสีของเถ้าแกลบด้วยตาเปล่า (กล้องถ่ายภาพบันทึกภาพ)

- องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) โดยการนำเถ้าแกลบที่ผ่านการเผามาวิเคราะห์ดูว่ามีธาตุอะไรเป็นองค์ประกอบ และสามารถวิเคราะห์ปริมาณและความบริสุทธิ์ของซิลิกาที่สกัดได้

- ประเภทของซิลิกาด้วยวิธีการดูความเป็นผลึกด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) โดยการนำเอาแผ่นที่ผ่านการเผาแล้วมาวัดด้วยกรวดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกันมาวิเคราะห์โดยใช้ลำแสงเลเซอร์ คอปเปอร์ โพตาเซียม อัลฟา (CuK α radiation) ในการตรวจสอบ

- ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกาด้วยวิธีการใช้กล้อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการนำเอาแผ่นที่ผ่านการเผาแล้วมาวัดด้วยกรวดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกันมาวิเคราะห์พื้นผิวโดยถ่ายภาพเอาแผ่นที่ผ่านการฉาบผิวหน้าด้วยทองคำ ด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า ที่มาตรฐานที่ 2 ไมโครเมตร

- พิกัดสีและความขาวของซิลิกาจากแผ่นขาวด้วยเครื่องวัดค่าสี โดยใช้การวิเคราะห์จากสเปกตรัมของสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามนุษย์มองเห็น (380-740 นาโนเมตร) ที่สะท้อนออกมาจากแผ่นที่สกัดได้โดยใช้เครื่องวัดค่าสเปกตรัมและค่าพิกัดสี (visible spectrophotometer) ใช้แหล่งกำเนิดแสงขาวอุณหภูมิ 5,000 องศาเคลวิน (daylight D50) และมุมในการวัด 2 องศา (CIE, 1931) ในการตรวจวัดแล้วนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับพิกัดสีขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 เพื่อคำนวณค่าความแตกต่างสี ของซิลิกาที่สกัดได้

1.7 เก็บซิลิกาที่สกัดได้ในโถสุญญากาศเพื่อป้องกันความชื้น

2. การสังเคราะห์ซิลิกานาโนจากซิลิกาที่สกัดจากแกลบข้าว

2.1 นำซิลิกาที่ได้จากการสกัดในขั้นตอนแรกที่มีสมบัติเหมาะสมนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคลือบ โดยพิจารณาจากองค์ประกอบภายในตัวซิลิกา รูพรุน สี ความขาว และขนาดอนุภาคที่เหมาะสม (Arthur, 2006) เมื่อนำไปลดขนาดลงเป็นซิลิกานาโน ให้เป็นวัสดุเมโซพอร์ ที่เรียกว่า MCM 41 โดยใช้เฮกซะไดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เป็นตัวสังเคราะห์ (Chiarakorn, 2004)

2.2 เตรียมสารละลาย CTAB ด้วยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.26 กรัม ในน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร แล้วเติมสาร CTAB ปริมาณ 3 กรัม ไปโดยขณะเติมต้องใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ช่วยกวนเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลาย

2.3 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ด้วยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.88 กรัม ในน้ำกลั่น 8 มิลลิลิตร แล้วเติมผงซิลิกาจากแกลบข้าวที่บดได้ ในปริมาณ 4.32 กรัม โดยขณะเติมให้ความ

ร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลาย จนกว่าซิลิกาจากแกลบข้าวละลายหมด

2.4 ผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลาย CTAB เข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก ช่วยในการผสม ปรับค่าความเป็นกรดของสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 10 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง

2.5 กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองล้างด้วยเอทานอลและตามด้วยน้ำกลั่น

2.6 อบแห้งด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2.7 นำไปเผาในเตาที่ควบคุมปริมาณอากาศ อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 5 ชั่วโมง

2.8 นำไปบดด้วยเครื่องบดด้วยลูกแก้วบด ในอัตราส่วนลูกแก้วบดต่อซิลิการ้อยละ 40:30 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง

2.9 วิเคราะห์สมบัติกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกานาโนจากแกลบข้าว ดังนี้

- ลักษณะและสีของแกลบด้วยตาเปล่า (กล้องถ่ายภาพบันทึกภาพ)

- องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีซิลิกานาโนจากแกลบข้าว (Nano-RHS) กับซิลิกาจากการเผาแกลบข้าว (RHS) เพื่อดูความบริสุทธิ์และปริมาณองค์ประกอบเคมีของซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ว่าเปลี่ยนแปลงอย่างไร

- ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์รูพรุนและลักษณะภายนอกของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวโดยใช้การกล้องถ่ายภาพพื้นผิวถ่ายบนแกลบที่ผ่านการฉาบผิวหน้าด้วยทองคำ โดยทำการถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า ที่มาตรฐานที่ 20 ไมโครเมตร และทำการเปรียบเทียบกับซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบข้าว

- ขนาดอนุภาคของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวด้วยเครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD) เพื่อคำนวณหาขนาดอนุภาคของผงซิลิกาด้วยการวัดด้วยลำแสงเลเซอร์ โดยเมื่อนำซิลิกานาโนจากแกลบข้าวไปวัดค่าแล้วนำมาคำนวณหาขนาดอนุภาคซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่แท้จริงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

- ปริมาตรของรูพรุนซิลิกานาโนจากแกลบข้าวและพื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยวิธีการ (BET method) เพื่อดูความสามารถของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในการดูดซับปริมาณก๊าซไนโตรเจน (N_2) เข้าไปภายในตัวอนุภาคเพื่อนำมาคำนวณหาปริมาตรรูพรุนภายในเพื่อคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ด้วย BET method

- พิกัดสีและความขาวของซิลิกานาโนจากแอลบขาวด้วยเครื่องวัดค่าสี (visible spectrophotometer) โดยวิเคราะห์จากสเปกตรัมของสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามนุษย์มองเห็น (390-720 นาโนเมตร) ที่สะท้อนออกมาจากซิลิกานาโนที่สังเคราะห์จากซิลิกาจากแอลบขาวและซิลิกาที่ได้จากการเผาแอลบ โดยใช้เครื่องวัดค่าสเปกตรัมและพิกัดสีโดยใช้แสงขาวอุณหภูมิ 5,000 องศาเคลวิน (D50) มุมในการวัด 2 องศา (CIE, 1931) ในการวัดค่าสีแล้วคำนวณเปรียบเทียบกับพิกัดสีขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 เพื่อหาความแตกต่างสี

3. การเตรียมสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแอลบขาว

3.1 เตรียมสารเคลือบกระดาษฐานน้ำ (water-base coating) โดยใช้สูตรของการผลิตสารเคลือบสำหรับระบบเฟล็กโซกราฟี (flexography ink formulation) ตามตารางที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 5 สูตรสารเคลือบกระดาษ

ส่วนประกอบ	น้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
เรซิน/สารยึดติด BASF J678	80
สารลดการเกิดฟอง Foamaster NXZ	1
น้ำกลั่น	18

ที่มา: Arthur (2006)

3.2 ปรับค่าความหนืดของสารเคลือบด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้สารเคลือบมีค่าความหนืดเหมาะสมสำหรับการพิมพ์ระบบกราเวียร์และระบบเฟล็กโซกราฟีด้วยถ้วยวัดความหนืดซานคัพเบอร์ 3 (zahn cup No3.) ที่ 25 องศาเซลเซียส 12-16 วินาที (Flexographic Ink, 2007)

3.3 เตรียมซิลิกานาโนจากแอลบขาวให้อยู่ในรูปของคอลลอยด์ซิลิกาโดยการนำไปกระจายตัวในน้ำกลั่นแล้วใส่สารที่ช่วยทำให้กระจายตัว Disperbyk-193 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักสารเคลือบ และใช้เครื่องกวนแม่เหล็กช่วยในการกระจายตัวอนุภาค

3.4 เตรียมซิลิกานาโนจากแอลบขาวให้อยู่ในรูปของคอลลอยด์ในอัตราส่วนร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 ของน้ำหนักเรซิน แล้วผสมลงไปในสารเคลือบที่เตรียมไว้

3.5 ผสมซิลิกา นาโนจากเกลบข้าวและสารเคลือบให้เข้ากันโดยใช้เครื่องผสมหมึกแบบปั่นความเร็วสูง ปั่นให้สารเคลือบที่ผสมซิลิกา นาโนจากเกลบข้าวเป็นเนื้อเดียวกัน

3.6 เก็บสารไว้ในขวดหรือกระป๋อง โดยการเติมสารเคลือบที่ผลิตลงไปให้เกือบเต็มเพื่อให้อากาศอยู่ภายในระหว่างเก็บให้น้อยที่สุด และทำการปิดให้แน่นเพื่อป้องกันสารเคลือบแข็งตัวหรือเสื่อมสภาพ

3.7 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสารเคมีของสารเคลือบที่ผสมซิลิกา นาโนจากเกลบข้าวที่เตรียมได้ในอัตราส่วนการผสมต่างกัน ดังนี้

- วิเคราะห์ปริมาณของแข็ง (solid content) เพื่อหาปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของสารเคลือบเมื่อแห้งตัว ตามวิธีการของ ASTM D 7238-06 โดยใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 60 นาทีในการให้ความร้อนแก่สารเคลือบ เพื่อดูปริมาณสารตกค้างที่เหลือ

- ความหนืดของสารเคลือบที่ผสมซิลิกา นาโนจากเกลบข้าว ด้วยเครื่องวัดค่าความหนืด (Brookfield viscometer) ตามวิธีการของ ASTM D 2196-10 ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน Brookfield ใช้แท่งวัดความหนืด LV Spindles เบอร์ 2 (S62) ความเร็วในการหมุน 10 รอบต่อนาที

- ลักษณะความโปร่งใส (transparent) ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกา นาโนจากเกลบข้าว ตามวิธีการของ ASTM D1003-11e1 โดยบรรจุสารเคลือบอยู่ในเซลล์เหล็ยวัดค่าสี (plastic cuvette) ขนาด 10 มิลลิเมตร แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าโปร่งใสของเหลว (liquid spectro-Densito photometer) ซึ่งมี Pulsed Xenon เป็นแหล่งกำเนิดแสงอยู่ที่ช่วงความยาว 360-750 นาโนเมตร ส่องผ่านตัวสารเคลือบ (liquid spectrophotometer) เพื่อวัดค่าสี

- ค่าฟักดสีและความเป็นสีเหลือง (yellowness) ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกา นาโนจากเกลบข้าวตามวิธีการของ ASTM E313-10 โดยบรรจุสารเคลือบอยู่ในเซลล์เหล็ยวัดค่าสี (plastic cuvette) ขนาด 10 มิลลิเมตร แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าฟักดสี (liquid spectro-Densito photometer) ซึ่งมี Pulsed Xenon เป็นแหล่งกำเนิดแสงอยู่ที่ช่วงความยาว 360-750 นาโนเมตร ส่องผ่านตัวสารเคลือบ (liquid spectrophotometer) เพื่อวัดค่าสี

- ชนิดและองค์ประกอบของสารเคลือบที่ผสมซิลิกา นาโนจากเกลบข้าวด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) โดยบรรจุสารเคลือบที่แห้งตัวเป็นแผ่นฟิล์มกับโปแตสเซียมโบรไมด์ (KBr pellet technique) เพื่อวิเคราะห์ห่อ้งค์หมู่ฟังก์ชันภายในของตัวสารเคลือบด้วยแสงอินฟราเรดออกมาเป็นความถี่ในการดูดกลืนช่วงแสงที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ

4. การประเมินคุณภาพทางการพิมพ์

4.1 เคลือบสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแอลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ลงบนกระดาษกราฟข้าวน้ำหนักมาตรฐาน ขนาด 170 กรัมต่อตารางเมตร ด้วยเครื่องเคลือบระบบลูกกลิ้งกราเวียร์ (gravure roll coating) ที่ความละเอียด 23.5 เส้นต่อเซนติเมตร ความเร็วในการพิมพ์ 10 เมตรต่อนาที และเป่าแห้งด้วยลมร้อน 120 องศาเซลเซียส เพื่อให้ชั้นของสารเคลือบซิลิกานาโนจากแอลบข้าวทำหน้าที่เป็นชั้นรองพื้น (primer)

4.2 พิมพ์แบบจำลองงานพิมพ์ (standard test form) ซึ่งประกอบไปด้วยรูปภาพ แถบสี ตัวอักษร และช่องตารางสี (color test chart) บนกระดาษกระดาษกราฟข้าวที่เคลือบสาร โดยใช้เครื่องพิมพ์เฟล็กโซกราฟี Nilpeter รุ่น 200 FB ด้วยแม่พิมพ์ยางพื้นหนา 1.14 มิลลิเมตร ที่ความละเอียดแม่พิมพ์ 31.5 เส้นต่อเซนติเมตร ใช้หมึกพิมพ์สีชุดฐาน 4 สี (CMYK) จ่ายหมึกด้วยลูกกลิ้งแอนนิลล็อกแบบใบมีดปาดหมึก (doctor blade analog color) (Helmut, 2001) ที่ความละเอียด 195 เส้นต่อเซนติเมตร ความเร็วในการพิมพ์ 1,800 เมตรต่อชั่วโมง

4.3 วิเคราะห์คุณภาพทางการพิมพ์ด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้

- ค่าพิกัดสีของกระดาษที่เคลือบสารที่ผสมซิลิกานาโนจากแอลบข้าวด้วยเครื่องวัดเครื่องวัดค่าสี (visible spectrophotometer) ตามวิธีการของ ISO 12647-1 ด้วยเครื่องวัดสีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบสะท้อน (reflection spectrophotometer) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงขาวอุณหภูมิ 5,000 องศาเคลวิน (D50) มุมในการวัด 2 องศาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการวัดค่าสีงานพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 (มอก2260-6, 2006)

- ลักษณะพื้นผิวของสารเคลือบและความหนาของฟิล์มสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแอลบข้าวเมื่อแห้งตัว (แผ่นฟิล์มสารเคลือบ) ด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของกระดาษ ลักษณะของเส้นใย ใช้กำลังขยาย 500 เท่า และความหนาของชั้นสารเคลือบด้วยกำลังขยาย 250 เท่า

- ความมันวาว (gloss) ของงานพิมพ์ด้วยเครื่องวัดค่าความมันวาว (glossmeter) ตามวิธีการของ ASTM D1223-93: 2006 ใช้มุมในการวัดค่า 75 องศา รุ่น micro-gloss 75 องศาของบริษัท BYK-Gardner GmbH วัดค่ามันวาวบนกระดาษทุกประเภท

- การดูดซึมน้ำ (cobb test) ของกระดาษที่เคลือบซิลิกานาโนจากแอลบข้าวตามวิธีการของ TAPPI 441 โดยวิเคราะห์จากปริมาณน้ำหนักของน้ำที่สามารถแทรกตัวเข้าไปในเนื้อกระดาษกราฟพื้นที่ 0.1 ตารางเมตรแล้วคำนวณออกมาเป็นค่าการดูดซึมน้ำเป็นกรัมต่อตารางเมตร

- ความขรุขระ (roughness) ของกระดาษที่เคลือบซิลิกาโนจากแอลบขาวโดยวิเคราะห์ตามวิธีการของ TAPPI T555 โดยใช้เครื่องวัดความขรุขระผิวเพื่อดูระยะเวลาที่อากาศใช้เคลื่อนผ่านผิวหน้ากระดาษกราฟต์ที่เคลือบสารผสมซิลิกาโนจากแอลบขาว สำหรับกระดาษที่ผิวหน้าเรียบอากาศจะใช้ระยะเวลานานมากกว่าผิวหน้ากระดาษที่ขรุขระไม่เรียบ เพื่อดูปริมาณซิลิกาโนจากแอลบขาวส่งผลต่อค่าความเรียบของกระดาษกราฟต์

- ความสามารถในการรับหมึกพิมพ์ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกาโนจากแอลบขาวโดยวิเคราะห์ค่าความดำของหมึกพิมพ์ (density) ของหมึกพิมพ์ cyan, magenta, yellow และ black ด้วยเครื่องวัดค่าความดำแบบสะท้อน (reflection densitometer) ที่มีแหล่งกำเนิดแสงชนิด Gas-filled tungsten ตามวิธีการของ ASTM D7305-08a โดยวัดบริเวณพื้นขาวหรือบริเวณสกรีนพื้นที่ (ร้อยละ 100) ในแถบสีสำหรับควบคุมงานพิมพ์ (color bar หรือ control bar)

- ความคมชัดของภาพพิมพ์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง โดยใช้กำลังขยาย 50 เท่า เพื่อดูความคมชัดของขนาดตัวอักษร (font & text size) ความคมชัดของเส้น (edge line) ขนาดต่างๆ และใช้กำลังขยาย 200 เท่า ดูความคมชัด (sharpness) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ImageJ ช่วยในการวิเคราะห์

- คุณภาพของภาพพิมพ์สีและการแสดงรายละเอียดบนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยซิลิกาโนจากแอลบขาว โดยการกราดเก็บรายละเอียดของภาพที่ 4,800 จุดต่อตารางนิ้ว และเปิดดูรายละเอียดภาพสีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ImageJ มาช่วยในการวิเคราะห์

- ความสามารถในการเก็บรายละเอียดโทนภาพ โดยการวัดค่าพื้นที่เม็ดสกรีน (tone value, dot area) และการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เม็ดสกรีน (tone value increase, TVI) ตามวิธีการวัดของ ISO 12647-1 ด้วยเครื่องวัดค่าความดำแบบสะท้อน (reflection densitometer) ที่มีแหล่งกำเนิดแสงชนิด Gas-filled tungsten วัดตั้งแต่บริเวณที่ไม่มีการพิมพ์หรือพื้นที่เม็ดสกรีนเท่ากับร้อยละ 0 จนถึงบริเวณที่พิมพ์เต็มพื้นที่กระดาษหรือพื้นขาวหรือพื้นที่เม็ดสกรีนเท่ากับ 100 โดยมีช่วงวัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 ของช่องพื้นที่พิมพ์สี cyan, magenta, yellow และ black บริเวณแถบสีสำหรับควบคุมงานพิมพ์ (color bar หรือ control bar) แล้วทำการวิเคราะห์เทียบกับข้อกำหนดเรื่องการเพิ่มขึ้นของโทนภาพตามมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี

- ความสามารถในการแสดงสีสันทันของงานพิมพ์จากแผนภูมิโปรไฟล์สีสามมิติ (3D - color profile) วัดค่าฟิสิกส์แบบสะท้อน (reflection spectrophotometer) ชนิดกราดรุ่น i1 Basic Pro2 วัดช่องสีแต่ละช่องในตารางสี TC 3.5 CMYK ใช้มุมในการวัดที่ 2 องศา ภายใต้แสงมาตรฐาน 5,000 องศาเคลวิน (D50) (CIE 1931) แล้วนำค่าฟิสิกส์ที่วัดได้แต่ละจุดมาสร้างโมเดลขอบเขตสีด้วยโปรแกรมสร้างแผนภูมิโปรไฟล์สี (color profile) สามมิติด้วยโปรแกรม X-rite i1 Profiler แล้ว

เปรียบเทียบค่าขอบเขตสีทางการพิมพ์ (color gamut) ของงานพิมพ์ที่กว้างที่สุดบนกระดาษที่เคลือบด้วยซิลิกานาจากแอลบ้าว ด้วยโปรแกรม X-rite Profile Editor

- ค่าความแตกต่างสี (ΔE) ตามวิธีการของ ISO 12647-1, ASTM D2244-11 เปรียบเทียบสี cyan, magenta, yellow และ black บนงานพิมพ์กับมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี โดยทำการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าพิกคัสแบบสะท้อน (reflection spectrophotometer) แบบวัดที่ละจุดรุ่น Spectroeye โดยใช้มุมในการวัด 2 องศา ภายใต้แสงมาตรฐาน 5,000 องศาเคลวิน (D50) (CIE, 1931) วัดบริเวณพื้นขาวหรือบริเวณสกรีนพื้นที่บ (ร้อยละ 100) ในแถบสีสำหรับควบคุมงานพิมพ์ (color bar หรือ control bar) และคำนวณค่าความแตกต่างของสี

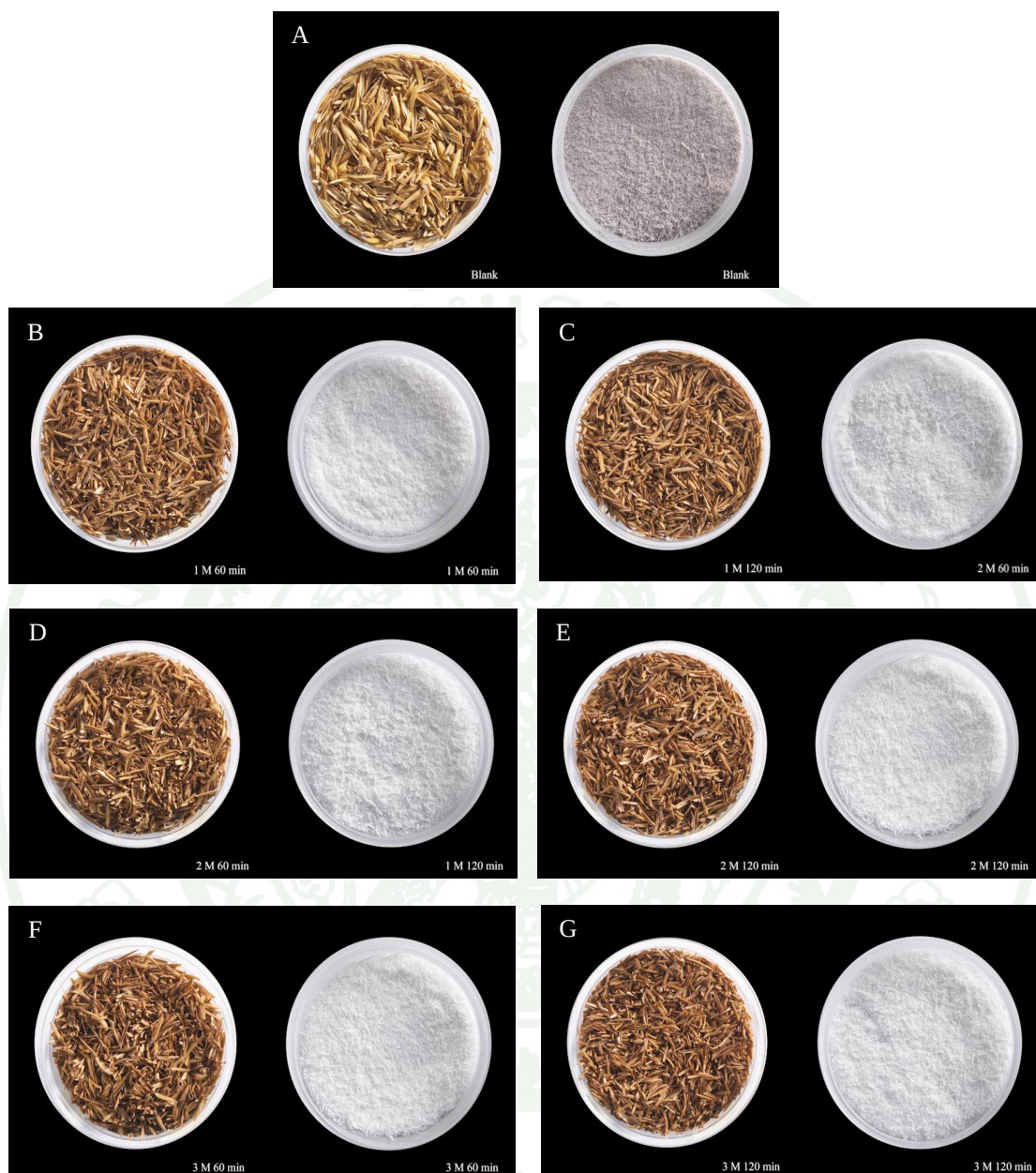
- ความทนทานต่อการขัดถูของงานพิมพ์บนสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแอลบ้าว ด้วยเมื่อปล่อยให้แห้งตัวเป็นระยะเวลา 7 วันด้วยเครื่องทดสอบการขัดถูของ Sutherland Rub Tester ใช้แท่งกดน้ำหนักขนาด 1.81 กิโลกรัม หรือ 4 ปอนด์ เป็นตัวกดน้ำหนักให้กับกระดาษกราฟด์ขาว จากนั้นนำมาขัดถูบนงานพิมพ์สีที่พิมพ์บนกระดาษประเภทต่างๆ จำนวน 10 รอบ (stokes) ด้วยความเร็ว 42 รอบต่อนาที และทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D5264-98 เพื่อจำลองสภาวะการเสียดสีของงานพิมพ์บรรจุภัณฑ์คอนซันส่งและเคลื่อนย้าย ได้ผลการทดสอบเป็นค่าการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ที่ติดกับกระดาษกราฟด์ที่นำไปขัดถู และคำนวณเป็นค่าความต้านทานการขัดถูบนกระดาษแต่ละประเภท

ผลและวิจารณ์

1. การสกัดซิลิกาจากแกลบข้าว

ระยะเวลาที่ใช้ในการต้มเท่ากับ 60 และ 120 นาที และนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของซิลิกาสกัดจากแกลบข้าว

1.1 คุณลักษณะทางกายภาพของซิลิกาสกัดจากแกลบข้าวเมื่อนำเข้าที่ได้จากการเผาแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดที่มีความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลาร์ และระยะเวลาที่ใช้ในการต้มเท่ากับ 60 และ 120 นาทีไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพได้ผลออกมาดังภาพที่ 10 พบว่า แกลบที่ไม่ได้ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีสีเหลืองและเมื่อนำไปเผาได้เถ้าแกลบสีเทา (ภาพที่ 10A) แต่แกลบที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 60 และ 120 นาที ได้แกลบสีน้ำตาลและเมื่อเผาได้เถ้าแกลบสีขาว ดังภาพที่ 10B และ 10C เมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นความเข้มของสีแกลบเพิ่มขึ้นดังเห็นได้จากภาพที่ 10D-10G โดยที่แกลบที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลาร์ ได้แกลบที่มีสีน้ำตาลเข้มและเถ้าแกลบสีขาวสว่างและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 3 โมลาร์ ได้แกลบสีน้ำตาลเข้ม อย่างไรก็ตามเถ้าแกลบที่ผ่านการเผากลับได้ให้สีขาวเหมือนกับแกลบที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 และ 2 โมลาร์ ดังนั้นความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกและระยะเวลาในการต้มมีผลต่อสีของเถ้าแกลบที่ได้โดยเมื่อต้มแกลบข้าวที่ความเข้มข้นมากขึ้นได้แกลบที่มีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นเนื่องจากกรดและความร้อนไปทำให้สารสีในตัวแกลบข้าวสลายตัวไป แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ภายใต้การควบคุมอากาศในขณะที่เผา ความขาวของเถ้าแกลบที่ได้เพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งความขาวของเถ้าแกลบไม่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด



A : แกลบข้าวที่ไม่ได้ต้มกรดไฮโดรคลอริก (Blank)

B : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 60 นาที

C : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 120 นาที

D : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที

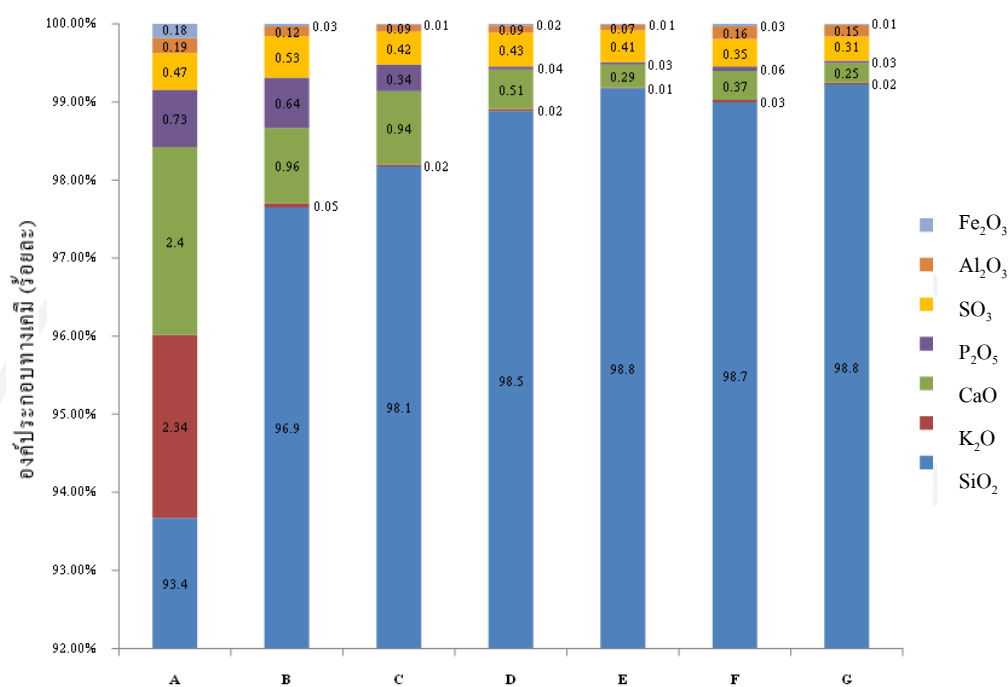
E : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 120 นาที

F : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ 60 นาที

G : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ 120 นาที

ภาพที่ 10 ลักษณะที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าของแกลบข้าวที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน และเก็บแกลบเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมง

1.2 องค์ประกอบทางเคมี โดยทำการหาองค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) ของเถ้าแกลบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ได้ผลดังภาพที่ 11



A : แกลบข้าวที่ไม่ได้ต้มกรดไฮโดรคลอริก (Blank)

B : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 60 นาที

C : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 120 นาที

D : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที

E : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 120 นาที

F : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ 60 นาที

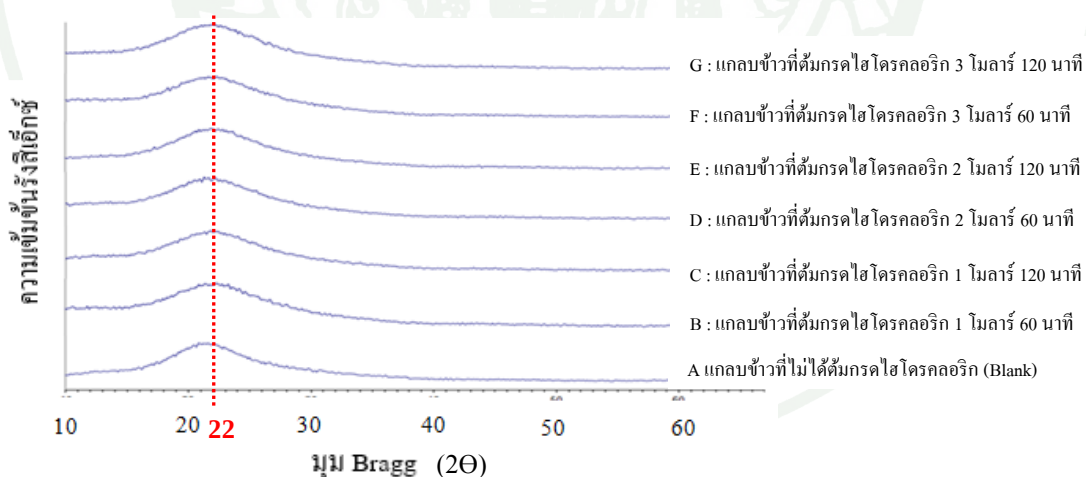
G : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ 120 นาที

ภาพที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 11 พบว่า เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นและระยะเวลาในการต้มที่แตกต่างกันมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นซิลิกา (SiO₂) ไป แต่สเชียมออกไซด์ (K₂O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ฟอสฟอรัส เพนตะออกไซด์ (P₂O₅) ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ (SO₃) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเหล็ก (Fe₂O₃) ที่ไม่เท่ากันแต่มีปริมาณซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์มากที่สุด และมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก (ดังภาพที่ 11) อย่างไรก็ตามอัตราส่วนของซิลิกาในเถ้าแกลบข้าวที่ไม่ได้ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีเพียงร้อยละ 93.40 โดยน้ำหนักและเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการต้มแกลบ และระยะเวลาใน

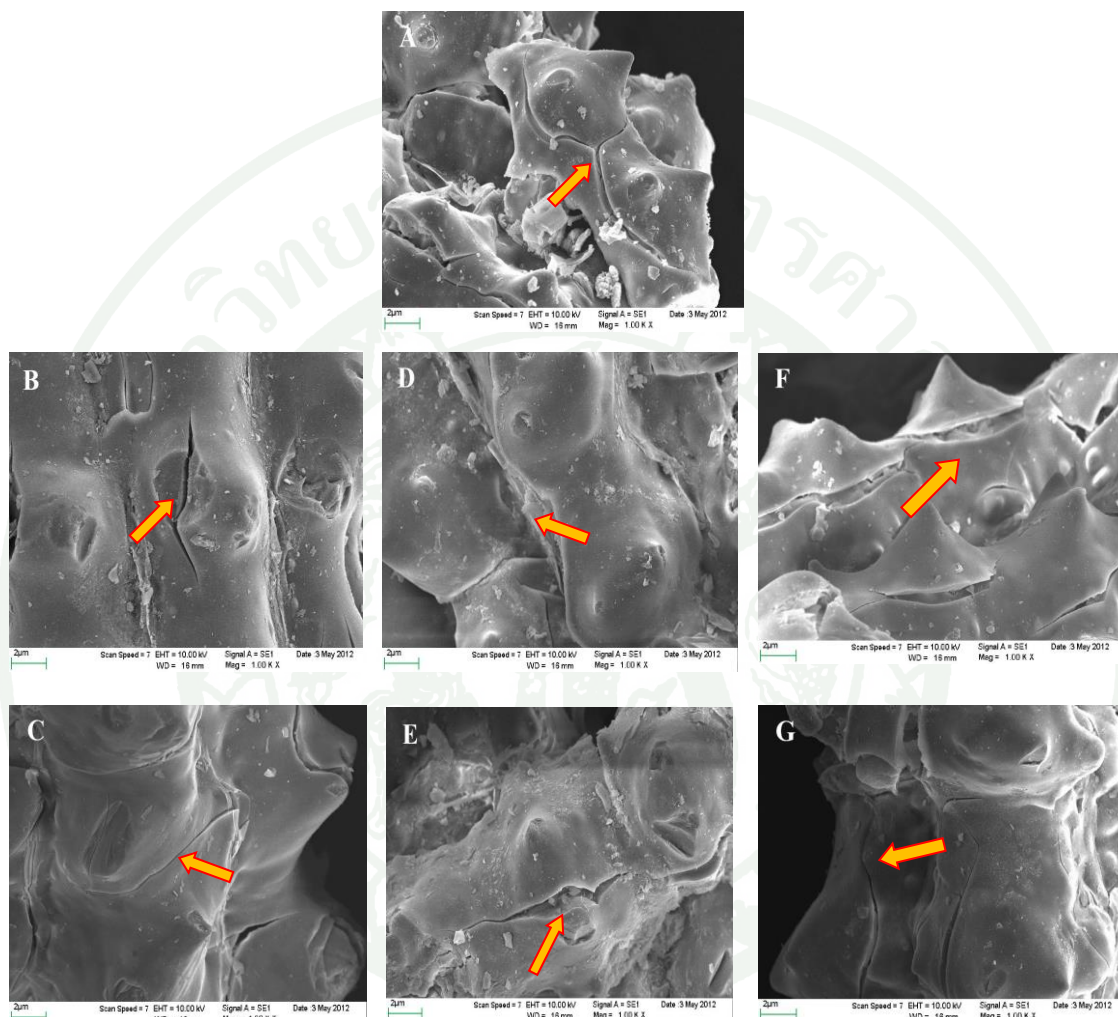
การต้มมีผลทำให้สารละลายประกอบลดลง เพราะการต้มกรดที่ความเข้มข้นกรดเท่ากันแต่ใช้เวลาต้มมากขึ้นพบว่า อัตราส่วนของสารประกอบอื่นมีค่าลดลง เช่น แคลเซียมออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 0.51 เป็นร้อยละ 0.29 โดยน้ำหนัก เมื่อต้มนาน 120 นาที ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ (ดังภาพที่ 11) ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการชะล้างด้วยกรดและความร้อน (acid-leached and thermal) (Vacassy and Flatt, 2000) กรดไฮโดรคลอริกช่วยละลายสารประกอบที่สามารถละลายออกมาโดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวทำให้ตัวอย่างเถ้าเกลบที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีอัตราส่วนของซิลิกาถึงร้อยละ 98-99 โดยน้ำหนัก

1.3 ประเภทของซิลิกาที่ได้จากการเผาเถ้าเกลบข้าว เพื่อทำการหาความเป็นผลึกเพื่อดูประเภทของซิลิกาในเถ้าเกลบด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) แสดงผลดังภาพที่ 12 ซึ่งเป็นกราฟ X-ray diffractogram พบว่าเถ้าเกลบทุกตัวอย่างซึ่งเป็นซิลิกาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นซิลิกาชนิด ออสันฐาน (amorphous silica) เนื่องจากกราฟแสดงจุดสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 22 องศา โดยสอดคล้องกับไฟล์อ้างอิงของ JCPDS (79-1711) โดยเถ้าเกลบข้าวที่ผ่านการเผาเป็นซิลิกาชนิด ออสันฐานที่มีรอยแยกแตกอยู่ในเนื้อและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (Yalcin and Servinc, 2001)



ภาพที่ 12 X-ray diffractogram ของซิลิกาที่ได้จากการเผาเถ้าเกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน

1.4 ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกา โดยทำการวิเคราะห์จากลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ภาพออกมาดังภาพที่ 13



A: แกลบข้าวที่ไม่ได้ต้มกรดไฮโดรคลอริก (Blank)

B: แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 60 นาที C: แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 120 นาที

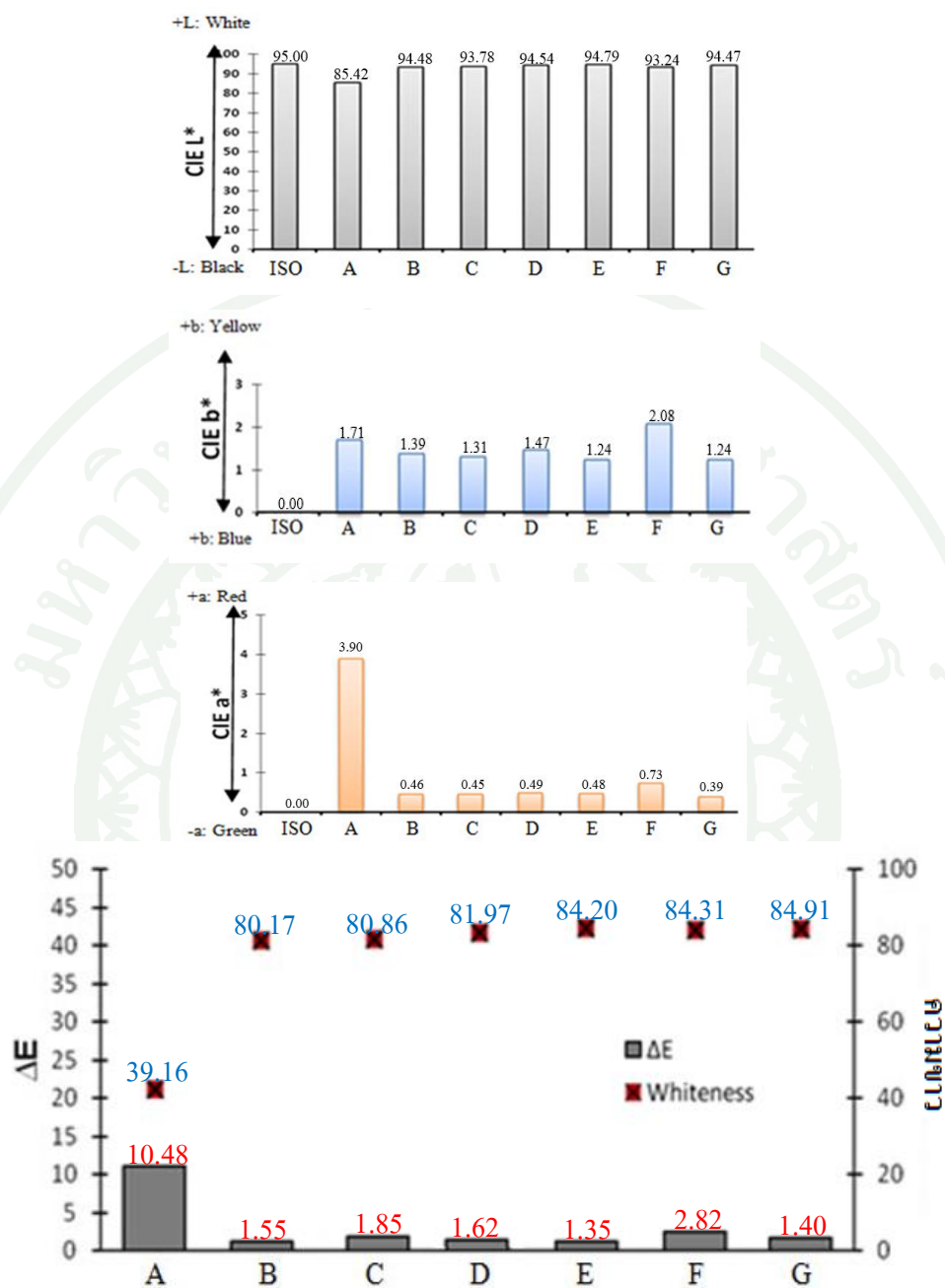
D: แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที E: แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 120 นาที

F : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ 60 นาที G : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ 120 นาที

ภาพที่ 13 ลักษณะพื้นผิวของของซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบข้าว ที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากภาพที่ 13 พบว่า ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ้ำเกลือหรือซัลฟาที่ผ่านการเผาภายใต้การควบคุมอากาศในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 240 นาที โดยทุกภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของถ้ำเกลือที่มีรอยแตกถ้ำและฝุ่นของสารประกอบอื่นที่ติดอยู่ จากภาพที่ 13A เป็นถ้ำเกลือขาวที่ไม่ได้ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริก เมื่อทำการเผา พบว่า บริเวณผิวภายนอกมีเศษถ้ำปกคลุมจำนวนมาก แต่ถ้ำขาวเมื่อต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้เกิดรอยแตกที่ผิวจำนวนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบภาพ 13B, 13D และ 13F ส่วนระยะเวลาในการต้มมีผลต่อปริมาณฝุ่นถ้ำที่ติดค้างบนตัวซัลฟา เพราะถ้ำต้มถ้ำขาวนานมีผลให้ปริมาณฝุ่นที่ติดอยู่ลดลง (13B-13C, 13F-13G) ดังนั้น ถ้ำขาวเมื่อต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นสูงๆ และใช้อุณหภูมิช่วยในการละลายธาตุอื่นที่ไม่ต้องการออก ก็ส่งผลให้ซัลฟาที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์และรอยแตกจำนวนมากขึ้น

1.5 พิกัดสีและความขาวของซัลฟาจากถ้ำโดยทำการ วิเคราะห์ค่าพิกัดสี (CIE L*a*b*) ค่าความแตกต่างสี (delta error, ΔE) และค่าความขาว (whiteness) ซึ่งได้ดังภาพที่ 14 พบว่า ซัลฟาที่ได้จากการเผาถ้ำเกลือขาวที่ไม่ได้ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริก (ตัวอย่าง 10A) มีค่าความแตกต่างสีมากที่สุด เพราะได้ซัลฟาที่มีสีเทาโดยมีค่าความแตกต่างสี เท่ากับ 10.48 โดยช่วงการยอมรับได้ของความแตกต่างสีตามมาตรฐาน ISO 12647-1 สามารถอธิบายได้ดังนี้ กรณีที่มีค่าความแตกต่างสีไม่เกิน 1 แสดงว่าสีไม่มีความแตกต่าง ค่าความแตกต่างสีเกิน 1-2 แสดงว่าสีมีความแตกต่างเล็กน้อยแต่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ค่าความแตกต่างสีเกิน 2-3 แสดงว่าสีมีความแตกต่างแต่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ค่าความแตกต่างสีเกิน 3-4 แสดงว่าสีมีความแตกต่างเล็กน้อย ค่าความแตกต่างสีเกิน 4-10 แสดงว่าเป็นคนละสีแต่ยังอยู่ในเฉดสีเดียวกัน (สีแดงปนส้ม-สีแดงปนเหลือง) และถ้าค่าความแตกต่างสีเกิน 10 แสดงว่าเป็นคนละเฉดสี (สีแดง-สีเหลือง) ซึ่งซัลฟาที่สกัดได้จากการเผาถ้ำเกลือขาวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเกือบทุกตัวอย่างมีค่าพิกัดสีใกล้เคียงกับพิกัดสีขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบ เฟล็กโซกราฟีเพราะมีค่าความแตกต่างสีอยู่ในช่วงระหว่าง 1-2 ซึ่งมีความแตกต่างสีเล็กน้อย ดังนั้นซัลฟาที่ได้จากการเผาถ้ำเกลือขาวที่ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีสีขาว แต่ตัวอย่าง 10E ซึ่งเป็นซัลฟาจากถ้ำขาวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที มีค่าความแตกต่างสีใกล้เคียงกับพิกัดสีขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีมากที่สุด เพราะมีค่าความแตกต่างสีน้อยที่สุดเพียง 1.35



ISO : ISO 12647-6/TIS. 2260-6

B : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 60 นาที

D : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที

F : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ 120 นาที

A : แกลบข้าวที่ไม่ได้ต้มกรดไฮโดรคลอริก (Blank)

C : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ 120 นาที

E : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 120 นาที

G : แกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ 120 นาที

ภาพที่ 14 พิกัดสีและความขาวของซิลิกาที่ได้จากการ เฝ้าแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน และค่าความแตกต่างสี เมื่อทำการเปรียบเทียบกับพิกัดสีและความขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6

จากภาพที่ 14 เมื่อทำการวัดค่าความขาวพบว่า ซิลิกาที่ได้จากการเผาเถ้าแกลบข้าวที่ไม่ได้ผ่านการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกมีค่าความขาวน้อยที่สุดเพียง 39.16 หน่วย เพราะซิลิกาที่สกัดได้มีสีเทา และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมีผลค่าความขาวของซิลิกาที่สกัดได้จากตัวอย่าง 10B-10E มีค่าความขาวเพิ่มขึ้นจาก 80.17 เป็น 84.91 หน่วย โดยซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลาร์ 120 นาที มีค่าความขาวมากที่สุดถึง 84.91 หน่วย แต่การสกัดซิลิกาที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที มีความขาว 84.20 หน่วย ซึ่งใกล้เคียงกับการสกัดซิลิกาที่ใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 3 โมลาร์ ดูได้จากค่าความขาวของตัวอย่าง 10F และ 10G ที่มีความขาวใกล้เคียงกัน แต่ใช้เวลาและความเข้มข้นของกรดที่น้อยกว่า

2. การสกัดซิลิกานาโนจากเถ้าแกลบข้าว

จากการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของซิลิกาที่ได้จากการเผาเถ้าแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมซิลิกาเพื่อใช้เป็นองค์ประกอบในสารเคลือบ พบว่าซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที มีความเหมาะสมนำไปผลิตเป็นสารเคลือบมากที่สุด เพราะเป็นเถ้าแกลบที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก มีรูพรุนและรอยแตกภายในพื้นผิวจำนวนมาก มีค่าพิคตัสใกล้เคียงพิคตัสขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีมากที่สุดเพราะมีความแตกต่างสีน้อยที่สุดเพียง 1.35 และที่สำคัญมีค่าความขาว 84.20 หน่วย ซึ่งใกล้เคียงกับการสกัดโดยใช้กรดความเข้มข้นสูง จึงทำให้วิธีการดังกล่าวเหมาะสมนำไปใช้เตรียมซิลิกาเพื่อนำไปสังเคราะห์เป็นซิลิกานาโนในขั้นตอนต่อไป

วิธีการสังเคราะห์ซิลิกานาโนจากซิลิกาจากการเผาเถ้าแกลบข้าว เป็นการนำซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที ไปสังเคราะห์เป็นวัสดุซิลิกานาโนที่มีขนาดรูพรุนเล็กลงจนถึงระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) (Chiarakorn, 2004) โดยเมื่อทำการสังเคราะห์เป็นซิลิกานาโนแล้วนำไปบดด้วยเครื่องบด (ball mill) ด้วยลูกบดแก้ว ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ในอัตราส่วนลูกบด ต่อ ซิลิกา 30:30 แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ได้ผลดังนี้

2.1 ลักษณะและสีของซิลิกานาโนจากแกลบข้าว โดยเมื่อนำซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่ได้จากการสังเคราะห์ ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะและสีของซิลิกาและซิลิกานาโนจากแกลบข้าวด้วยกล้องถ่ายภาพได้ผลดังแสดงในภาพที่ 15



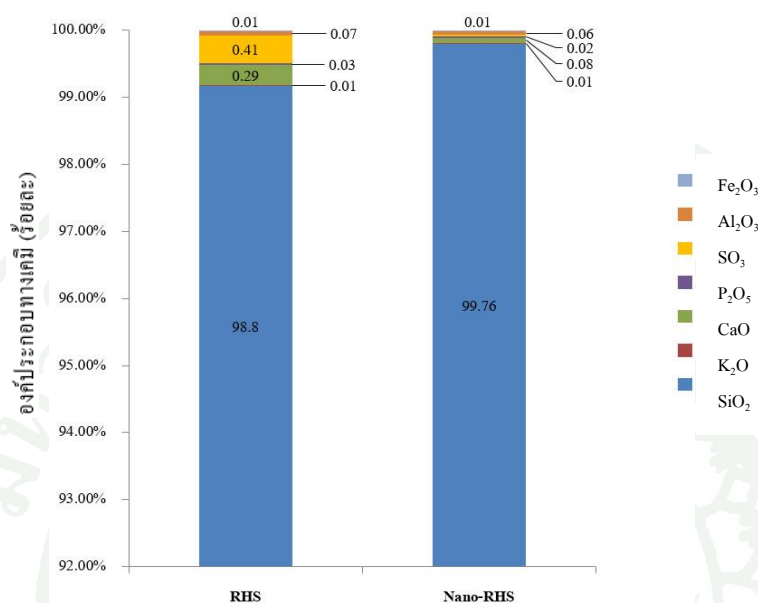
RHS: ซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

Nano-RHS: ซิลิกานาโนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเถ้าแกลบ (ซิลิกา) ที่เตรียมจากแกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 15 ซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เเผาในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง และผงซิลิกานาโนจากแกลบข้าว

จากภาพที่ 15 พบว่า ซิลิกานาโนจากแกลบข้าว (Nano-RHS) มีลักษณะเป็นผงละเอียดมากขึ้น มีสีเปลี่ยนไปจากซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบซิลิกอนเดิมเล็กน้อย แต่ยังคงลักษณะเป็นผงสีขาวเช่นเดิม เมื่อสังเกตใกล้ๆ พบว่าผงของซิลิกามีลักษณะเล็กลงกว่าเดิมอย่างเห็นได้ชัดเจน อีกทั้งเมื่อสัมผัสตัวผงซิลิกานาโนจากแกลบข้าวพบว่ามีความละเอียดมากกว่าซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบ ซึ่งเป็นผลมาจากซิลิกามีการจัดเรียงตัวใหม่ในขั้นตอนการสังเคราะห์ โดยซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบข้าวในตอนแรกเกิดจากการหลอมและรวมตัวขึ้นเป็นอนุภาคซิลิกาที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุ MCM-41 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอีกครั้งจากที่เป็นของแข็งไปเป็นสารละลายและไปเกาะติดกับสารแม่แบบ CTAB ที่เตรียมไว้ จากนั้นเมื่อนำไปเผาเพื่อกำจัดสารกำหนดรูปแบบทำให้คงเหลือแต่ซิลิกาที่มีการจัดเรียงตัวกันอยู่อย่างหลวมๆ คล้ายรังผึ้ง เมื่อนำไปบดสามารถแตกตัวได้ง่าย เป็นผงซิลิกาที่มีขนาดเล็กระดับนาโนจำนวนมาก (Chiarakorn S., 2004)

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกานาโนจากแกลบข้าว ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) แสดงดังภาพที่ 16



RHS: ซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

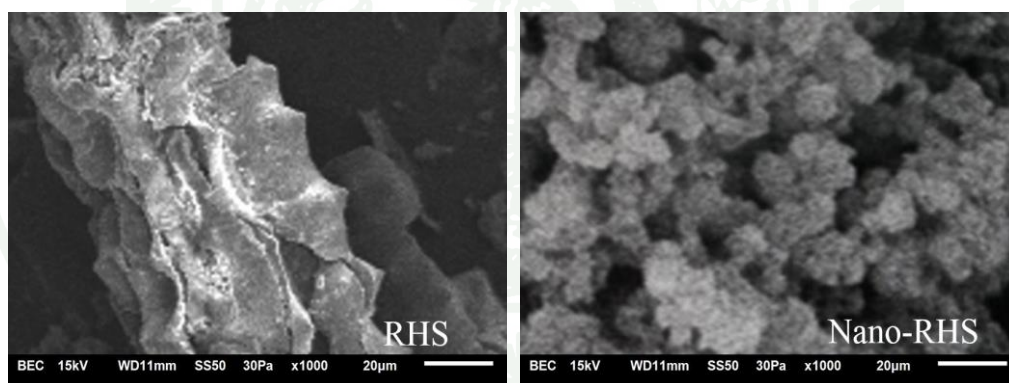
Nano-RHS: ซิลิกานาโนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเถ้าแกลบ (ซิลิกา) ที่เตรียมจากแกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที และเถ้าที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 16 ปริมาณของธาตุและความบริสุทธิ์ของซิลิกานาโน (MCM-41) และซิลิกาจากแกลบข้าวที่เตรียมจากแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เเผาในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง

จากภาพที่ 16 พบว่าซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีปริมาณของ ซิลิกอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 98.80 เป็น 99.76 และปริมาณของสารประกอบอื่นที่ปนเปื้อนอยู่ก็มีปริมาณลดลง ทั้งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P₂O₅) ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ (SO₃) แต่ยกเว้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และเหล็ก (Fe₂O₃) ที่คงเหลือในปริมาณเท่าเดิม เนื่องจากสารประกอบทั้งคู่มิมีความทนทานต่อสารเคมีและความร้อนสูง สาเหตุที่ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบข้าวให้เป็นซิลิกานาโน มีการเปลี่ยนซิลิกาให้เป็นสารละลายซิลิกาด้วยสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบส (pH มากกว่า 7) ทำให้สารประกอบบางชนิดที่ไม่ละลายในสารดังกล่าวตกตะกอน และใช้สารเฮกซะไดซิด ไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์

(CTAB) เป็นสารกำหนดโครงร่าง (template) ช่วยกระบวนการขึ้นรูปใหม่ โดยมีขั้นตอนในการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) กับสารละลาย CTAB เข้าด้วยกัน มีการปรับค่าความเป็นด่างของสารละลายให้มีค่า pH เท่ากับ 10 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก สารบางตัวที่ละลายในกรดก็ละลายตัวเพิ่ม เช่น แคลเซียมออกไซด์ลดลงจากเดิมร้อยละ 0.29 เป็น 0.08 อีกทั้งเมื่อซิลิกาขึ้นรูปใหม่แล้วทิ้งให้ตกตะกอนแล้วนำไปล้างด้วยเอทานอล แล้วนำไปเผาในเตาอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อขจัด CTAB ออก จากกระบวนการดังกล่าวทั้งหมดจึงทำให้สารประกอบอื่นๆ ที่ตกค้างอยู่ในเถ้าเคลือบสามารถละลายออกมาหรือละลายตัวได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการชะล้างโดยสารเคมีและความร้อน (Grisdanurak *et al.*, 2003) ดังนั้นซิลิกานาโนจากเถ้าเคลือบข้าวที่สังเคราะห์ได้จึงมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2.3 ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกานาโนจากเถ้าเคลือบข้าว ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกานาโนจากเถ้าเคลือบข้าว ด้วยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังภาพที่ 17



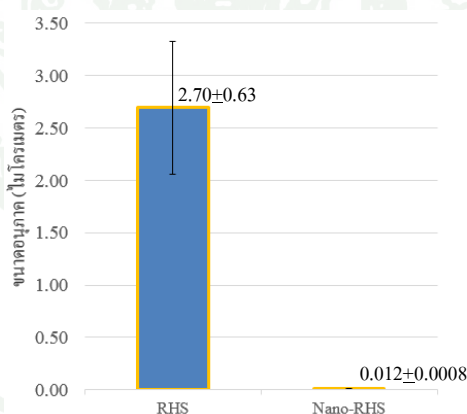
RHS: ซิลิกาที่ได้จากการเผาเถ้าเคลือบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

Nano-RHS: ซิลิกานาโนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเถ้าเคลือบ (ซิลิกา) ที่เตรียมจากเถ้าเคลือบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 17 ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของของซิลิกาจากเถ้าเคลือบข้าวและซิลิกานาโนจากเถ้าเคลือบข้าวที่เตรียมจากเถ้าเคลือบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เเผา ในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง โดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากภาพที่ 17 ใช้กำลังขยายภาพ 1,000 เท่า ภาพซิลิกานาโนจากเกลบข้าว (Nano-RHS) แสดงลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วย เฮกซะไดซิล ไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์ (CTAB) พบว่าซิลิกาที่ได้มีการขึ้นรูปโครงสร้างใหม่และมีจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้น และขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กลง โดยลักษณะที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากกระบวนการขึ้นรูปโครงสร้างและการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแม่แบบของสาร CTAB เพราะเมื่อซิลิกาละลายเป็นสารละลายซิลิกาและเข้าทำปฏิกิริยากับสารละลาย CTAB มีการขึ้นรูปใหม่โดยมีลักษณะโครงสร้างเหมือนรังผึ้ง (Grisdanurak *et al.*, 2003) และเมื่อเผาในเตาที่ควบคุมปริมาณอากาศ (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อขจัด CTAB ออกเหลือแต่ซิลิกาที่มีรูปร่างเหมือนรังผึ้ง เมื่อนำไปบดด้วยลูกบดแก้ว ขนาด 2-3 มิลลิเมตรในเครื่องบด (ball mill) เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้ซิลิกานาโนที่สังเคราะห์แตกตัวออกจากกันได้ง่าย กลายเป็นซิลิกาที่มีอนุภาคขนาดเล็กและประกอบไปด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาที่เผาจากเกลบข้าวกับซิลิกานาโนจากเกลบข้าวพบว่าขนาดอนุภาคและรูพรุนของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมีขนาดเล็กกว่า

2.4 ขนาดอนุภาคของซิลิกานาโนจากเกลบข้าว จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD) ได้ผลดังภาพที่ 19



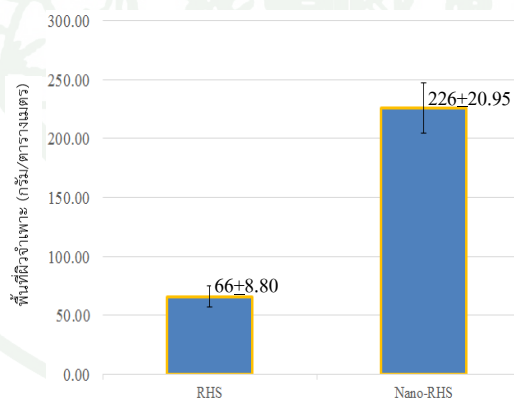
RHS: ซิลิกาที่ได้จากการเผาเกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

Nano-RHS: ซิลิกานาโนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเกลบ (ซิลิกา) ที่เตรียมจากเกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 18 ขนาดอนุภาคของซิลิกาจากเกลบข้าวและซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่เตรียมจากเกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เผาในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PSD

จากภาพที่ 18 แสดงค่ากราฟของขนาดอนุภาคพบว่าซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วย เฮกซะไดซิล ไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์ (CTAB) มีขนาดเล็กลง โดยเป็นผลมาจากโครงสร้างของซิลิกาที่สังเคราะห์มีลักษณะเหมือนรังผึ้งที่มีรูเชื่อมต่อกันภายในจำนวนมาก ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน อีกทั้งมีการเชื่อมต่อกันด้วยโครงสร้างภายในเป็นซิลิกอน ที่มีความหนาเพียง 10 อังสตรอม (Grisdanurak *et al.*, 2003) ทำให้มีความแข็งแรงต่ำ เวลาบดด้วยลูกแก้วในเครื่องบด จึงทำให้แตกตัวเป็นอนุภาคนาโนขนาดเล็กได้ง่าย ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยลำแสงเลเซอร์พบว่าซิลิกาจากเกลบข้าวที่สกัดได้จากที่ได้จากการเผาเกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที และเผาที่ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง มีขนาดอยู่ที่ประมาณ 2.7 ± 0.6344 ไมโครเมตร แต่ซิลิกานาโนที่สังเคราะห์จากการจัดเรียงโครงสร้างกับสาร CTAB มีขนาดอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 0.012 ± 0.0008 ไมโครเมตร หรือสามารถเรียกได้ว่าเป็นซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่สังเคราะห์ได้มีขนาดประมาณ 12 นาโนเมตร

2.5 ปริมาตรของรูพรุนซิลิกานาโนและพื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิกานาโนจากเกลบข้าว โดยวิเคราะห์จากความสามารถในการดูดซับปริมาตรก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในตัวอนุภาค (BET method) ได้ผลแสดงดังภาพที่ 19



RHS: ซิลิกาที่ได้จากการเผาเกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

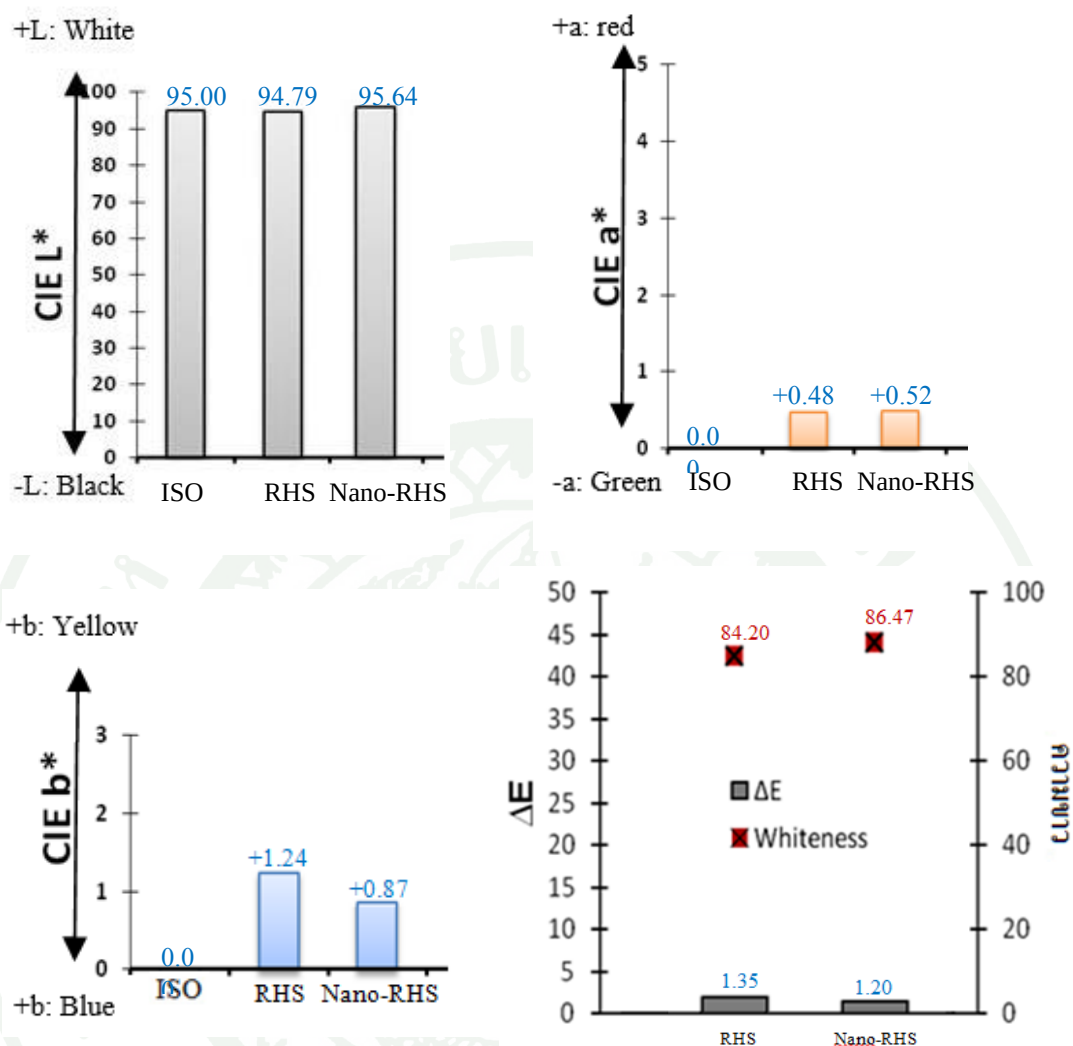
Nano-RHS: ซิลิกานาโนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเถ้าเกลบ (ซิลิกา) ที่เตรียมจากเกลบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 60 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 19 ขนาดอนุภาคของซิลิกาจากเกลบข้าวและซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่เตรียมจากเกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เเผาในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET method

จากภาพที่ 19 พบ ว่าซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 226 ± 21 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาที่ได้จากการเผาแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที และเผาที่ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 66 ± 8.8 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นผลมาจากซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่สกัดด้วยการสังเคราะห์วัสดุเมโซพอร์ ชนิด MCM-41 มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากเนื่องจากซิลิกามีการจัดเรียงตัวโครงสร้างใหม่กันอย่างหลวมๆ ตามสารกำหนดแม่แบบ CTAB และเมื่อเผากำจัดสารกำหนดแม่แบบออกไปให้เหลือไว้แต่ซิลิกาที่มีการจัดเรียงตัวแบบรังผึ้ง ที่มีทั้งช่องว่างและรูพรุนบริเวณผิวภายนอกและช่องว่างในตัวอนุภาคซิลิกาหรือรูพรุนภายใน โดยรูพรุนที่เกิดมีขนาด 2-50 นาโนเมตร ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับจัดอยู่ในไอโซเทอร์ม 4 (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978) ที่มีความสามารถในการดูดซับได้มากและเมื่อนำมาบดทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายเกิดรูพรุนภายนอกเพิ่มขึ้นอีก จึงทำให้ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าซิลิกาที่สกัดจากการเผาแกลบข้าวถึง 3.5 เท่า

2.6 พิกัดสีและความขาวของซิลิกานาโนจากแกลบข้าว และคำนวณค่าความแตกต่างสี ของซิลิกาจากการเผาแกลบและซิลิกานาโนที่เตรียมมาจากแกลบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที และเผาที่ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ได้ผลแสดงในภาพที่ 20 พบว่าซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่สังเคราะห์ได้มีค่าความแตกต่างสีเมื่อเทียบกับพิกัดสีขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเพล็กโซกราฟีน้อยกว่าซิลิกาจากแกลบข้าวเพราะมีค่าความแตกต่างสีเท่ากับ 1.20 ซึ่งค่าความแตกต่างสีที่เกิน 1-2 แสดงว่าสีมีความแตกต่างเล็กน้อยแต่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน (Hunt, 2004) ซึ่งเหตุที่ค่าความแตกต่างสีต่ำลงเมื่อเทียบกับซิลิกาจากแกลบข้าว เนื่องจากซิลิกานาโนที่สังเคราะห์จากซิลิกาจากแกลบข้าวมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้นโดยสามารถดูจาก XRF ดังนั้นพิกัดสีขาวของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวจึงเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นสังเกตจากค่าพิกัด L^* ที่เป็นค่าบอกถึงความสว่างมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 94.79 หน่วย เป็น 95.64 หน่วย ดังนั้นค่าความแตกต่างจึงลดลงจาก 1.35 เป็น 1.20

จากการวัดค่าพิกัดสีเพื่อคำนวณหาความขาวพบว่า ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่สังเคราะห์ได้มีค่าความขาวมากที่สุด คือมีความขาว 86.47 หน่วย และมีค่าความขาวมากกว่าซิลิกาจากแกลบข้าวที่มีค่าความขาว 84.20 หน่วยโดยค่าความขาวที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากความบริสุทธิ์ที่เพิ่มมากขึ้นของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่สังเคราะห์ได้ โดยความบริสุทธิ์สามารถดูได้จากค่า XRF และค่าพิกัด L^* ที่เป็นค่าบอกถึงความสว่างของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่มีค่าเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 20



ISO: ISO 12647-6/TIS. 2260-6

RHS: ซิลิกาที่ได้จากการเผาเคลือบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 120 นาที ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

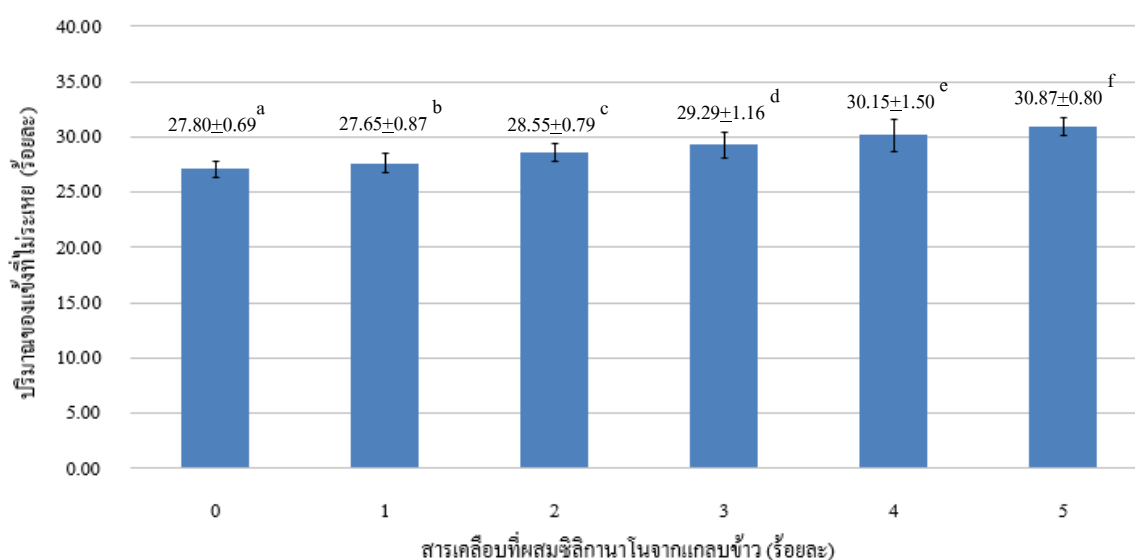
Nano-RHS: ซิลิกานาโนที่ได้จากการสังเคราะห์จากเถ้าเคลือบ ที่เตรียมจากเคลือบข้าวที่ต้มกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 120 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 20 ค่าพิกัดสีและค่าความขาวของซิลิกาจากเคลือบข้าวและซิลิกานาโนจากเคลือบข้าวที่เตรียมจากเคลือบข้าวที่ต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ 120 นาที เฝานในอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง และค่าความแตกต่างสีเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าพิกัดสีและความขาวของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6

3. การผลิตสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าว

ซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่สังเคราะห์ได้มีความเหมาะสมนำไปผลิตเป็นสารเคลือบกระดาษมากกว่าซิลิกาจากเกลบข้าวเนื่องจากมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 99 มีจำนวนรูพรุนที่พื้นผิวจำนวนมาก อีกทั้งรูพรุนก็มีขนาดเล็กลง มีค่าพิคตัสโกสใกล้เคียงกับพิคตัสโกสของมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีเพิ่มมากขึ้น เพราะมีค่าความแตกต่างสีลดลงจาก 1.35 เป็น 1.20 และยังมีค่าความขาวมากที่สุดถึง 86.47 หน่วย และขนาดอนุภาคที่เล็กถึง 12 นาโนเมตร จึงส่งผลให้ซิลิกานาโนจากเกลบข้าวเหมาะสมไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคลือบผิวกระดาษ จากนั้นนำซิลิกานาโนจากเกลบข้าวผสมลงไปในสารเคลือบในอัตราส่วนร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซิน ได้สารเคลือบที่มีลักษณะใสสีเหลืองอ่อน จากนั้นเคลือบสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ลงบนกระดาษกราฟต์ขาวสำหรับทำผิวน้ำกระดาษลูกฟูก (liner board paper) ขนาด 170 แกรม ด้วยเครื่องเคลือบระบบลูกกลิ้งกราเวียร์ (gravure roll coating) ที่รายละเอียด 23.5 เส้นต่อเซนติเมตร ด้วยความเร็ว 10 เมตรต่อนาที และเป่าแห้งด้วยลมร้อน 120 องศาเซลเซียส เพื่อให้ชั้นของสารเคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวทำหน้าที่เป็นชั้นรองพื้น (primer) เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการรับหมึกพิมพ์ได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้ผลดังนี้

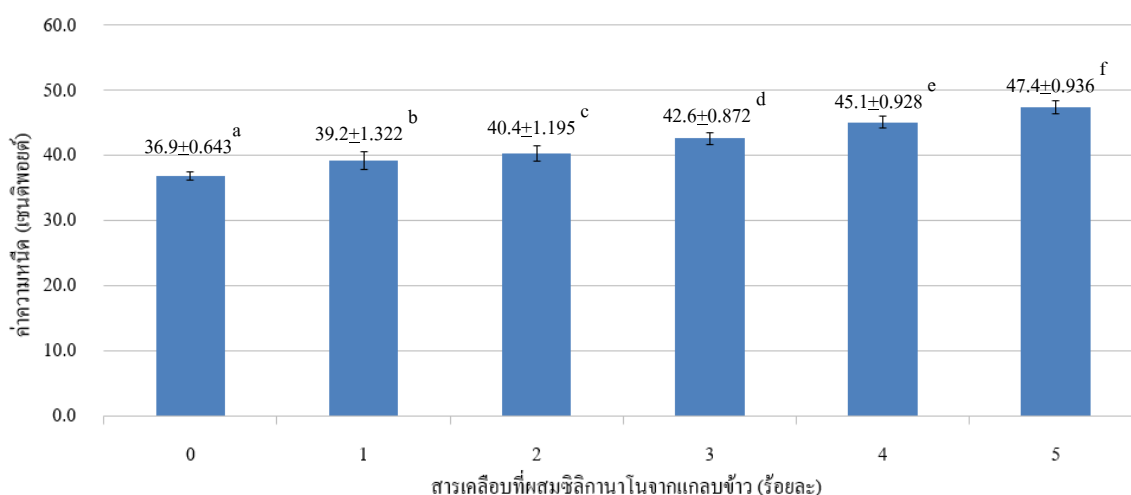
3.1 ปริมาณของแข็งเพื่อหาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของสารเคลือบเมื่อแห้งตัว เป็นการวิเคราะห์ดูปริมาณของแข็งที่ไม่ระเหย (solid content) เพื่อคำนวณการใช้ลูกกลิ้งสำหรับเคลือบให้เหมาะสมกับตัวของสารเคลือบ และการนำไปใช้ในงานพิมพ์จริง ได้ผลแสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ของแข็งที่ไม่ระเหยตัวของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 21 พบว่าปริมาณของแข็งที่ไม่ระเหยของสารเคลือบที่มีเพียงเรซินมีค่าเท่ากับร้อยละ 27.08±0.69 ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่ระเหยตัวที่เกิดจากน้ำหนักของตัวเรซินเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อเติมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซิน ทำให้ปริมาณของแข็งไม่ระเหยเพิ่มขึ้นเป็น 27.65±0.87, 28.55±0.79, 29.29±1.16, 30.15±1.50 และ 30.87±0.80 ตามลำดับซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$) เนื่องจากซิลิกานาโนจากแคลบข้าวเป็นสารที่ทนความร้อนสูงเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงกว่า 220 องศาเซลเซียส (Dutch., 2001) การอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสจึงไม่ทำให้ซิลิการะเหยหรือสลายตัวออกไปจึงทำให้น้ำหนักตกค้างในสารเคลือบเมื่อแห้งตัวเพิ่มขึ้น และในการอบแห้งกระดาษในกระบวนการเคลือบผิวหรือการพิมพ์กล่องกระดาษถูกผูกชนิดพิมพ์เสร็จแล้วค่อยประกบกับลอน (pre-print) ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งไม่เกิน 160 องศาเซลเซียส (พรชัย, 2547) ดังนั้นสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวจึงไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิในการผลิตดังกล่าว

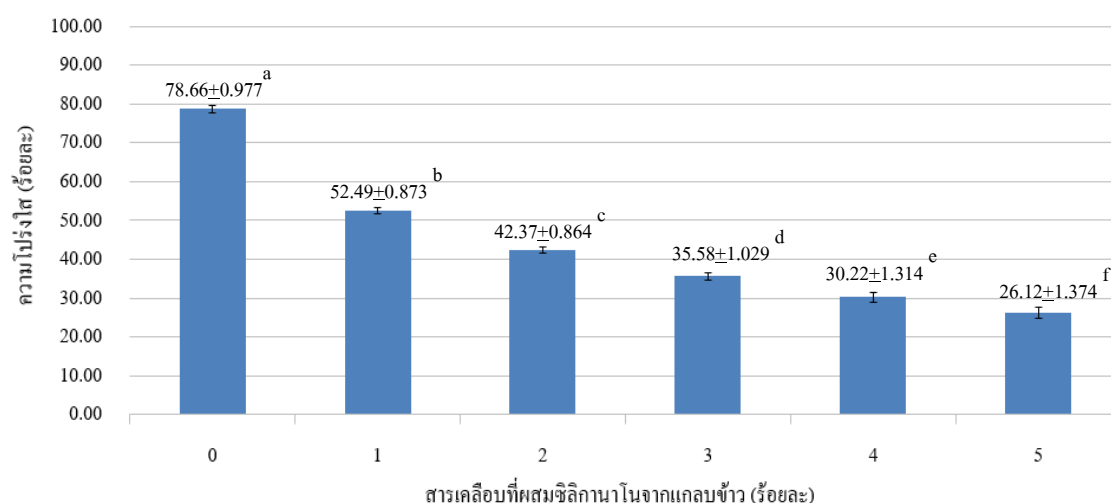
3.2 ความหนืดของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าว เป็นการวิเคราะห์ค่าความหนืดด้วยเครื่องวัด Brookfield ตามวิธีของ ASTM D2196-10 ได้ผลแสดงดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ความหนืดของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 22 พบว่าเมื่อเติมปริมาณอัตราส่วนของซิลิกาเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลง ซึ่งอุตสาหกรรมการพิมพ์นิยมผลิตสารเคลือบให้มีค่าความหนืด อยู่ที่ 12-16 วินาที เมื่อใช้อุปกรณ์ด้วยวัดความหนืดชานคัพเบอร์ 3 ที่ 25 องศาเซลเซียส (Felxographic Ink, 2007 และ Celanese chemicals, 2007) โดยถ้าความหนืดของสารเคลือบน้อยหรือมากเกินไปส่งผลให้ไม่สามารถเคลือบได้ ซึ่งสารเคลือบทุกสูตรมีค่าความหนืดเมื่อวัดด้วยถ้วยวัดความหนืดชานคัพเบอร์ 3 ที่ 25 องศาเซลเซียส เหลืออยู่ที่ 12-15 นาที แต่เมื่อใช้เครื่อง Brookfield วัดความหนืดพบว่าสารเคลือบที่ไม่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมีค่าความหนืดอยู่ที่ 36.9 เซนติพอยด์ (cp) แต่เมื่อเติมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวลงไปค่าความหนืดเพิ่มขึ้น จากกราฟในภาพที่ 22 พบว่าสารเคลือบที่เติมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่ร้อยละ 0-5 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าความหนืดอยู่ที่ 36.9±0.643, 39.2±1.322, 40.4±1.195, 42.6±0.872, 45.1±0.928 และ 47.4±0.936 เซนติพอยด์ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.0001$) โดยสาเหตุที่สารเคลือบมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่กระจายตัวอยู่ในสารเคลือบมีผลทำให้ปริมาณของแข็งที่ไม่ระเหยในสารเคลือบสูงขึ้น (Mariz *et al.*, 2011) ดังกราฟในภาพที่ 21 ดังนั้นยังมีปริมาณอัตราส่วนของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมากขึ้นก็ทำให้ค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้น

3.3 ลักษณะความโปร่งใส (transparency) ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนการผสมต่างๆ เมื่อนำมาวัดค่าความโปร่งใส ตามวิธีของ ASTM D1003-11e1 ได้ผลแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ความโปร่งใสของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 23 สารเคลือบฐานน้ำที่มีส่วนผสมของเรซินลาเท็กซ์ไดรีนบิวตาไดอิน (BASF : Joncryl 678) เมื่อละลายน้ำได้สารเคลือบที่มีค่าความโปร่งใสร้อยละ 78.66 แต่เมื่อเติมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวส่งผลให้ค่าความโปร่งใสเปลี่ยนแปลง เนื่องจากซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่สังเคราะห์มีอนุภาคขนาดเล็กและน้ำนักเบาสามารถกระจายตัวได้ดีในสารเคลือบ (Fujita *et al.*, 2011) อีกทั้งอนุภาคของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีประสิทธิภาพในการขัดขวางทางเดินแสงและทำให้แสงที่ส่องผ่านสารเคลือบเกิดการกระกระเจิงและเปลี่ยนแปลงทิศทางจึงทำให้ค่าความโปร่งใสในสารเคลือบลดลง (Rosário *et al.*, 2009) โดยดูได้จากสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักรเรซิน มีความโปร่งใสอยู่ที่ 52.49 ± 0.873, 42.37 ± 0.864, 35.58 ± 1.029, 30.22 ± 1.314 และ 26.12 ± 1.374 ตามลำดับ โดยถ้าความใสลดลงเมื่อนำไปเคลือบส่งผลให้ค่าสีของกระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความโปร่งใสของสารเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$) และมีแนวโน้มตามกราฟที่แสดงในภาพที่ 23

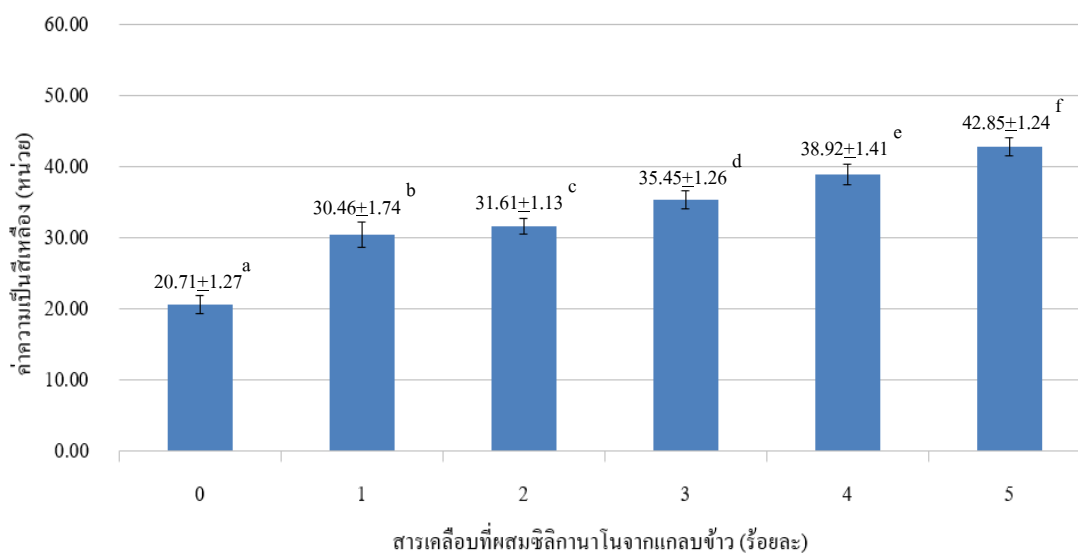
3.4 ค่าพิกัดสีและความเป็นสีเหลือง (yellowness) ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจาก แกลบข้าว โดยนำสารเคลือบทุกสูตรมาวิเคราะห์ค่าพิกัดสีด้วยอุปกรณ์วัดค่าพิกัดสีของเหลว CIE $L^*a^*b^*$ (ISO 11664-4, 2008 และ CIE S 014-4/E, 2007) ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 พิกัดสี CIE $L^*a^*b^*$ ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

ตัวอย่าง	วัดค่าพิกัดสีเฉลี่ย (CIE*)		
	L^*	a^*	b^*
สารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 0	92.81	-0.88	+11.54
สารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 1	79.24	+0.35	+14.64
สารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 2	72.71	+0.24	+14.25
สารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 3	67.84	+0.27	+15.30
สารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 4	63.54	+0.26	+26.14
สารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 5	59.97	+0.18	+27.27

จากตารางที่ 6 พบว่าซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีผลต่อค่าสีของตัวสารเคลือบที่ผลิตได้ เพราะเมื่อมีการเติมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวส่งผลให้ค่าพิกัดสีของสารเคลือบเปลี่ยนแปลง โดยสารเคลือบที่มีแต่เรซินมีค่าสีอยู่ที่พิกัด $L^*=92.81$ $a^*=-0.88$ $b^*=+0.87$ แต่เมื่อมีการเติมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในอัตราส่วนร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซินทำให้ค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลง เท่ากับ 79.24, 72.71, 67.84, 63.54 และ 59.92 สาเหตุที่ค่าความสว่างลดลงเนื่องจากซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีอนุภาคนาโนขนาดเล็กและสามารถกระจายตัวได้ดี (Fujita et al., 2011) จึงทำให้ค่าความโปร่งใสของสารเคลือบลดลงตามกราฟในภาพที่ 23 ส่งผลให้สารเคลือบมีความทึบแสงเพิ่มมากขึ้น ค่าความสว่างของสารเคลือบที่วัดได้ลดลงตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อค่าความสว่างลดลงส่งผลให้พิกัดสีแดง-เขียวหรือค่า a^* และค่าพิกัดเหลือง-น้ำเงินหรือค่า b^* เปลี่ยนแปลง

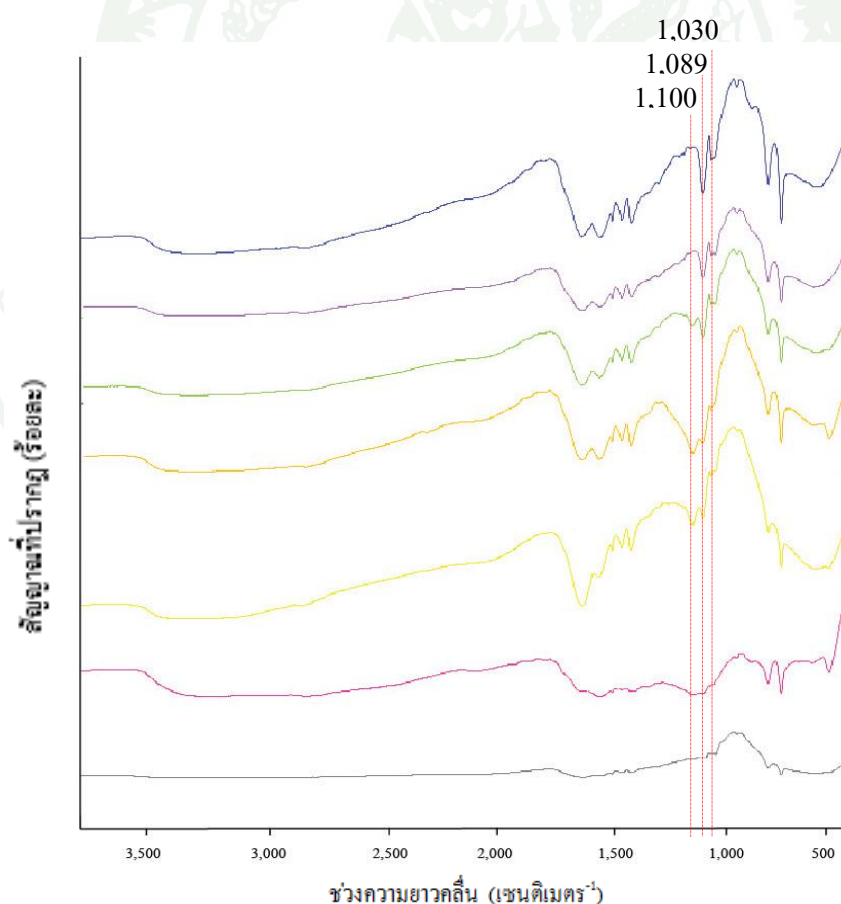
เมื่อนำค่าพิกัดสี (CIE L*a*b*) ที่วัดได้มาคำนวณค่าความเป็นเหลืองค่า yellowness (ASTM E313-10) ได้ผลแสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ความเป็นเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้มหรือค่า yellowness ของสารเคลือบที่ผสม ซีลีกันนาโนจากกลีบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 24 พบว่า สารเคลือบที่มีแต่เรซินมีค่าความใกล้เคียงสีเหลืองอ่อนมากที่สุด เนื่องจากมีค่า yellowness เท่ากับ 20.71 แต่เมื่อเติมซีลีกันนาโนจากกลีบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซิน ค่า yellowness เพิ่มขึ้นเท่ากับ 30.46 ± 1.74 , 31.61 ± 1.13 , 35.45 ± 1.26 , 38.92 ± 1.41 และ 42.85 ± 1.24 ตามลำดับและเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$) เพราะการเติมซีลีกันนาโนจากกลีบข้าวลงไปในสารเคลือบเหมือนเป็นการเติมผงสีขาวลงไป ส่งผลสารเคลือบเกิดความขุ่นและทึบแสงมากขึ้น (Maria do Rosário *et al.*, 2009) ทำให้มองเห็นสารเคลือบมีสีเหลืองเข้มเพิ่มขึ้น โดยค่าสีเหลืองที่เพิ่มขึ้นสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าพิกัดเหลือง-น้ำเงิน (b^*) ที่มีเพิ่มขึ้นจาก +14.64 ไปเป็น +27.27 ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 6

3.5 ชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวทุกอัตราส่วนด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ได้ผลแสดงดังภาพที่ 25 พบว่า เรซินที่นำมาผลิตเป็นสารเคลือบเป็นชนิดอะคลิริกเรซินชนิดลาเท็กซ์ไดรินบิวตาไดอิน (BASF:J678) เมื่อผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในอัตราส่วนต่างๆ พบหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา (Si-O) เพราะแสดงพิกกราฟที่ชัดเจนที่ความยาวคลื่น 1,030 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการยืดหดของพันธะซิลิกากับออกซิเจนแบบไม่สมมาตร (asymmetric Si-O-Si stretching) (Liu *et al.*, 2008) ส่วนพิกกราฟที่ 1,089 เซนติเมตร⁻¹ เป็นหมู่ฟังก์ชันของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เชื่อมกันด้วยพันธะเดี่ยว (Si-O-Si) (Liu *et al.*, 2012) และที่พิก 1,100 เซนติเมตร⁻¹ แสดงพันธะเดี่ยวของซิลิกอนกับออกซิเจนแบบยืด (Si-O-Si stretching) (Cheng *et al.*, 2008) โดยการพบหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาในสารเคลือบเมื่อแห้งตัว แสดงว่า ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวไม่ทำปฏิกิริยากับเรซินในสารเคลือบเพียงแค่แขวนลอยและกระจายตัวอยู่ในสารเคลือบเท่านั้น



ภาพที่ 25 FT-IR เสปคตรัมของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

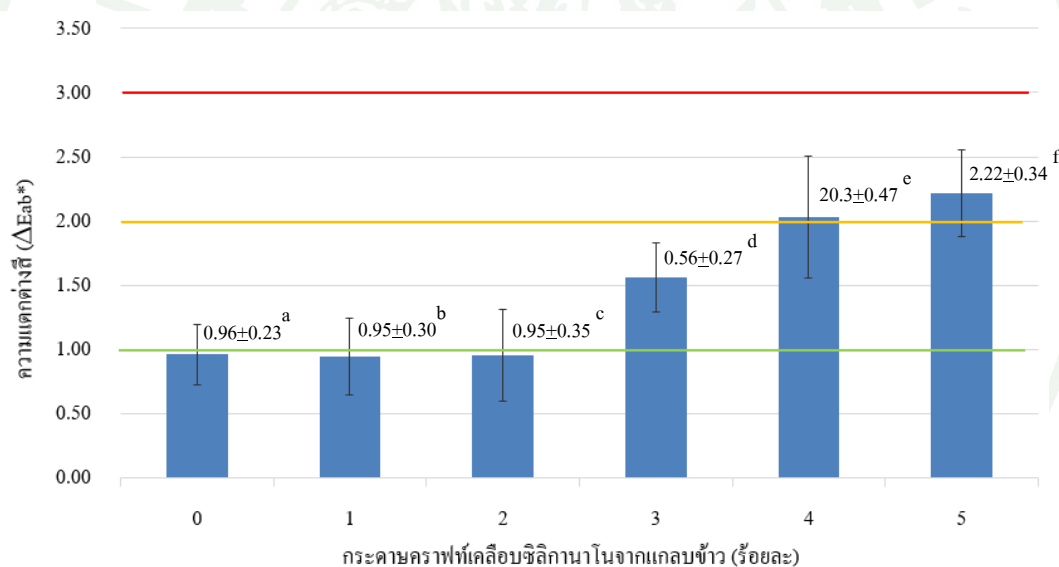
3.6 ค่าพิกัดสีของกระดาษที่เคลือบสารที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าว เมื่อนำกระดาษกราฟด์ขาว 170 กรัมต่อตารางเมตร มาเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ได้ค่าสีดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าพิกัดสี CIE L*a*b* ของกระดาษกราฟด์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

ตัวอย่าง	วัดค่าพิกัดสีเฉลี่ย (CIE*)		
	L*	a*	b*
มาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6	≥ 88.00	0.00 ± 3	0.00 ± 5
กระดาษกราฟด์ขาว 170 กรัมต่อตารางเมตร	95.06	+0.58	+3.85
กระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 0	95.07	+0.32	+4.71
กระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 1	94.27	+0.52	+3.78
กระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 2	94.20	+0.60	+3.84
กระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 3	93.66	+0.51	+3.85
กระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 4	93.57	+0.42	+5.21
กระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 5	93.45	+0.28	+5.32

มาตรฐานในเรื่องวัสดุที่นำมาพิมพ์งานระบบเฟล็กโซกราฟีประเภทกระดาษเคลือบผิว (coated paper) กำหนดให้มีค่าพิกัดสีอยู่ในช่วง $L^* \geq 88$ $a^* = -3$ ถึง $+3$ $b^* = -5$ ถึง $+5$ ดังนั้นกระดาษกราฟด์ขาวที่นำมาใช้จึงเป็นกระดาษที่อยู่ในข้อกำหนดดังกล่าว เนื่องจากมีค่าพิกัดสีอยู่ที่ $L^* = 95.06$ $a^* = +0.58$ $b^* = +3.85$ โดย เมื่อนำมาเคลือบสารที่มีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวทำให้พิกัดสีของกระดาษเปลี่ยนแปลง พบว่าที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 4 ของน้ำหนักรีซิน มีค่าพิกัด b^* อยู่ที่ $+5.21$ และที่ร้อยละ 5 ของน้ำหนักรีซิน มีค่าพิกัด b^* อยู่ที่ $+5.32$ ซึ่งทำให้กระดาษทั้งสองไม่อยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานการพิมพ์เฟล็กโซกราฟีที่ระบุไว้ให้ค่า b^* ไม่เกิน ± 5 และจากค่าความสว่าง (lightness, L^*) ในตารางที่ 7 พบไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากสารเคลือบที่ใช้เป็นเรซินที่มีความใสและเคลือบผิวหน้ากระดาษหนาเพียง 4-5 ไมโครเมตร แต่สารเคลือบที่มีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวทำให้ความสว่างลดลงโดยดูได้จากค่า L^* ที่มีค่าลดลงจาก 94.27, 94.20, 93.66, 93.57 และ 93.45 เมื่อเติมอัตราส่วนซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักรีซิน ตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของซิลิกานาโนสามารถกระจายตัวได้ดี (Fujita et al., 2011) จึงทำให้ความโปร่งใส

ของสารเคลือบลดลงตามกราฟในภาพที่ 24 เมื่อนำไปเคลือบที่ผิวหน้าของกระดาษแล้วทำให้กระดาษที่เคลือบมีความสว่างลดลงตามไปด้วย ส่วนสีเหลืองของกระดาษที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการเคลือบสาร เนื่องจากสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีค่า yellowness เพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของซิลิกานาโนจากแกลบที่ผสมลงไปตามกราฟในภาพที่ 23 ดังนั้น เมื่อนำไปเคลือบผิวกระดาษกราฟต์จึงทำให้สีของกระดาษเปลี่ยนแปลง โดยดูจากค่าพิกัด b^* ในตารางที่ 7 พบว่ากระดาษที่เคลือบสารที่ไม่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีค่า $b^* = +4.71$ แต่เมื่อเคลือบสารที่มีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในอัตราส่วนร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซิน ทำให้ค่าพิกัด b^* มีค่าเพิ่มขึ้นจาก +3.78, +3.84, +3.85, +5.21 และ +5.32 ตามลำดับ ซึ่งค่าสีของกระดาษกราฟต์ขาวเมื่อผ่านการเคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดเป็นผลมาจากสีของเรซินและสีของผงซิลิกานาโนจากแกลบข้าว และเมื่อนำค่าพิกัดสีไปคำนวณค่าความแตกต่างสีได้ผลดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ความแตกต่างสีของกระดาษกราฟต์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ เปรียบเทียบกับกระดาษกราฟต์ขาวที่ไม่ได้เคลือบผิว

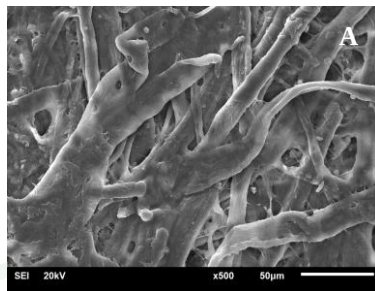
จากภาพที่ 26 แสดงค่าความแตกต่างสีจากการคำนวณค่าพิกัดสี CIE $L^*a^*b^*$ ของกระดาษกราฟต์ขาวจากตารางที่ 7 พบว่ากระดาษที่เคลือบสารเคลือบอย่างเดียวกและที่มีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าความแตกต่างสี 0.95 ± 0.30 และ 0.95 ± 0.35 เมื่อเทียบกับกระดาษกราฟต์ขาวที่ไม่ได้เคลือบ ซึ่งความแตกต่างสีไม่ถึง 1 จัดว่าเป็นวัสดุที่มีสีเดียวกันไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ (Hunt, 2004) ซึ่งสาเหตุที่ค่าความแตกต่างสีของ

กระดาษต่ำกว่า 1 เนื่องจากในกระบวนการเคลือบกระดาษกราฟต์เลือกใช้เรซินที่มีค่าความใสสูงเคลือบสารเคลือบให้มีความหนาของชั้นฟิล์มเมื่อแห้งตัวหนา 4-5 ไมโครเมตร และมีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กมากและกระจายตัวได้ดี จึงส่งผลให้เกิดความแตกต่างสีที่เกิดขึ้นกับตัวกระดาษกราฟต์ต่ำ ส่วนกระดาษกราฟต์ที่ผ่านการเคลือบสารที่มีการเติมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 3 มีค่าความแตกต่างสี 1.56 สำหรับความแตกต่างสี 1-2 จัดว่าเป็นวัสดุที่มีสีคล้ายกัน แต่กระดาษกราฟต์ที่ผ่านการเคลือบสารที่มีการเติมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 4 ของปริมาณน้ำหนักเรซิน มีค่าความแตกต่างสี 2.03 ± 0.47 และที่ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเรซินมีค่าความแตกต่างสี 2.22 ± 0.34 ซึ่งจัดว่ากระดาษกราฟต์ทั้งคู่มียุคความแตกต่างสีเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกระดาษกราฟต์ที่ไม่ได้เคลือบผิว แต่กระดาษทั้งคู่ไม่สามารถนำไปใช้พิมพ์งานตามมาตรฐานการพิมพ์ระบบเพล็กซ์โกราฟีเนื่องจากมีค่าพิคคัสของกระดาษเคลือบผิวไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดเนื่องจากมีค่า b^* มากกว่า +5 สำหรับความแตกต่างสีที่เกิดขึ้นบนตัวกระดาษกราฟต์ขาวเป็นผลมาจากสีของเรซิน และปริมาณอัตราส่วนของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่ผสมลงไปทำให้เกิดความแตกต่างสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$)

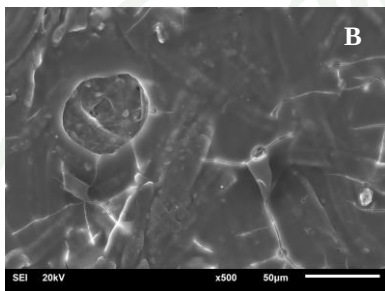
3.7 ลักษณะพื้นผิวของสารเคลือบและความหนาชั้นฟิล์มสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) 500 เท่า เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของกระดาษและลักษณะของเส้นใย ดังแสดงในภาพที่ 27 พบว่า กระดาษกราฟต์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวมีลักษณะเส้นใยและรูพรุน ดังภาพที่ 27A สารเคลือบที่มีแต่เรซินเพียงอย่างเดียวเมื่อแห้งตัวมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มเคลือบอยู่เต็มพื้นที่ดังภาพที่ 27B โดยสารเคลือบมีหน้าที่สำคัญในการอุดรูพรุนผิวหน้าของกระดาษกราฟต์และลดช่องว่างระหว่างเส้นใยในกระดาษกราฟต์ให้ลดลง (Arlete B Reis *et al.*, 2011) แต่กระดาษกราฟต์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวชั้นฟิล์มที่อยู่บนผิวหน้าของกระดาษเกิดรอยแตก โดยอัตราส่วนการผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดฟิล์มบนผิวหน้ากระดาษลดลง ดังภาพที่ 27C พบว่าฟิล์มของสารเคลือบที่ผิวหน้ากระดาษเริ่มแยกตัวออกจากกัน และอัตราส่วนซิลิกาที่มากขึ้นส่งผลให้ชั้นฟิล์มที่ผิวหน้ากระดาษกราฟต์หายไปและปรากฏเส้นใยที่เคลือบด้วยสารเคลือบแทน ดังภาพที่ 27D-27G เป็นกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 2-5 ของน้ำหนักเรซินตามลำดับ พบว่าเห็นเส้นใยในเนื้อกระดาษกราฟต์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยสาเหตุที่ทำให้ชั้นฟิล์มบนกระดาษกราฟต์เสียสภาพเนื่องจากแรงดูดซับจากการควบแน่นของรูพรุนขนาดเล็ก (capillary force) ของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวส่งผลให้ค่าพลังงานผิวของสารเคลือบลดลง ชั้นฟิล์มของสารเคลือบเกิดการแยกตัวออกจากกันไม่สามารถคงตัวเป็นแผ่นฟิล์มได้ ดังนั้นการผสมซิลิกานา

โนจากเกลบข้าวร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน เหมาะสำหรับเคลือบกระดาษกราฟต์เพราะชั้นฟิล์มที่เคลือบผิวเส้นใยในกระดาษที่เป็นเฮมิเซลลูโลสยังอยู่ในสภาพเป็นแผ่นฟิล์มปกคลุม ทำให้กระดาษป้องกันการซึมผ่านของหมึกพิมพ์ได้ และยังมือนุภาคของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวช่วยปรับปรุงคุณภาพของกระดาษกราฟต์ให้รับสารสีในหมึกพิมพ์ได้มากขึ้นด้วย (Johnston *et al.*, 2004)

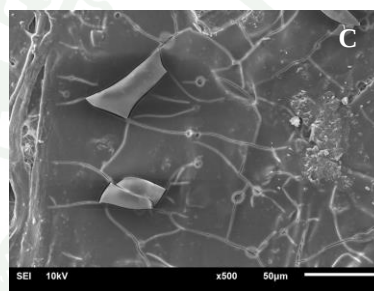
อีกทั้งเมื่อนำกระดาษกราฟต์ที่ผ่านการเคลือบสารที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ไปจุ่มในสารไนโตรเจนเหลวและหักแยกจากกันเพื่อนำไปทำการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 250 เท่า เพื่อดูภาพตัดขวางและความหนาของชั้นสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 28 พบว่าการเคลือบด้วยลูกกลิ้งกราเวียร์ที่มีรายละเอียด 23.5 เส้นต่อเซนติเมตร ที่ความเร็ว 10 เมตรต่อนาที สร้างชั้นสารเคลือบบนกระดาษกราฟต์เมื่อแห้งตัวมีความหนาประมาณ 4.05-4.25 ไมโครเมตร โดยมีบางส่วนของสารเคลือบจมลงไปในเนื้อกระดาษ แต่ภาพโดยรวมทุกสูตรเมื่อเคลือบผิวกระดาษกราฟต์มีความหนาของชั้นสารเคลือบใกล้เคียงกัน แต่อนุภาคของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมีผลต่อความหนาของชั้นสารเคลือบที่ผลิตได้เล็กน้อย เพราะสารเคลือบที่มีเรซินเพียงอย่างเดียวมีความหนาประมาณ 4.064 ไมโครเมตร แต่สารเคลือบที่มีการผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซิน มีความหนาของชั้นสารเคลือบประมาณ 4.176, 4.145, 4.192, 4.144 และ 4.152 ไมโครเมตรตามลำดับ ซึ่งมากกว่าชั้นสารเคลือบที่มีแต่เรซินประมาณ 0.08-0.128 ไมโครเมตร แต่ปริมาณของซิลิกาในสารเคลือบไม่มีผลต่อการเพิ่มความหนาของชั้นสารเคลือบ



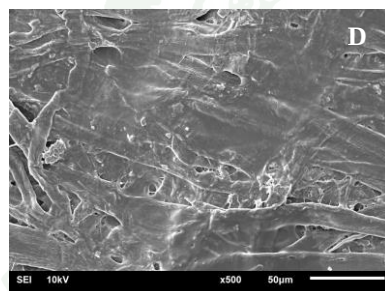
กระดาษกราฟด้าขาว 170 กรัมต่อตารางเมตร



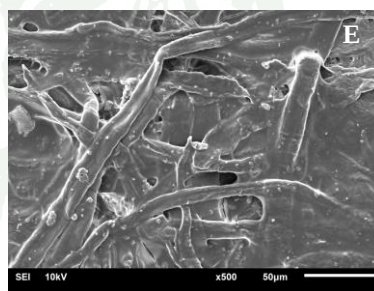
กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (0%)



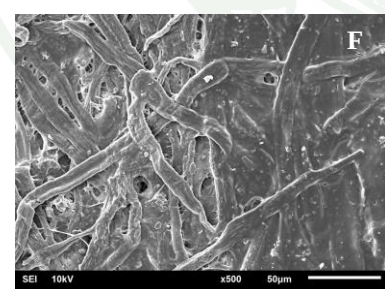
กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (1%)



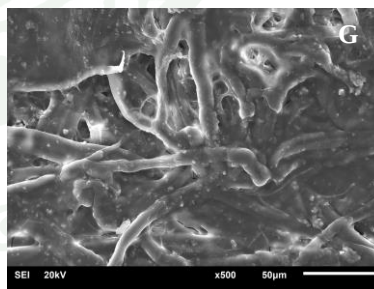
กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (2%)



กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (3%)

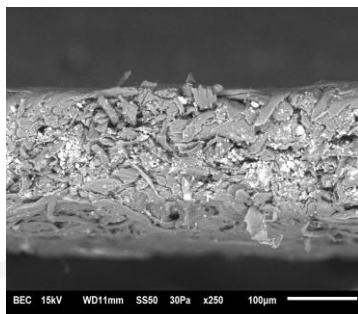


กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (4%)

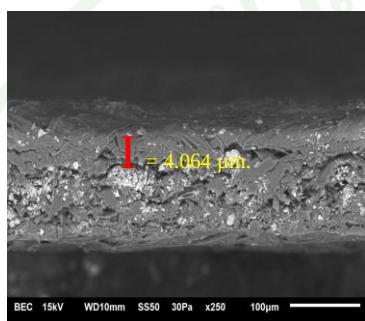


กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (5%)

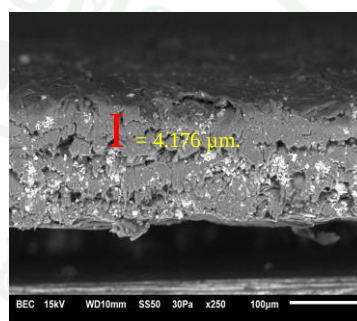
ภาพที่ 27 ผิวหน้ากระดาษกราฟที่เคลือบผิวด้วยซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 เท่า



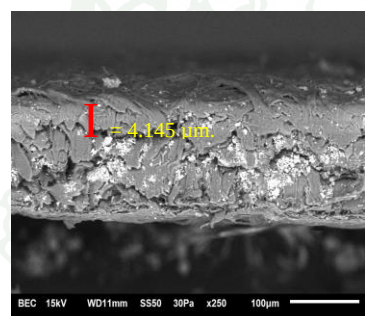
กระดาษกราฟข้าว 170 กรัมต่อตารางเมตร



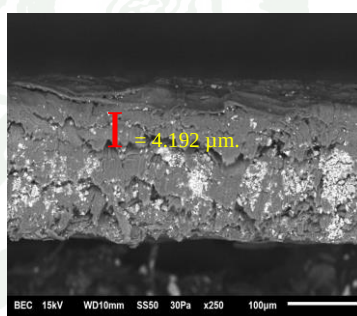
กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (0%)



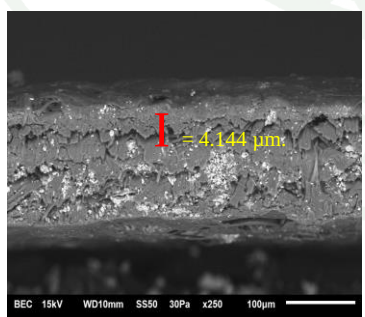
กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (1%)



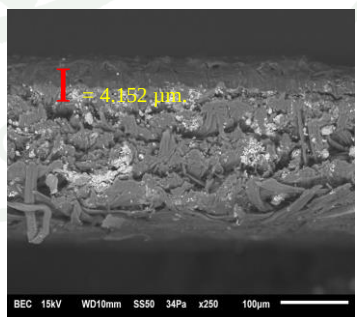
กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (2%)



กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (3%)



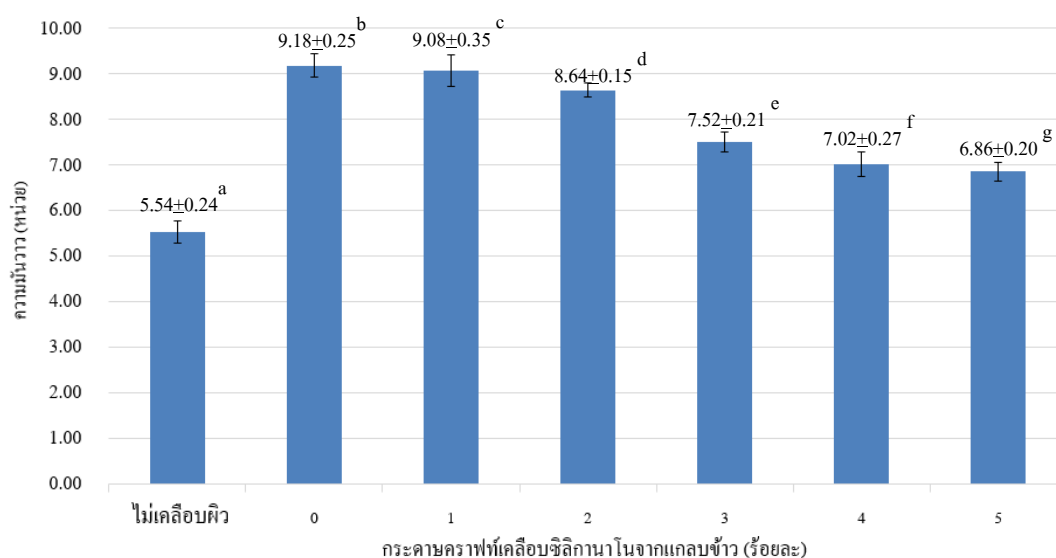
กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (4%)



กระดาษกราฟเคลือบ nano-RHS coating (5%)

ภาพที่ 28 ภาพตัดขวางและความหนาของชั้นสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ บนกระดาษกราฟ โดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 250 เท่า

3.8 ความมันวาว (gloss) ของกระดาษคราฟต์เมื่อทำการเคลือบสารที่มีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องวัดความมันวาว (gloss meter) ใช้มุมในการวัด 75 องศา (ASTM D1223-93: 2006) ได้ค่าความมันวาวออกมาดังภาพที่ 29

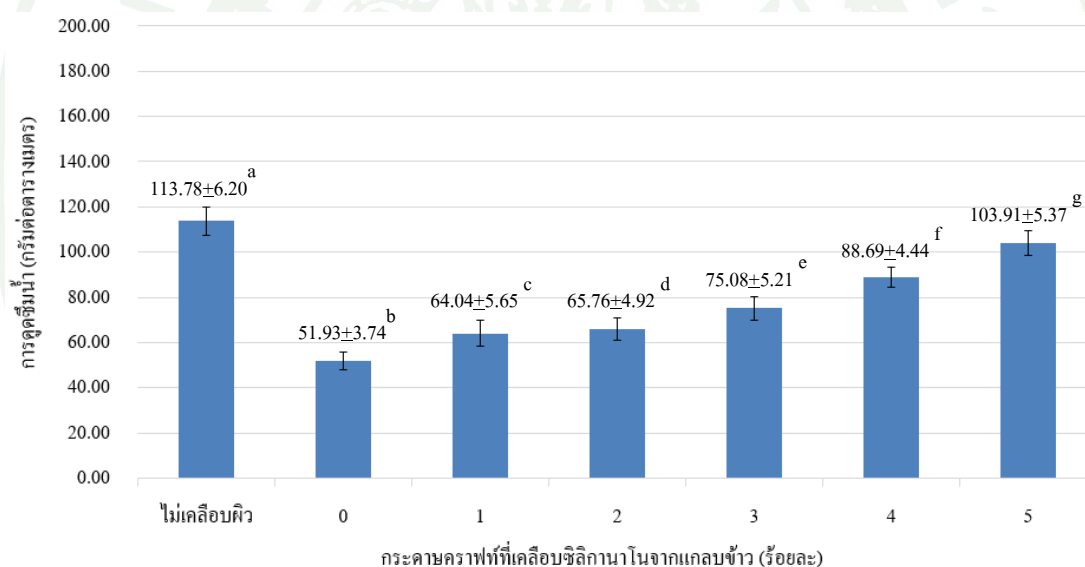


ภาพที่ 29 ความมันวาวของกระดาษคราฟต์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 29 พบว่า กระดาษคราฟต์ขาวที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าความมันวาวอยู่ที่ประมาณ 5.54±0.24 หน่วย กระดาษคราฟต์ที่นำมาเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีเฉพาะเรซินมีค่าความมันวาวเพิ่มขึ้นเป็น 9.18±0.28 หน่วย ซึ่งค่าความมันวาวที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากสารเคลือบเมื่อแห้งตัว อนุภาคของเรซินคงรูป (forming) เป็นชั้นฟิล์มบางๆ ปกคลุมผิวหน้ากระดาษคราฟต์และส่งผลให้กระดาษคราฟต์มีความสามารถในการสะท้อนแสงที่ตกกระทบเพิ่มขึ้น แต่กระดาษคราฟต์ที่เคลือบสารที่มีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าความมันวาวเท่ากับ 9.08±0.35, 8.64±0.15, 7.52±0.21, 7.02±0.27 และ 6.86±0.20 โดยค่าความมันวาวที่ลดลงเป็นผลของอนุภาคซิลิกานาโนจากเกลบข้าวทำให้ชั้นฟิล์มที่เคลือบบนผิวหน้ากระดาษคราฟต์เสียสภาพ เพราะซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมีแรงดึงดูดสูงทำให้ชั้นฟิล์มของเคลือบแตกและถ้าใส่ในปริมาณมากยิ่งส่งผลให้ไม่เกิดแผ่นฟิล์มบนกระดาษคราฟต์ดังภาพที่ 27 ส่งผลให้ความสามารถในการสะท้อนแสงของชั้นฟิล์มบนผิวหน้ากระดาษคราฟต์ลดลง ทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการกระเจิงแสงไม่สามารถสะท้อนแสงที่มาตกกระทบได้ดี ค่าความมันวาวของกระดาษคราฟต์จึงลดลง โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตหมึกพิมพ์และสารเคลือบ ซิลิกาถูกนำไปใช้เคลือบผิว

งานพิมพ์และบรรจุภัณฑ์เพื่อเพิ่มสมบัติป้องกันการไถลตัว (anti-slip) เวลาตั้งช้อนงานพิมพ์ (Flick, 1999) และเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าความมันวาวของงานพิมพ์บรรจุภัณฑ์ลดลง แต่สำหรับกระดาษกราฟที่เคลือบด้วยซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมีค่าความมันวาวลดลงในอัตราส่วนที่ต่ำกว่าการใช้ซิลิกาทั่วไป เนื่องจากอนุภาคของตัวซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมีขนาดเล็กเพียง 12 นาโนเมตร จึงทำให้เกิดการกระเจิงไม่มาก ดังนั้นปริมาณของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวทำให้ค่าความมันวาวของสารเคลือบมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$)

3.9 การดูดซึมน้ำ (cobb test) ของกระดาษที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ด้วยการวิเคราะห์จากปริมาณน้ำหนักของน้ำที่สามารถแทรกตัวเข้าไปในเนื้อกระดาษกราฟ (TAPPI 441) ได้ผลการทดสอบออกมาดังภาพที่ 30



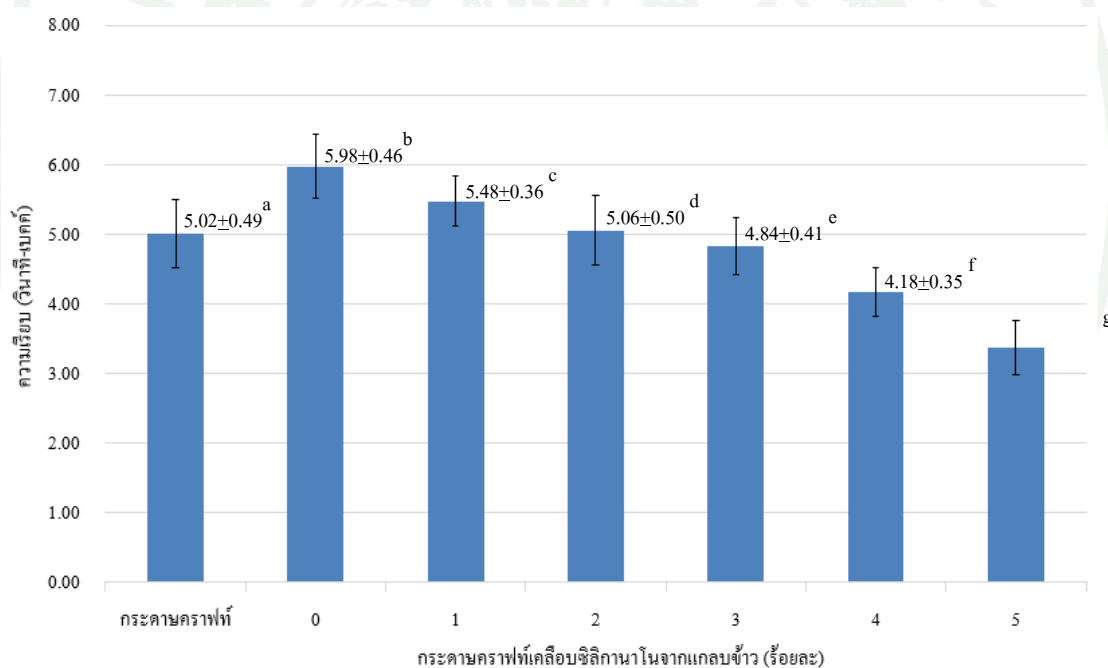
ภาพที่ 30 การดูดซึมน้ำของกระดาษกราฟที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

กระดาษกราฟผลิตจากเยื่อไม้ที่เป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic fibers) (Gerber *et al.*, 1999) หมึกพิมพ์จึงสามารถแพร่ผ่านเส้นใยได้ง่าย การปรับปรุงคุณภาพกระดาษกราฟเพื่อให้มีคุณภาพทางการพิมพ์เพิ่มขึ้นจึงต้องลดการซึมผ่านของน้ำลง (Roman, 2006) โดยเคลือบสารที่มีส่วนผสมของเรซินและซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่ผิวหน้าของกระดาษกราฟ พบว่ากระดาษกราฟที่มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดที่ 113.78 ± 6.20 กรัมต่อตารางเมตร แต่กระดาษกราฟที่เคลือบ

เรซินเพียงอย่างเดียวมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 51.93 ± 3.74 กรัมต่อตารางเมตร เนื่องจากสารเคลือบเมื่อแห้งตัวแล้วเรซินคงตัวเป็นชั้นฟิล์มปกคลุมที่ผิวหน้าของกระดาศคราฟต์ดังภาพที่ 27 ป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านลงสู่เส้นใยได้ง่าย แต่เมื่อมีอัตราส่วนของซิลิกานาโนจากแคลบข้าวมากขึ้นส่งผลให้กระดาศสามารถดูดซึมน้ำ โดยพบว่ากระดาศที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซินมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 64.04 ± 5.65 , 65.76 ± 4.92 , 75.08 ± 5.21 , 88.69 ± 4.44 และ 103.91 ± 5.37 กรัมต่อตารางเมตร และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$) เนื่องจากตัวซิลิกานาโนจากแคลบข้าวยึดตัวเรซินทำให้ผิวหน้าของชั้นฟิล์มไม่เรียบ เกิดรอยแตกที่ชั้นฟิล์มบนผิวหน้ากระดาศคราฟต์ที่เคลือบ ส่งผลน้ำสามารถแทรกเข้าไปในเนื้อกระดาศคราฟต์ได้บางส่วน และรอยแตกและเส้นใยที่ปรากฏอย่างชัดเจนเมื่อผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวในอัตราสูง และส่งผลให้ผิวหน้าของสารเคลือบมีพื้นที่ผิว (surface area) เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าการเปียกผิว (wettability) บนกระดาศเพิ่มขึ้นสามารถดูดซึมน้ำได้เพิ่ม (Zhang *et al.*, 2012) แต่ภาพโดยรวมแล้วกระดาศคราฟต์ที่เคลือบผิวด้วยซิลิกานาโนจากแคลบข้าวก็ยังมีประสิทธิภาพในการป้องกันการซึมผ่านของหมึกพิมพ์ลงสู่เส้นใยในเนื้อกระดาศได้ดีกว่ากระดาศคราฟต์ทั่วไป

3.10 ความขรุขระ (roughness) ของกระดาศที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยการวิเคราะห์จากระยะเวลาที่อากาศเคลื่อนที่ผ่านผิวกระดาศคราฟต์ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ผลการทดสอบออกมาดังภาพที่ 31 พบว่า กระดาศคราฟต์ขาวที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าความขรุขระประมาณ 5.02 ± 0.49 วินาที-เบคค์ กระดาศคราฟต์ที่ด้วยสารเคลือบที่มีเฉพาะเรซินมีค่าความขรุขระน้อยที่สุดเนื่องจากมีค่าเรียบมากที่สุด 5.98 ± 0.46 วินาที-เบคค์ ซึ่งค่าความเรียบที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากสารเคลือบเมื่อแห้งตัว อนุภาคของเรซินคงรูป (forming) เป็นชั้นฟิล์มบางๆ ปกคลุมผิวหน้ากระดาศคราฟต์ทำให้ผิวหน้าเรียบเพิ่มขึ้น แต่กระดาศคราฟต์ที่เคลือบสารที่มีส่วนผสมของซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าความเรียบลดลงเท่ากับ 5.48 ± 0.36 , 5.06 ± 0.50 , 4.84 ± 0.41 , 4.18 ± 0.35 และ 3.38 ± 0.38 วินาที-เบคค์ ตามลำดับ โดยความเรียบลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของซิลิกาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากซิลิกานาโนจากแคลบข้าวเมื่อเติมลงไป สารเคลือบทำให้ชั้นฟิล์มบนผิวหน้ากระดาศคราฟต์เสียสภาพ เพราะซิลิกานาโนจากแคลบข้าวมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากทำให้เกิดการควบแน่นภายในรูพรุนดังกล่าวและสร้างแรงดึงดูดสูง (capillary force) ภายในชั้นของสารเคลือบ ส่งผลให้ค่าพลังงานผิวของสารเคลือบเพิ่มมากขึ้น ชั้นฟิล์มสารเคลือบไม่สามารถแผ่ออกปกคลุมเส้นใยกระดาศคราฟต์ได้ทั้งหมดและเมื่อแห้งตัวชั้นฟิล์มสารเคลือบเกิดการแตกแยกตัวออกจากกันมองเห็นเส้นใยของกระดาศคราฟต์ได้ชัดเจนดังภาพที่ 27 ส่งผลให้กระดาศคราฟต์มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น และถ้ายังมีปริมาณอัตราส่วนซิลิกานาโนจาก

แกลบข้าวจำนวนมาก เช่น สารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 4-5 ของ น้ำหนักเรซิน มีค่าความเรียบ 4.18 ± 0.35 และ 3.38 ± 0.38 วินาที-เบคส์ ซึ่งน้อยกว่ากระดาษกราฟต์ ปกติ เพราะซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่ใส่ลงไปในการเคลือบมีน้ำหนักเบาแต่ปริมาตรสูง ทำให้มี ปริมาณซิลิกาในสารเคลือบมากเกินไปและลอยตัวอยู่ที่ผิวหน้าชั้นบนสุดของสารเคลือบบนกระดาษ กราฟต์จำนวนมากทำให้ผิวหน้ากระดาษกราฟต์มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น ทำให้อากาศเคลื่อนที่ผ่าน ได้จากเครื่องมือวัดไปสู่ภายนอกได้ง่าย ความเรียบที่วัดได้จึงลดลง ซึ่งปริมาณอัตราส่วนซิลิกาจาก แกลบข้าวในสารเคลือบมีผลทำให้ความขรุขระของกระดาษกราฟต์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$) และพบว่าอัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซินเหมาะสมที่นำไปผลิตสารเคลือบมาก ที่สุดเนื่องจากมีค่าความขรุขระผิวน้อยกว่ากระดาษกราฟต์ปกติที่ไม่เคลือบสารและที่ผสมซิลิกาจาก แกลบข้าวที่อัตราส่วนอื่น



ภาพที่ 31 ความขรุขระของกระดาษกราฟต์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจาก แกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

4. การทดสอบคุณภาพทางการพิมพ์บนสารเคลือบที่ผสมซิลิกาโนจากแกลบข้าว

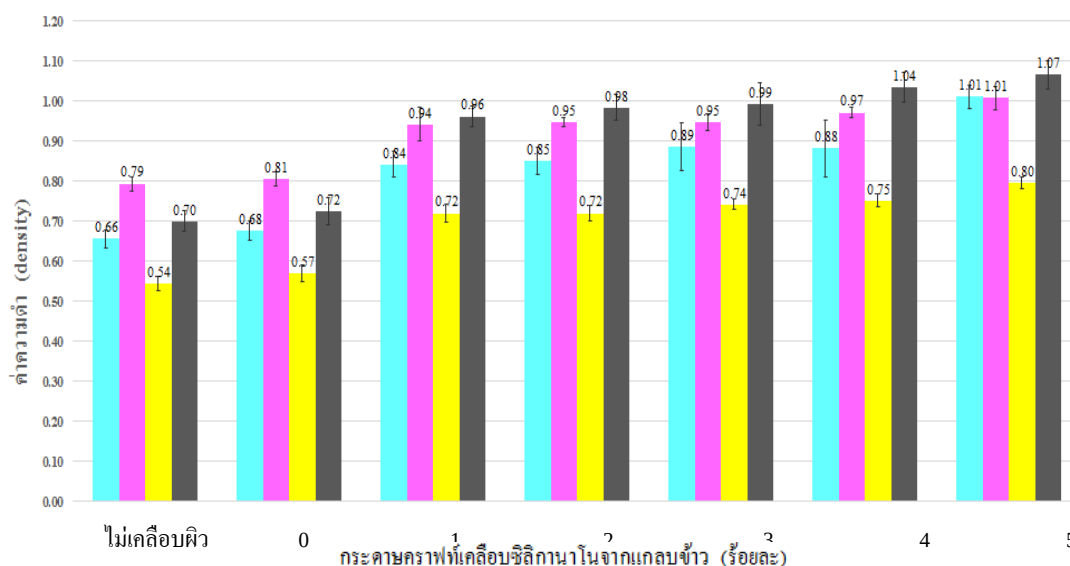
กระดาษกราฟที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่มีส่วนผสมของซิลิกาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ มาทำการพิมพ์แบบจำลองงานพิมพ์ (standard test form) ดังภาพที่ 32 ที่ประกอบไปด้วยรูปภาพ (graphic art) แถบสีควบคุม (color bar) ตัวอักษรและเส้น (font & line) ตัวอย่างรหัสแท่ง (barcode) ช่องแสดงพื้นที่เม็ดสกรีน (dot area) และ ช่องตารางสี (color test chart) 405 ช่องสี ประเภท TC 3.5



ภาพที่ 32 แบบจำลองงานพิมพ์ (TC3.5) สำหรับวิเคราะห์คุณภาพทางการพิมพ์

พิมพ์ภาพทดสอบ (test chart) ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี พิมพ์ด้วยแม่พิมพ์ยางพืบนที่มีรายละเอียด 31.5 เส้นต่อเซนติเมตร ใช้หมึกพิมพ์ชุดฐานน้ำ (water base process color) 4 สีคือ cyan magenta yellow black จ่ายหมึกด้วยลูกกลิ้งแอนนิลล็อกแบบใช้ใบมีดปาดควบคุมปริมาณการจ่ายหมึก (doctor blade analog color) ที่มีรายละเอียด 195 เส้นต่อเซนติเมตร พิมพ์ด้วยความเร็ว 1,800 เมตรต่อชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางการพิมพ์ด้วยวิธีการต่างๆ ดังนี้

4.1 ความสามารถในการรับหมึกพิมพ์ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ในเรื่องการจับหมึกพิมพ์แต่ละสี โดยการวิเคราะห์จากค่าความดำ (ASTM D 7305-08a) แสดงผลดังภาพที่ 33

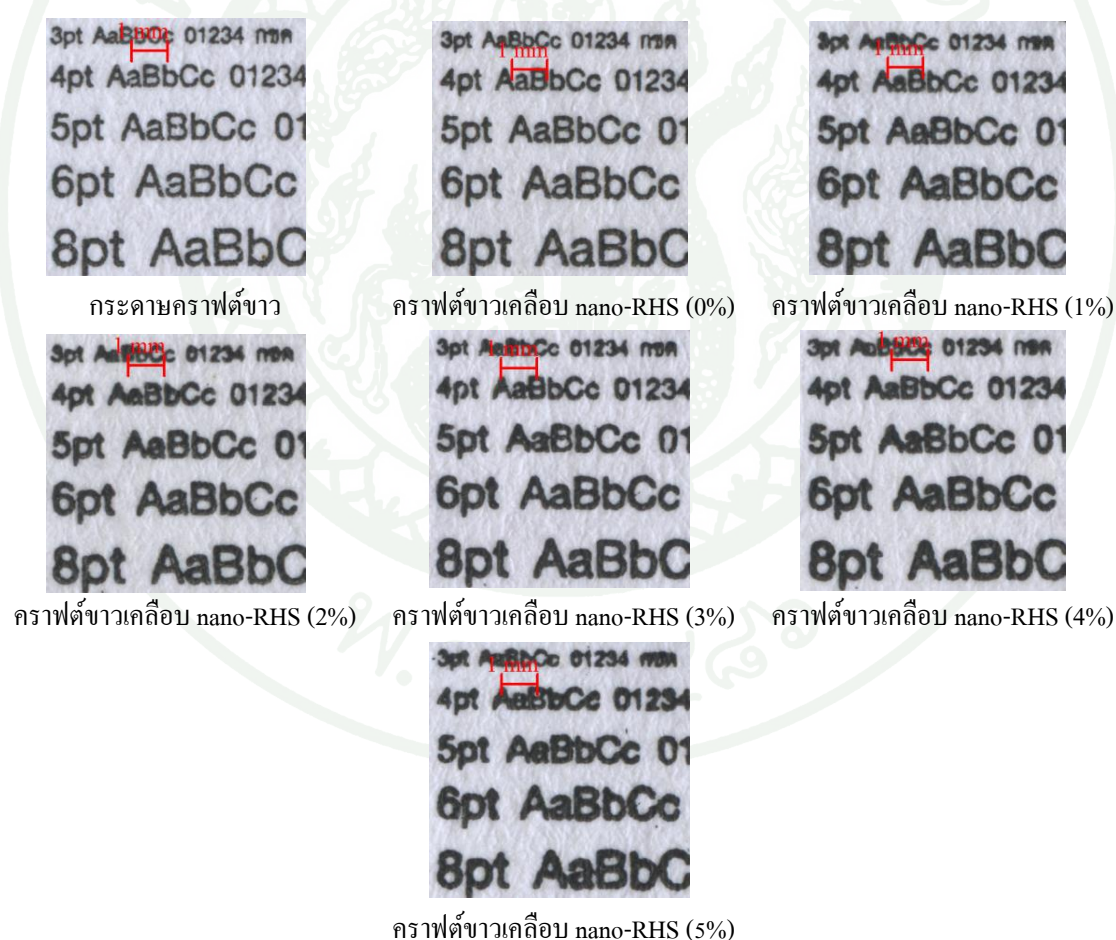


ภาพที่ 33 ความดำของหมึกพิมพ์สี cyan magenta yellow และ black บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน

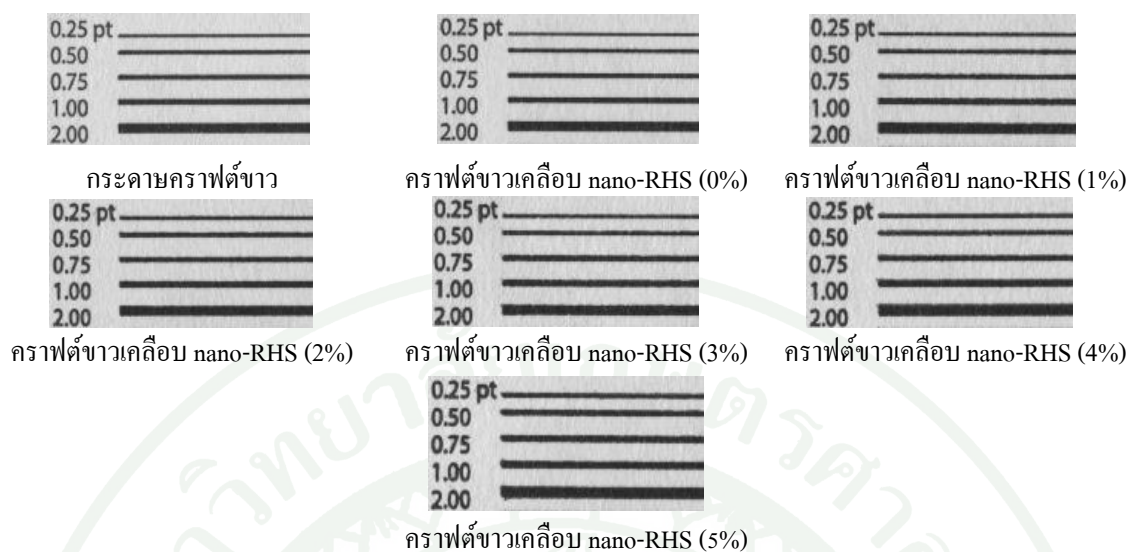
จากการวัดค่าพบว่าสีทุกสีที่พิมพ์บนสารเคลือบมีค่าความดำสูงกว่าการพิมพ์บนกระดาษกราฟปกติ และค่าความดำของทุกสีที่เพิ่มขึ้นมีสาเหตุสำคัญมาจากซิลิกานาโนจากแกลบข้าวเพราะสารเคลือบที่มีเฉพาะเรซินเมื่อนำไปเคลือบกระดาษกราฟแล้วนำไปพิมพ์ทำให้ค่าความดำของทุกสีใกล้เคียงกับงานพิมพ์บนกระดาษกราฟที่ไม่เคลือบผิว แต่กระดาษกราฟที่เคลือบผิวด้วยซิลิกานาโนจากแกลบข้าวเมื่อนำไปพิมพ์มีค่าความดำเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 0.10-0.14 และจากกราฟในภาพที่ 33 พบว่า ปริมาณอัตราส่วนซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในสารเคลือบเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความดำของทุกสีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สาเหตุที่ค่าความดำของหมึกพิมพ์แต่ละสีมีค่ามากขึ้นเนื่องจากอนุภาคของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่มีรูพรุนสูงถึง 226 ตารางเมตรต่อกรัม จึงสามารถยึดจับสารสี (pigment) (Yuan *et al.*, 2008) ในหมึกพิมพ์ไม่ให้จมลงไปในเนื้อกระดาษ ทำให้ค่าความดำของหมึกพิมพ์ไม่ลดลง และยังมีจำนวนซิลิกานาโนจากแกลบข้าวจำนวนมากประสิทธิภาพในการยึดจับสารสียังมีมากขึ้น จากทุกกราฟพบว่าสารเคลือบที่มีซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าความดำของสี cyan magenta yellow และ black สูงสุดที่ 1.01, 1.01, 0.80 และ

1.07 และยังพบว่า สารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวอัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักรезิน มีค่าความดำที่ใกล้เคียงกับการเติมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่ร้อยละ 3 ของน้ำหนักรезิน เพราะมีค่าความดำของสี magenta yellow และ black ใกล้เคียงกัน โดยผลมาจากซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากถึง 12 นาโนเมตร สามารถการกระจายตัวได้ดีจึงสามารถตรึงสารสีในหมึกพิมพ์ไว้ได้แม้ใช้ในปริมาณน้อย (Krysztalkiewicz *et al.*, 2003)

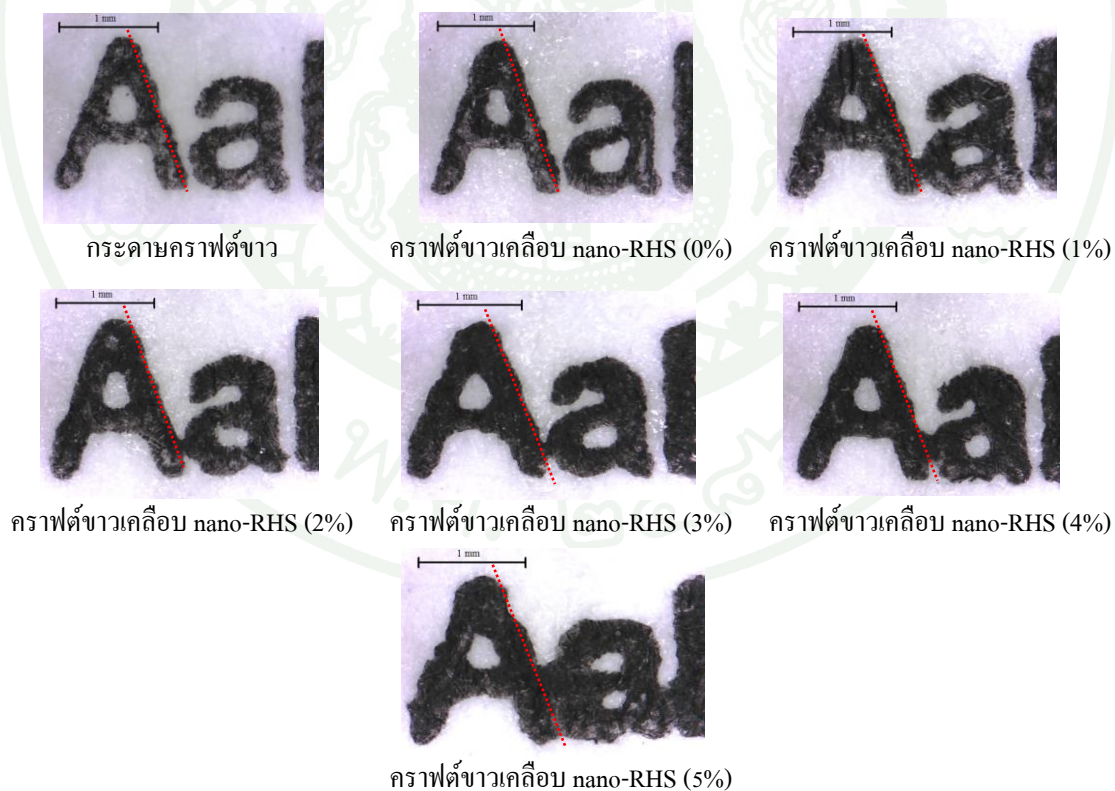
4.2 ความคมชัดของภาพพิมพ์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง เพื่อวิเคราะห์คุณภาพทางการพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่ผ่านการเคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ในการแสดงความคมชัดของขนาดตัวอักษร (font & text size) ความคมชัดของเส้น (line art) ที่มีขนาดต่างๆ ความสมจริงของภาพสี (graphic art) ผลแสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ความคมชัดของตัวอักษรที่พิมพ์ขนาดต่างๆ บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน



ภาพที่ 35 ความคมชัดของเส้นขนาดต่างๆ บนกระดาศกราฟต์ที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสม ซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน

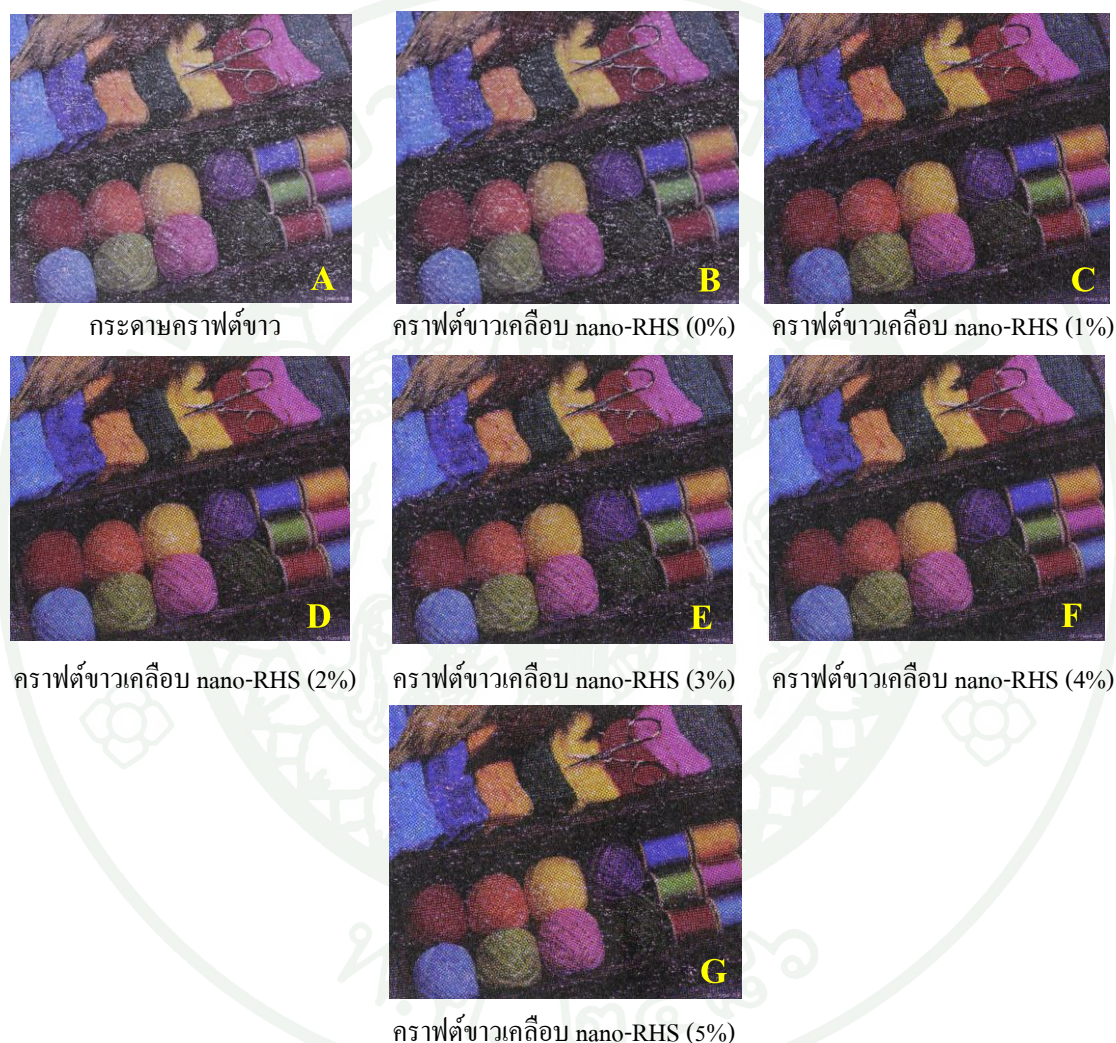


ภาพที่ 36 ความคมชัดของขอบตัวอักษรขนาด 6 พอยต์ บนกระดาศกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโน จากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน

จากภาพที่ 34 เป็นการวิเคราะห์งานพิมพ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง 50 เท่า เพื่อการพิมพ์ตัวอักษรขนาดเล็กที่สุดที่สามารถพิมพ์ได้บนกระดาษกราฟที่เคลือบสารซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่ากระดาษทั้งหมดสามารถพิมพ์ตัวอักษรขนาด 3 พอยต์ได้ แต่การพิมพ์บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่มีอัตราส่วนมากขึ้นส่งผลทำให้ตัวอักษรมีความเข้มข้นจนอ่านออกได้ยาก เช่น ตัวอักษรขนาด 3 พอยต์ ที่พิมพ์บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักเรซิน อ่านออกยากเนื่องจากตัวอักษรเกิดการขยายตัวและเข้มข้นจนตัวอักษรชิดกัน และยังพบอีกว่าเส้นขนาดเล็กที่ 0.25-2.00 พอยต์ สามารถพิมพ์ได้บนกระดาษกราฟทุกประเภท แต่อัตราส่วนของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมีผลต่อขนาดของเส้นพิมพ์ เพราะยังมีอัตราส่วนซิลิกานาโนจากเกลบข้าวมากขึ้นส่งผลให้เส้นมีขนาดใหญ่หรือขยายตัวมากขึ้นดังภาพที่ 35

ต่อมาวิเคราะห์บริเวณตัวอักษรขนาด 6 พอยต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง 200 เท่า ดังภาพที่ 36 พบว่าตัวอักษรที่พิมพ์บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 4-5 ของน้ำหนักเรซิน ตัวอักษรเกิดการขยายตัวมาชิดกัน ทำให้อ่านออกยาก เป็นผลมาจากซิลิกานาโนจากเกลบข้าวครึ่งหมึกพิมพ์ไว้ในชั้นสารเคลือบบนผิวหน้ากระดาษจำนวนมาก อีกทั้งในขั้นตอนการพิมพ์มีแรงกดจึงทำให้ตัวอักษรขยายตัว แต่ตัวอักษรที่พิมพ์บนกระดาษกราฟปกติเกิดการขีดจางและขอบของตัวอักษรไม่เรียบเป็นรอยหยัก โดยสังเกตเป็นรอยหมึกเลื่อมออกมาเมื่อเทียบกับเส้นอ้างอิงสีแดง มีสาเหตุมาจากกระดาษกราฟที่มีรูพรุนสูง (Larotonda *et al.*, 2005) จึงทำให้หมึกจมลงไปในพื้นที่ของเส้นใยและการเกิดการกระจายตัวภายในกระดาษทำให้ขอบตัวอักษรหรือภาพไม่เรียบ แต่การพิมพ์บนสารเคลือบที่มีแต่เรซิน ตัวอักษรมีความเข้มเพิ่มขึ้น แต่ขอบของตัวอักษรก็ยังไม่เรียบ เพราะหมึกพิมพ์ไม่สามารถจมลงไปในพื้นที่ของกระดาษได้จึงเข้มข้น แต่ขอบของตัวอักษรยังแตกและขอบไม่เรียบ เนื่องจากสารเคลือบไม่มีตัวตรึงสารสีให้อยู่กับที่ หมึกพิมพ์จึงสามารถกระจายตัวไปบนสารเคลือบก่อนแห้งตัว โดยพบว่าสารเคลือบที่มีซิลิกานาโนจากเกลบข้าวสามารถตรึงสารสีให้อยู่กับที่ (Yuan *et al.*, 2008) ทำให้หมึกพิมพ์เมื่อแห้งตัวแล้วมีตัวอักษรขอบเรียบ (Wu *et al.*, 2012) ดังนั้นสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซินสามารถพิมพ์ตัวอักษรแล้วมีความเข้มและขอบมีความคมชัดมากที่สุด

4.3 คุณภาพของภาพพิมพ์สีและการแสดงรายละเอียดบนกระดาษกราฟต์เคลือบผิวด้วยซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับกระดาษกราฟต์ขาวปกติ โดยกราฟภาพ (scan) เป็นไฟล์ดิจิทัลที่ความละเอียด 4,800 จุดต่อตารางนิ้ว นำไปขยายในโปรแกรม Image J และการเปรียบเทียบรายละเอียดและความสมจริงของภาพสีได้ผลดังแสดงในภาพที่ 37

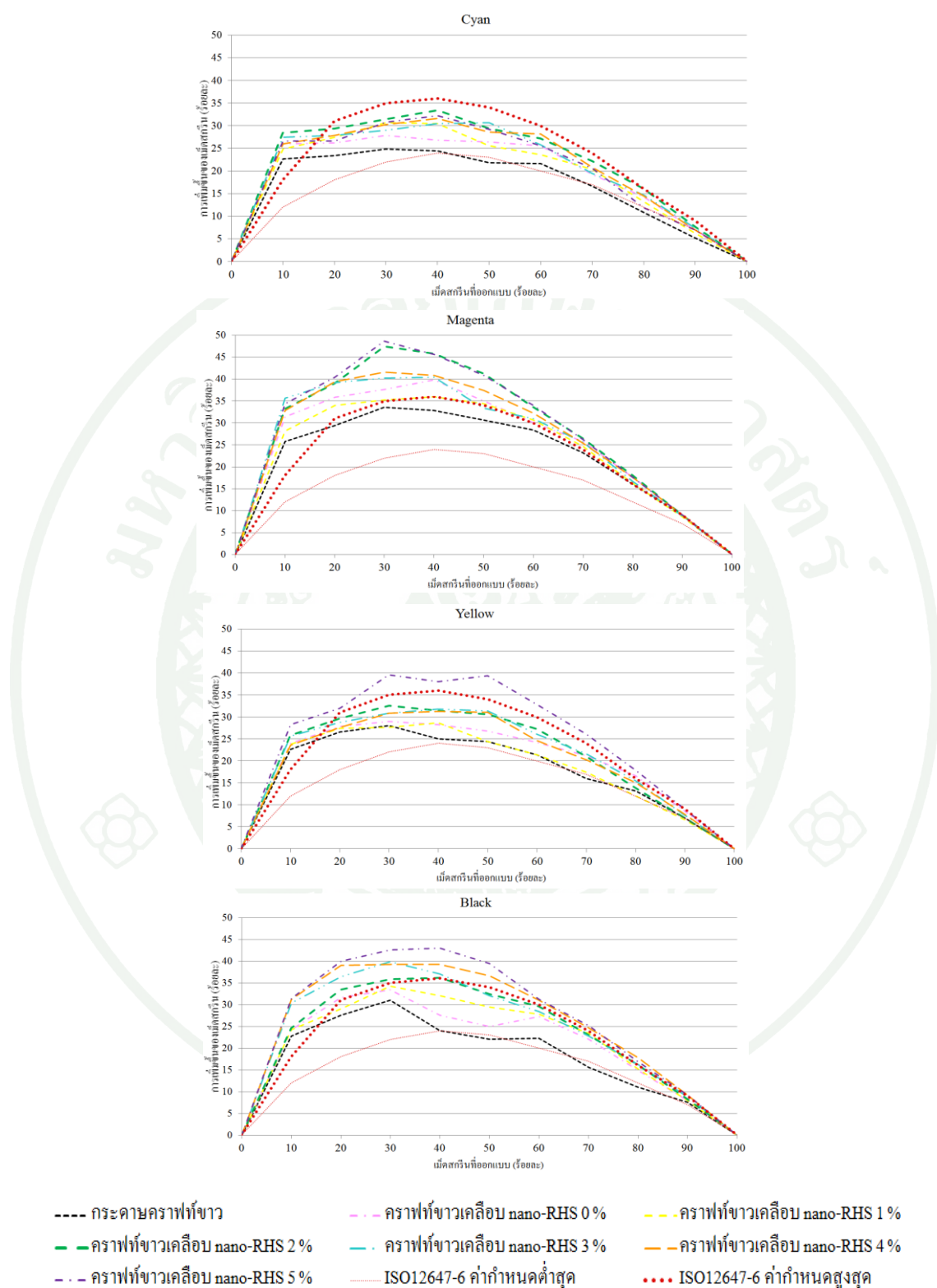


ภาพที่ 37 ภาพพิมพ์สีบนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน

จากภาพที่ 37 พบว่า งานพิมพ์ภาพสีบนกระดาษกราฟต์ปกติมีสีซีดจางมากที่สุด ไม่คมชัดเพราะกระดาษกราฟต์มีรูพรุนและช่องว่างระหว่างเส้นใยจำนวนมาก อีกทั้งในเส้นใยเป็นเซลล์โลสที่ชอบน้ำทำให้หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟฟีที่มีส่วนประกอบของน้ำสามารถแทรกตัวผ่านในเนื้อกระดาษได้ง่าย (Gerber *et al.*, 1999) ส่งผลให้ภาพสีมีรายละเอียดต่ำ แต่เมื่อพิมพ์บนกระดาษ

กราฟต์ที่เคลือบสารที่มีเรซินเพียงอย่างเดียวได้ภาพสีที่มีความเข้มขึ้นแต่ก็ยังมีรายละเอียดต่ำอยู่ เพราะในสารเคลือบไม่มีซิลิกานาโนจากแคลบข้าวจึงไม่สามารถตรึงสารสีในหมึกพิมพ์ได้ ภาพสีจึงยังคงแสดงรายละเอียดได้ต่ำเช่นเดิม แต่เมื่อพิมพ์ภาพสึบนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวทำให้ภาพสีมีความเข้มขึ้นและสามารถแสดงรายละเอียดของภาพได้อย่างชัดเจน เพราะในสารเคลือบมีซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่มีแรงดูดซับสูงจึงสามารถตรึงสารสีให้อยู่บริเวณชั้นของสารเคลือบที่ผิวหน้าของวัสดุพิมพ์ได้ (Wu *et al.*, 2012) ภาพสีจึงออกมาเข้มและคมชัด แต่ถ้ามีอัตราส่วนของซิลิกานาโนจากแคลบข้าวมากเกินไปกลับทำให้คุณภาพของการพิมพ์ภาพสีลดลง ตัวอย่างงานพิมพ์ภาพสึบนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบสารที่มีซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่ร้อยละ 4-5 ของน้ำหนักเรซิน ภาพสีที่ได้เข้มขึ้นจนทึบไม่สามารถแสดงรายละเอียดของภาพได้ โดยสังเกตจากรูปเส้นไหมพรมสีเหลืองและสีดำภายในภาพที่ 36F-36G มีความเข้มมากแต่กลับให้รายละเอียดต่ำ โดยพบว่าสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าว ร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักเรซินสามารถพิมพ์ภาพสีมีความสมจริงมากที่สุด

4.4 ความสามารถในการเก็บรายละเอียดโทนภาพ เป็นการวิเคราะห์คุณภาพทางการพิมพ์ โดยดูจากความสามารถในการเก็บและแสดงผลรายละเอียดโทนภาพสึบนกระดาษที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ โดยวัดค่าพื้นที่เม็ดสกรีน (dot area) ในภาพที่ 32 เพื่อดูการขยายตัวของจุดหมึกพิมพ์บนกระดาษ (Kajondecha and Hoshino, 2008) นำมาผลการขยายตัวของเม็ดสกรีนมาคำนวณหาปริมาณการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เม็ดสกรีนหรือกราฟ TVI (tone value increase) เพื่อเทียบกับมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 (มอก2260-6, 2006) จากการวัดค่าและนำมาเขียนกราฟการเพิ่มขึ้นของโทนภาพแสดงในภาพที่ 38

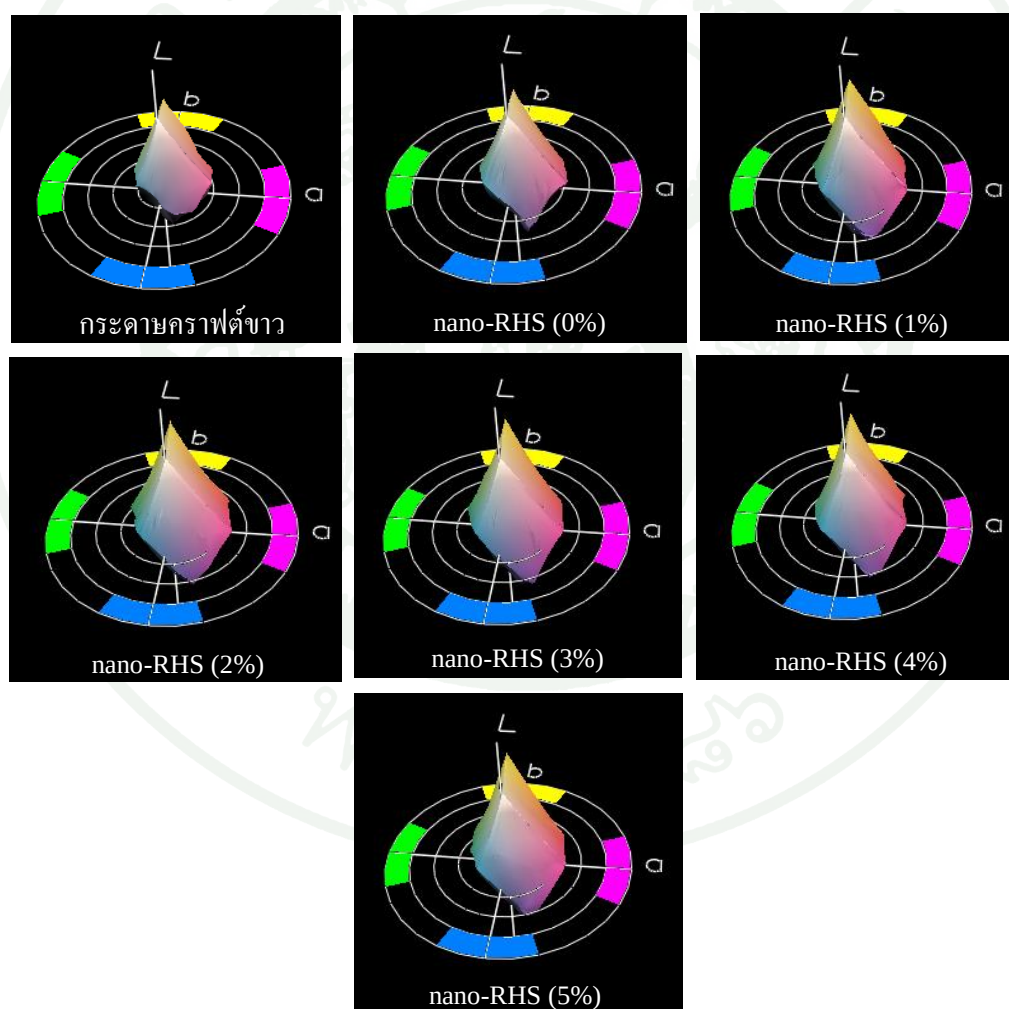


ภาพที่ 38 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เม็ดสกรีนของงานพิมพ์สี cyan, magenta, yellow และ black บนกระดาษกราฟท์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างกัน

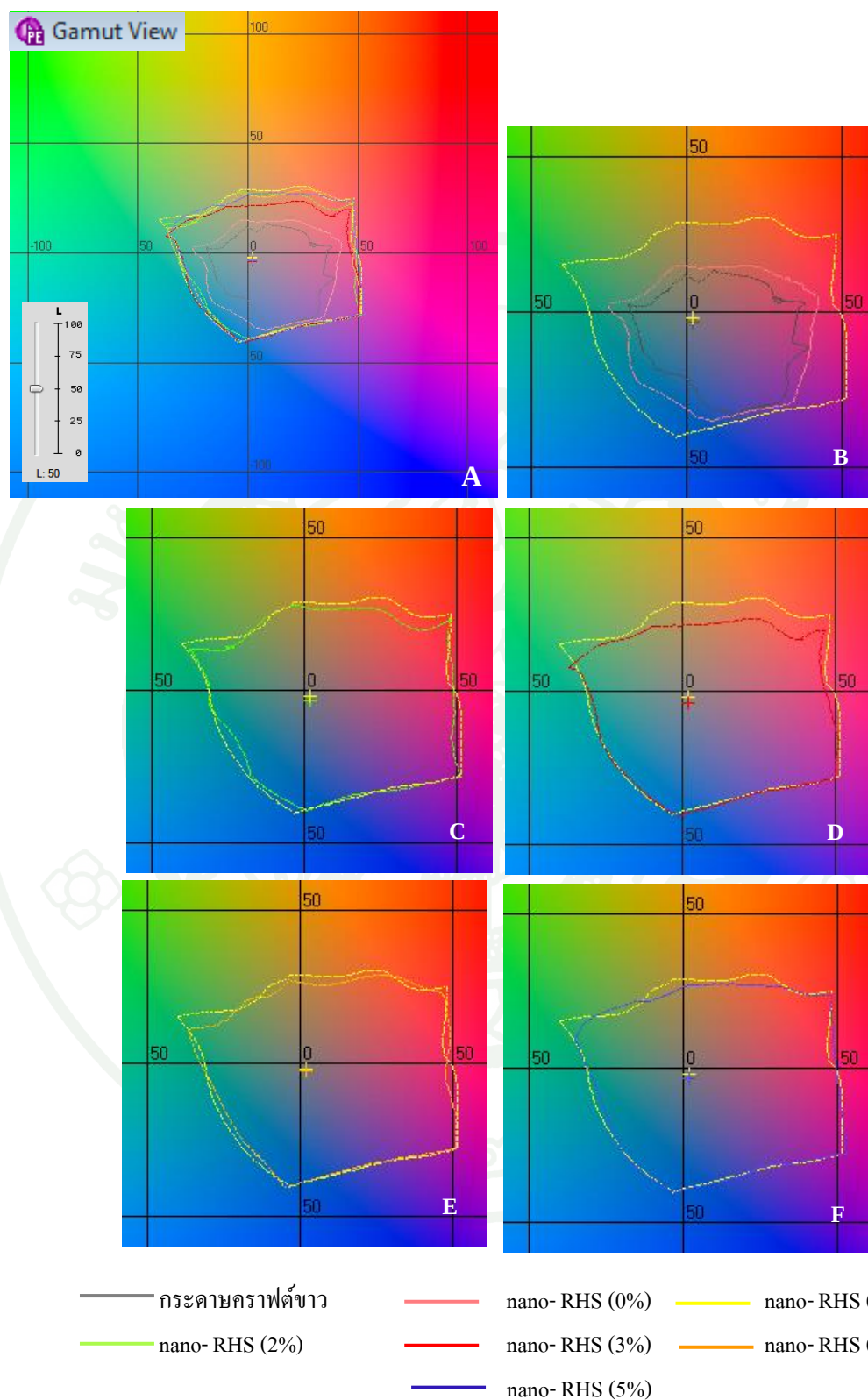
จากภาพที่ 38 กราฟ TVI ที่แสดงค่าการเพิ่มขึ้นของเม็ดสกรีนแต่ละสีบนกระดาษแต่ละประเภทและค่าสูงสุด-ต่ำสุดของค่าการขยายตัวของเม็ดสกรีน (dot gain) ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี พบว่าทุกสีที่พิมพ์บนกระดาษกราฟต์ทุกประเภทมีค่าเกินค่ามาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีในบริเวณภาพโทนสว่าง (highlight tone) หรือบริเวณพื้นที่เม็ดสกรีนร้อยละ 10 เพราะมีค่าเกินที่กำหนดไว้ โดยมาตรฐานกำหนดให้เพิ่มขึ้นได้ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 12-18 ส่วนบริเวณภาพโทนกลาง (middle tone) ตรงบริเวณที่มีพื้นที่เม็ดสกรีนร้อยละ 30-60 พบว่างานพิมพ์สีบนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวที่ร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักเรซิน ทุกสีมีค่าการขยายตัวของเม็ดสกรีน อยู่ในช่วงที่กำหนดของมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี แต่งานพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวที่ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าการขยายตัวของเม็ดสกรีนทุกสี โดยเฉพาะงานพิมพ์สี yellow เห็นชัดที่สุด แต่ส่วนในบริเวณพื้นที่เม็ดสกรีนร้อยละ 75-100 ที่เรียกว่าภาพโทนมืด (shadow tone) พบว่างานพิมพ์สี magenta งานพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ปกติและกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวที่ร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ส่วนงานพิมพ์สี cyan, yellow และ black บนกระดาษประเภทอื่นๆ มีค่าการขยายตัวของเม็ดสกรีนใกล้เคียงกัน ยกเว้นกระดาษกราฟต์เคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวที่ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าการขยายตัวสูงสุด สาเหตุที่การเพิ่มขึ้นของเม็ดสกรีนแปรผันตามปริมาณอัตราส่วนของซิลิกานาโนจากแอลบขาวในสารเคลือบ เนื่องจากการพิมพ์ในงานวิจัยนี้ใช้การปรับตั้งเครื่องพิมพ์ให้อยู่ในมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี โดยทำแม่พิมพ์และปรับตั้งค่าแรงกดพิมพ์ให้คงที่ แต่เปลี่ยนชนิดของกระดาษกราฟต์ที่นำมาพิมพ์ เมื่อพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่มีความสามารถตรงหมึกพิมพ์ได้มาก เช่น พิมพ์บนสารเคลือบที่มีซิลิกานาโนจากแอลบขาวร้อยละ 4-5 ของน้ำหนัก เรซิน จึงทำให้หมึกพิมพ์ค้างอยู่บนชั้นของสารเคลือบที่ผิวหน้ากระดาษจำนวนมาก และเกิดแรงกดขณะพิมพ์งานทำให้เม็ดสีที่พิมพ์ขยายตัวเกิดเป็นเม็ดสกรีนบวม (Verikas *et al.*, 2011) และจากการวิเคราะห์กราฟ TVI ของงานพิมพ์ทุกสีพบว่างานพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าโดยรวมใกล้เคียงกับมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีมากที่สุดเพราะมีค่าการขยายตัวของเม็ดสกรีนต่ำที่สุด

4.5 ความสามารถในการแสดงสีสันทองานพิมพ์จากแผนภูมิโปรไฟล์สีสามมิติ (3D -color profile) เป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการแสดงขอบเขตของสีสันท (color gamut) ที่กว้างที่สุดของกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวที่อัตราส่วนต่างๆ และค่าความแตกต่างสีเมื่อเทียบกับงานพิมพ์ที่ได้มาตรฐานการพิมพ์ โดยงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี

ISO 21647-6 (มอก.2260-6, 2006) มาควบคุม ดังนั้นหมึกพิมพ์ที่ใช้จึงต้องอยู่ในมาตรฐานค่าพิกัดสี (CIE $L^*a^*b^*$) หมึกพิมพ์สี cyan มีค่า $L^*=58$ $a^*=-25$ $b^*=-43$ หมึกพิมพ์สี magenta มีค่า $L^*=54$ $a^*=+58$ $b^*=-2$ หมึกพิมพ์สี yellow มีค่า $L^*=86$ $a^*=-4$ $b^*=+75$ และ หมึกพิมพ์สี black มีค่า $L^*=31$ $a^*=+1$ $b^*=+1$ สำหรับหมึกที่นำมาใช้เป็นหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานน้ำ 4 สีชุด (process color) ที่ผ่านการรับรองมาตรฐานโดยว่ามีค่าความแตกต่างสีน้อยกว่า 1 เมื่อเทียบกับมาตรฐาน ทำการพิมพ์โดยใช้การปรับตั้งการจ่ายหมึกให้เหมือนกันทุกชุดการทดลอง แล้วนำไปวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าพิกัดสีแล้วนำไปสร้างโมเดลขอบเขตสีด้วยโปรแกรมสร้างแผนภูมิโปรไฟล์สี (color profile) ตามมิติผลแสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 แผนภูมิโปรไฟล์สีสามมิติของงานพิมพ์สี บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโน จากแถบขาวที่อัตราส่วนต่างกัน

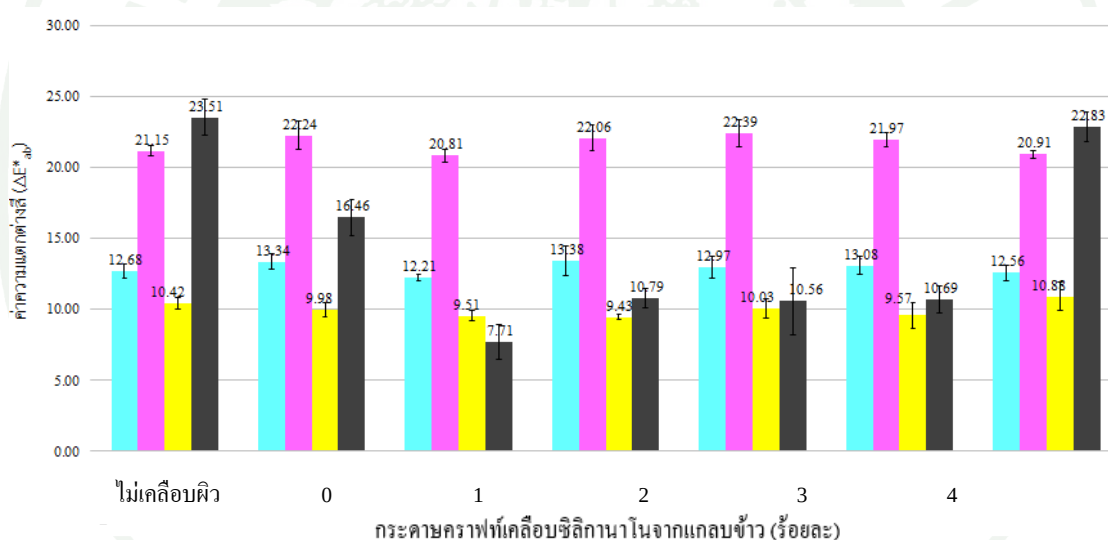


ภาพที่ 40 ขอบเขตสีของงานพิมพ์สีบนกระดาศกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากแคลบข้าว
ที่อัตราส่วนต่างๆกัน

จากภาพที่ 40 พบว่า งานพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ปกติมีรูปทรงของโปรไฟล์สีสามมิติขนาดเล็กที่สุด และเมื่อพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบเรซินเพียงอย่างเดียวโปรไฟล์สีสามมิติมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย แต่ถ้าพิมพ์บนสารเคลือบที่ส่วนผสมของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวพบว่าโปรไฟล์สีสามมิติ มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งโปรไฟล์สีสามมิติที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าขอบเขตสีของงานพิมพ์ที่กว้างที่สุดบนกระดาษแต่ละประเภทด้วยโปรแกรม X-rite Profile Editor ดังภาพที่ 40A เพื่อดูจากภาพตัดขวางแบบ 2 มิติพบว่างานพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ปกติสามารถแสดงขอบเขตสีได้แคบที่สุด เนื่องจากงานพิมพ์เกิดจุดขาวและมีสีซีดจางดังภาพที่ 36 แต่เมื่อพิมพ์บนสารเคลือบที่มีเรซินเพียงอย่างเดียวก็ทำให้หมึกพิมพ์มีความเข้มของสีเพิ่มขึ้น ขอบเขตสีจึงขยายขึ้นเล็กน้อยดังภาพที่ 40B และเมื่อทำการเปรียบเทียบขอบเขตสีของงานพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 40C - 40F พบว่างานพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซินมีขอบเขตสีกว้างมากที่สุด เนื่องจากภาพพิมพ์สีเกิดการขยายตัวของเม็ดสกรีนแต่ละสีต่ำที่สุดดังกราฟในภาพที่ 38 และสามารถแสดงรายละเอียดของสีได้ดีที่สุดจึงแสดงเส้นขอบเขตสีเหลืองได้กว้างมากที่สุด โดยสาเหตุสำคัญที่ทำให้ขอบเขตสีแคบเนื่องจากงานพิมพ์มีสีซีดจาง เพราะหมึกพิมพ์และสารสีจมลงไปในเนื้อกระดาษ หรือเข้มมากจนทึบจากการขยายตัวของเม็ดสกรีน เวลาวัดค่าความดำก็มีค่าน้อยหรือมากเกินไป หรืออาจเกิดจากสีที่พิมพ์ไม่สดใส สกปรก จุดฟักที่วัดอยู่บริเวณใกล้จุดกำเนิด (แกน a^* และ $b^* = 0$) เมื่อนำมาสร้างโปรไฟล์สีสามมิติจึงมีขนาดเล็ก (Kaida Xiao *et al.*, 2013)

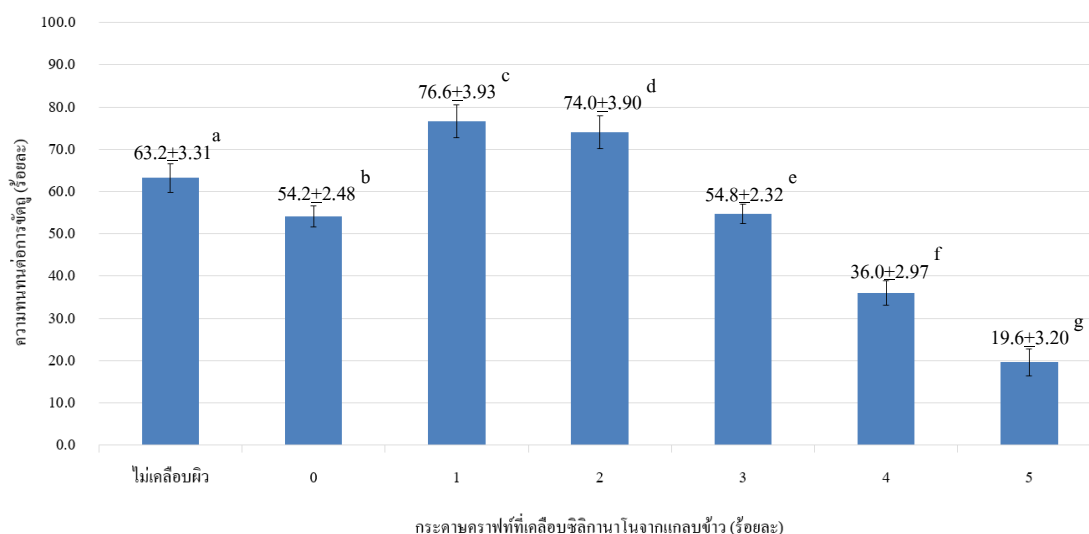
4.6 ความแตกต่างสีของงานพิมพ์เปรียบเทียบกับมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี เป็นการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของสี cyan, magenta, yellow และ black บนงานพิมพ์เปรียบเทียบกับค่าสีที่กำหนดตามมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 ตามวิธีการคำนวณค่าความแตกต่างสี (ASTM D2244-11) ผลแสดงในภาพที่ 41 พบว่างานพิมพ์ทุกสีมีค่าความแตกต่างสีมากกว่า 3 แสดงว่ามีความแตกต่างสีอย่างเห็นได้ชัดเจน (Hunt, 2004) แต่การพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบสารผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซินมีค่าความแตกต่างสีทุกสีน้อยที่สุด โดยการพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ปกติและการพิมพ์บนสารเคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าความแตกต่างสีสูง โดยเฉพาะสี black เนื่องจากงานพิมพ์ทั้งสองมีสีซีดจางและเข้มจนเกินไป และเมื่อนำค่าโปรไฟล์สีสามมิติที่วัดจากช่องในตารางสี TC 3.5 CMYK color test chart ในภาพที่ 32 มาคำนวณหาค่าความแตกต่างสีรวมด้วยโปรแกรม X-rite i1 Profiler ในโหมด data analysis ได้ค่าความแตกต่างสีเมื่อเทียบกับงานพิมพ์ที่อยู่

ในมาตรฐานการพิมพ์ระบบเพล็กซ์ กราฟิดังนี้ บนกระดาษกราฟปกติมีค่าความแตกต่างสี 10.62 บนกระดาษกราฟดีที่เคลือบเรซินเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 8.84 และงานพิมพ์บนกระดาษกราฟดีที่เคลือบผิวด้วยซิลิกานาโนจากแอลบขาวที่อัตราส่วนร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักระซิน มีค่าความแตกต่างสี 8.04, 8.62, 8.93, 9.02 และ 9.84 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการวัดค่าสีแต่ละสีของหมึกพิมพ์ตามกราฟในภาพที่ 41 ที่พบว่างานพิมพ์บนกระดาษกราฟดีเคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักระซิน มีค่าความแตกต่างสีต่ำที่สุด โดยสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าความแตกต่างสีต่ำกว่าการพิมพ์บนกระดาษประเภทอื่นเนื่องจากการขยายตัวของเม็ดสกรีนต่ำ (กราฟ TVI ในภาพที่ 38) และมีค่าความดำของงานพิมพ์ที่ไม่มากหรือน้อยเกินไป (Lundström and Verikas, 2013) ดังนั้นปริมาณอัตราส่วนของ ซิลิกานาโนจากแอลบขาวที่ผสมในสารเคลือบส่งผลให้งานพิมพ์มีความแตกต่างสีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$)



ภาพที่ 41 กราฟแสดงความแตกต่างสีของงานพิมพ์สี cyan, magenta, yellow และ black บนกระดาษกราฟที่เคลือบซิลิกานาโนจากเคลือบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ เปรียบเทียบกับหมึกพิมพ์ตามมาตรฐานการพิมพ์ระบบพล็อตโซกราฟี ISO 12647-6

4.7 ความทนทานต่อการขัดถูของงานพิมพ์บนกระดาษเคลือบที่ผสมซิลิกาnanoจากแคลบข้าวเพื่อทดสอบความทนทานต่อการขัดถูของงานพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกาnanoจากแคลบ เป็นการวิเคราะห์การยึดติดของหมึกพิมพ์ โดยใช้เครื่องทดสอบความทนทานต่อการขัดถู Sutherland Rub tester (ASTM D5264-98) ได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 กราฟแสดงความทนทานต่อการขีดถูของงานพิมพ์สี บนกระดาษคราฟต์ที่เคลือบชิตินานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 42 พบว่า งานพิมพ์สีบนกระดาษคราฟต์ที่เคลือบชิตินานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 5 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าความทนทานต่อการขีดถู (rub resistance) ต่ำที่สุดเพียงร้อยละ 19.6 ± 3.20 เนื่องจากมีสารสีหลุดติดกระดาษคราฟต์ขาวออกมาจำนวนมาก รองลงมาคืองานพิมพ์สีบนสารเคลือบที่ผสมชิตินานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 4 ของน้ำหนักเรซิน มีค่าความทนทานต่อการขีดถูเท่ากับร้อยละ 36.0 ± 2.97 โดยสาเหตุที่มีค่าความทนทานต่อการขีดถูต่ำเนื่องจากสารสีถูก ชิตินานาโนจากเกลบข้าวยึดจับไว้บนผิวหน้าของกระดาษคราฟต์จำนวนมาก โดยดูได้จากค่าความค่าของสีที่พิมพ์ดังกราฟในภาพที่ 33 งานพิมพ์จึงมีสีเข้มมาก แต่มีจุดด้อยเมื่อมีวัสดุมาเสียดสีทำให้สารสีหลุดลอกออกไป งานพิมพ์จึงเป็นรอยได้ง่าย และงานพิมพ์สีบนกระดาษคราฟต์ที่เคลือบสารที่มีเรซินเพียงอย่างเดียวมีค่าความทนทานต่อการขีดถูต่ำเพราะหมึกพิมพ์ยึดเกาะอยู่บนชั้นฟิล์มของสารเคลือบด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น (Arthur, 2006) เมื่อมีแรงและวัสดุเข้ามาเสียดสีจึงทำให้สารสีหลุดออกได้ง่าย (Rentzhog and Fogden, 2006) ดังนั้นปริมาณชิตินานาโนจากเกลบข้าวส่งผลให้งานพิมพ์มีความทนทานต่อการขีดถูแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.0001$) และเมื่อวิเคราะห์ภาพรวมของทุกสารเคลือบพบว่า งานพิมพ์บนกระดาษคราฟต์ที่เคลือบชิตินานาโนจากเกลบข้าวร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน ให้ค่าความทนทานต่อการขีดถูของงานพิมพ์สีสูงสุดที่ร้อยละ 76.6 ± 3.93 เพราะผิวหน้าของกระดาษดังกล่าวมีปริมาณชิตินานาโนจากเกลบข้าวในสารเคลือบไม่มากเกินไป จึงสามารถยึดอนุภาคของสารสีไว้บนชิตินานาโนจากเกลบข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะมีแรงยึดเหนี่ยวสูงและความสามารถด้านแรงที่เข้ามาขัดถูได้ดี (Yuan *et al.*, 2008)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การสกัดซิลิกาจากแกลบข้าวให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงจนถึงระดับนาโน และมีสมบัติเหมาะสมในการผลิตสารเคลือบกระดาษกราฟต์

การสกัดซิลิกาจากแกลบข้าวด้วยวิธีการต้มแกลบข้าวด้วยกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ 120 นาที เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากนั้นเผาแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดรอยแยกแตกที่ผิวของอนุภาคตัวซิลิกาใกล้เคียงการต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นสูง และระยะเวลาในการต้มที่นานขึ้นช่วยลดฝุ่นที่เกาะบนตัวอนุภาคของซิลิกา ต่อมานำซิลิกาที่สกัดมาลดขนาดอนุภาคให้เล็กลงจนอยู่ในระดับนาโนด้วยวิธีการสังเคราะห์วัสดุเมโซพอร์แบบ MCM 41 โดยใช้สารเฮกซะไดซิล ไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์ เป็นตัวแม่แบบช่วยสังเคราะห์ในการขึ้นโครงสร้างรูปร่างใหม่ทำให้ได้ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีอนุภาคประมาณ 12 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ สูงถึง 226 ± 21 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าความขาว 86.47 หน่วย อีกทั้งมีค่าความแตกต่างสีลดลงเหลือ 1.20 เมื่อเทียบกับมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 เหมาะสมนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคลือบและเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาที่เผาจากแกลบข้าว เพราะมีสมบัติที่เหนือกว่าในเรื่องของพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากกว่าถึง 3.5 เท่า อีกทั้งซิลิกานาโนจากแกลบข้าว ยังมีค่าความขาว ค่าความแตกต่างสีและความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้นด้วย

2. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวในสารเคลือบกระดาษฐานน้ำ

เมื่อนำซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมาผลิตสารเคลือบฐานน้ำโดยใช้เรซินชนิดลาเทกซ์สไตรีน บิวตาไดอีน (BASE : Joncryl 678) ผสมกับผงซิลิกานาโนจากแกลบข้าวร้อยละ 1-5 ของน้ำหนักเรซิน เติมน้ำเติมแต่ง Foamaster NXZ ร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน เป็นสารป้องกันฟอง และสารช่วยกระจายตัว Disperbyk-193 ร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน พบว่าสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน เหมาะสมที่สุดในการผลิตสารเคลือบเนื่องจากมีลักษณะสีเหลืองอ่อน มีค่าความโปร่งใส 52.49 ± 0.873 มีค่าความหนืด 39.2 ± 1.322 เซนติพอยต์ โดยเป็นผลเนื่องมาจากซิลิกานาโนจากแกลบข้าวมีขนาดเล็กมากและไม่ละลายน้ำจึงสามารถกระจายตัว

ได้คือและแขวนลอยอยู่ในสารเคลือบ และสภาพของชั้นฟิล์มที่ผิวหน้าของสารเคลือบยังคงสภาพเป็นแผ่นฟิล์มอยู่จึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำซึมผ่านลงสู่เส้นใยในเนื้อกระดาษ

เมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี พบว่างานพิมพ์บนสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน มีคุณภาพงานพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีดีที่สุด เนื่องจากค่าความดำแต่ละสีไม่สูงมากจนเกินไป เกิดการขยายตัวของเม็ดสกรีนต่ำ ค่าปริมาณการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เม็ดสกรีนงานพิมพ์อยู่ภายใต้มาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 (มอก.2260-6, 2006) มีค่าความแตกต่างสีรวมเท่ากับ 8.04 และงานพิมพ์สียังมีประสิทธิภาพดีในการป้องกันการขจัด (ASTM D 5264-98) สูงถึง 76.6 ± 3.93 และค่าการทดสอบต่างๆ โดยรวมดีกว่าการพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนอื่น

3. คุณภาพทางการพิมพ์บนกระดาษกราฟต์ด้วยระบบเฟล็กโซกราฟีของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าว

เมื่อนำมาเคลือบผิวกระดาษกราฟต์ขาว 170 กรัมต่อตารางเมตร ด้วยลูกกลิ้งกราเวียร์ 23.5 เส้นต่อเซนติเมตร จากนั้นนำกระดาษที่เคลือบสารมาทำการพิมพ์ภาพสีด้วยระบบเฟล็กโซกราฟี รายละเอียด 31.5 เส้นต่อเซนติเมตร ใช้หมึกพิมพ์ชุดฐานน้ำ (water-base process color) 4 สีคือ cyan, magenta, yellow และ black ปรากฏว่าสามารถพิมพ์งานได้โดยไม่เกิดปัญหา (printability) และยังเพิ่มคุณภาพการพิมพ์ให้มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยกระดาษกราฟต์ที่เคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่ร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน มีสมบัติทางการพิมพ์ที่ดีที่สุด เนื่องจากสมบัติของกระดาษก่อนพิมพ์มีค่าพิกัดสี CIE $L^* = 94.27$, $a^* = +0.52$, $b^* = +3.78$ มีค่าความแตกต่างสีเท่ากับ 0.95 ± 0.3 มีค่าการดูดซึมน้ำ 64.04 ± 5.65 ค่าความเรียบ 5.48 ± 0.36 วินาที-เบคส์และค่าความมันวาวเท่ากับ 9.08 ± 0.35 โดยทั้งหมดอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 (มอก. 2260-6, 2006) อีกทั้งความเรียบของกระดาษกราฟต์และการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับการเคลือบด้วยเรซินเพียงอย่างเดียว เมื่อพิมพ์สีบนกระดาษดังกล่าวให้ค่าความดำของทุกสีที่พิมพ์เพิ่มขึ้นไม่สูงจนเกินไป งานพิมพ์มีความคมชัดของเส้นพิมพ์ (line art) สูงและตัวอักษรที่พิมพ์มีขอบเรียบ ภาพสีแสดงรายละเอียดได้ดีที่สุดและมีความสมจริง สามารถแสดงโปรไฟล์สีขนาดใหญ่ แสดงค่าขอบเขตสีได้กว้างที่สุด และมีค่าความแตกต่างสี 8.04 ซึ่งน้อยกว่าการพิมพ์บนสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนอื่น

4. ศึกษาประสิทธิภาพของสารเคลือบซิลิกานาโนจากเกลบข้าว ในการปรับปรุงคุณภาพงานพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบนกระดาษคราฟต์

ซิลิกานาโนจากเกลบข้าวเมื่อนำไปเคลือบผิวกระดาษช่วยปรับปรุงผิวหน้ากระดาษคราฟต์ให้มีคุณภาพดีขึ้นในเรื่องการอุดรูพรุนในเนื้อกระดาษ โดยสารเคลือบช่วยให้กระดาษเรียบและป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านลงสู่เส้นใยในเนื้อกระดาษได้ง่าย ซิลิกานาโนจากเกลบข้าวเป็นตัวช่วยยึดสารสีในหมึกพิมพ์โดยเฉพาะเมื่อซิลิกาจากเกลบข้าวมีขนาดอนุภาครูพรุนระดับนาโน โดยรูพรุนขนาดเล็กภายในจำนวนมากบนอนุภาคซิลิกานาโนทำให้เกิดแรง capillary force เป็นแรงดูดซับสูงชนิดที่ 4 (Type IV) ซึ่งพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบ เมโซพอร์ทำให้สามารถดูดซับสารสีไว้บนอนุภาคของซิลิกานาโนจากเกลบข้าว จึงสามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของผิวหน้ากระดาษให้มีประสิทธิภาพในการรับหมึกดีมากขึ้น และยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 226 ± 21 ตารางเมตรต่อกรัม มากกว่าซิลิกาจากเกลบข้าวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพียง 66 ± 8.8 ตารางเมตรต่อกรัม จึงสามารถใช้ในปริมาณน้อยแต่ก็ยังทำให้มีประสิทธิภาพในเรื่องการดูดซับสูง ดังนั้นการผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวลงในสารเคลือบต้องผสมในอัตราส่วนที่ไม่มากจนเกินไป พบว่าที่อัตราส่วนการผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวในสารเคลือบเพียงร้อยละ 1 ของน้ำหนักเรซิน สามารถยึดสารสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้งานพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบนกระดาษคราฟต์มีคุณภาพสูง

ข้อเสนอแนะ

จากการทํางานวิจัยเรื่อง นาโนซิลิกาสังเคราะห์จากเกลบข้าวเพื่อเพิ่มคุณภาพการพิมพ์เฟล็กโซ กราฟีบนกระดาษคราฟต์ขาว ทำให้ทราบถึงวิธีการนำเกลบที่เหลือใช้มาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ และสมบัติของซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์พัฒนาอุตสาหกรรมการพิมพ์ แต่การนำซิลิกานาโนจากเกลบข้าวไปใช้ยังมีข้อจำกัดและมีจุดที่ต้องนำไปปรับปรุง โดยแยกเป็นข้อเสนอแนะที่น่าสนใจดังนี้

1. จากการสกัดซิลิกาจากเกลบข้าวด้วยวิธีการต้มเกลบข้าวด้วยกรดไฮโดรคลอริกต้องต้มภายในตู้หรืออุปกรณ์ดูดควัน เนื่องจากไอของกรดไฮโดรคลอริกมีความพิษและระคายเคืองต่อระบบการหายใจ อีกทั้งการสกัดซิลิกาจากเกลบข้าวให้มีความบริสุทธิ์ปราศจากสิ่งปนเปื้อนยังมีอีกหลายวิธี เช่น ต้มด้วยสารละลายอื่นที่มีอันตรายน้อยกว่า

2. ขั้นตอนการเผาเคลือบข้าวให้ได้ซิลิกาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 240 นาที มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเผาสูง โดยผู้วิจัยเคยทดลองเผาที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 240 นาที ซึ่งผลิตภัณฑ์ซิลิกาที่ได้ออกมามีสมบัติเหมือนกับการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการทำวิจัยครั้งต่อไปอาจทดลองลดอุณหภูมิในการเผา หรือใช้อุณหภูมิในการเผาให้สูงขึ้นแต่ใช้ระยะเวลาเผาให้สั้นลง เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน

3. การสังเคราะห์ซิลิกานาโนในงานวิจัยนี้ เลือกสังเคราะห์เป็นวัสดุเมโซพอร์ (วัสดุที่มีรูพรุนขนาดนาโนเมตร) ซึ่งการสังเคราะห์วัสดุประเภทนี้ยังมีอีกหลายวิธี ผู้ที่สนใจทำวิจัยต่อสามารถเลือกวิธีอื่นในการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

4. ซิลิกานาโนจากเคลือบข้าวมีขนาดอนุภาคเล็กมาก เกิดการฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อเข้าสู่ปอดแล้วไม่สามารถกำจัดออกได้ อาจส่งผลต่อปัญหาสุขภาพ ดังนั้นการทำงานวิจัยกับวัสดุนี้ต้องมีอุปกรณ์ป้องกันอย่างดี เช่น ต้องสวมหน้ากากที่มีความสามารถในการกรองฝุ่นระดับนาโนเมตร ในขณะทำงานวิจัย

5. การนำซิลิกานาโนจากเคลือบข้าวไปใช้ในงานอุตสาหกรรมสามารถนำไปใช้ได้ เนื่องจากเมื่อนำไปใช้แล้วทำให้ประสิทธิภาพทางการพิมพ์เพิ่มขึ้นทันที แต่ในขั้นตอนการผลิตสารเคลือบอาจต้องมีการปรับปรุงไม่ให้อุณหภูมิซิลิกานาโนจากเคลือบข้าวตกตะกอนได้ง่ายด้วยการปรับปรุงสมบัติของสารเคลือบโดยเลือกสารช่วยกระจายตัวประเภทอื่นมาใช้ทดแทนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

6. ซิลิกานาโนจากเคลือบข้าวมีประโยชน์ช่วยเพิ่มคุณภาพทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ได้ดี อาจมีการพัฒนาไปใช้กับการพิมพ์ระบบอื่นๆ เช่น การพิมพ์ระบบกราเวียร์ หรือการพิมพ์แบบพ่นหมึก (inkjet)

7. ซิลิกานาโนจากเคลือบข้าวสามารถนำไปเคลือบผิวบนกระดาษได้ทันที โดยทำการผสมลงไปในส่วนเติมแต่งขณะขึ้นแผ่นกระดาษ เป็นการลดขั้นตอนในการเคลือบภายหลัง และทำให้กระดาษที่ผลิตขึ้นมามีประสิทธิภาพสูงในการรับหมึก

8. การนำเกลบข้าวที่เป็นสิ่งเหลือทิ้งมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาผลิตเป็นซิลิกานาโนที่มีสมบัติใกล้เคียงกับซิลิกานาโนทั่วไปที่ขายตามท้องตลาดซึ่งมีราคาสูง เป็นสิ่ง值得สนับสนุน เพราะได้นำสิ่งเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่า และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าซิลิกานาโนจากต่างประเทศด้วย

9. ซิลิกานาโนจากเกลบข้าวยังมีประโยชน์อีกหลายอย่าง สามารถประยุกต์ในงานวิจัย และในอุตสาหกรรมได้ อีกทั้งประเทศไทยเป็นแหล่งปลูกข้าวที่สำคัญ จึงควรมีการสนับสนุนและส่งเสริมงานวิจัยโดยใช้วัสดุชนิดนี้ต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กัญญา เชื้อพันธุ์. 2547. คุณภาพข้าวทางกายภาพ, คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย. บริษัทจิรวัดน์เอกเพรสจำกัด, กรุงเทพฯ.

ฐาตุร เบญจบุตร, ศาโรช เวโรจน์ และอนุรักษ์ พินิจนรัช. 2549. การเคลือบสารบนกระดาษกราฟต์ปะหน้าลูกฟูกเพื่อการจัดการสีของปฐพีระบบพ่นหมึกให้ใกล้เคียงการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟ, โครงการงานปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ณุตตรา ศรีประเสริฐ และ สมชาย ศฤงคารินกุล. 2542. วัสดุทางการพิมพ์. พิมพ์ครั้งที่ 4 โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, นนทบุรี.

ทิวาสวัสดิ์ ศรีโสม. 2553. ผลของการตัดแปรไดอะทอไมต์ต่อความสามารถดูดซับโลหะหนัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ธีรศักดิ์ พรหมเทพ. 2548. การศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบข้าว. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

นิตยา ทวดอาจ. 2550. การเตรียมผงนาโนซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พรชัย เอี่ยมศิริกุลมิตร. 2547. วัสดุทางการพิมพ์. พิมพ์ครั้งที่ 4 โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, นนทบุรี.

พรสวรรค์ พุ่มพวง และ ชุพัต วิงศ์สุรกิจ. 2548. การเคลือบสารบนกระดาษปอนด์เพื่อปรับปรุงคุณภาพสำหรับการพิมพ์ระบบพ่นหมึก. โครงการงานปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

พิชญดา เกตุเมฆ, สุพิน แสงสุข และกุนที สุวรรณกิจ. 2552. การหาสัดส่วนที่เหมาะสมของซิลิกาเจลและแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับสารเคลือบกระดาษพิมพ์อิงค์เจ็ทโดยวิธีการออกแบบส่วนผสมเชิงสถิติ, รายงานฉบับสมบูรณ์ ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ไพจิตร อังศิริวัฒน์. 2541. เนื้อดินเซรามิก. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2539. เอกสารการสอนชุดวิชาความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการพิมพ์ โครงการสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, นนทบุรี.

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ศูนย์ข้อมูลวัตถุดิบทรายและเคมีภัณฑ์, กรมควบคุมมลพิษ. 2551. ซิลิกอนไดออกไซด์. แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th>, 17 ตุลาคม 2555

สุดาพร ดังควนิช. 2550. รายงานการวิจัย เรื่องการผลิตซิลิกาจากแกลบเพื่อใช้ในเทคนิคโครมาโทกราฟี. รายงานการวิจัยสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2549. เทคโนโลยีการพิมพ์- การควบคุมกระบวนการผลิตในงานแยกสีอัลโทน ปรีฟ และพิมพ์ เล่ม 1 พารามิเตอร์และวิธีการวัด มอก. 2260 เล่ม 1-2549.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2549. เทคโนโลยีการพิมพ์- การควบคุมกระบวนการผลิตในงานแยกสีอัลโทน ปรีฟ และพิมพ์ เล่ม 6 การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี มอก. 2260 เล่ม 6-2549.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร ข้าวนาปี

และข้าวนาปรัง 2553-2555. แหล่งที่มา: <http://www.oae.go.th/download/prcai/DryCrop>

/majorrice.pdf, 15 สิงหาคม 2555

สำนักพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2554. เอกสารวิชาการ สารปรับปรุงดิน.

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

อนันต์ เขมพาณิษฐ์กุล. 2548. การหาสัดส่วนที่เหมาะสมของซิลิกา ดินขาวนาข้าวและพอลิไวนิล

แอลกอฮอล์สำหรับการเคลือบกระดาษพิมพ์อิงก์เจตโดยวิธีออกแบบส่วนผสมเชิงสถิติ.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรัญ หาญสืบสาย. 2545. ระบบการพิมพ์ต่างๆ และการนำไปใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์แห่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรัญ หาญสืบสาย. 2546. การสื่อสารอย่างแม่นยำ การควบคุมสีจากการรับรู้ไปสู่อุปกรณ์วัดสี,

พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรัญ หาญสืบสาย. 2557. เทคโนโลยีการพิมพ์ ความก้าวหน้าและการนำไปใช้งาน..., พิมพ์ครั้งที่ 1

โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ จุลพันธ์, ชงไทย วิฑูรย์ และ เมตตา เจริญพานิช. 2554. การผลิตวัสดุดูดซับชนิดซิลิกาเมโซ

พอร์จากกากของเสียจากธรรมชาติ. วิศวกรรมสาร มก.75(1) : 103-120.

อรอุยา สรวารี. 2544. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 2 โรงพิมพ์แห่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรอุยา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

กรุงเทพฯ

A.T. Bio Power Co. Ltd., 2003. **Electricity Generation from Biomass**. Available Source:

http://www.atbiopower.co.th/index_e.htm, July 20, 2012.

Adam, F., J.N. Appaturi and A. Iqbal. 2012. The Utilization of Rice Husk Silica as a Catalyst.

Catalysis Today 190: 2–14.

Arthur, A. Tracton. 2006. **Coating Technology Handbook (3rd Edition)**. CRC Press Taylor &

Francis Group. eBook ISBN: 978-1-4200-2732-7

Beck, J.S., C. Vartuli, W. J. Roth and C.T. Kresge. 1992. Family of Mewoporous Molecular Sieves Prepared with Liquid Crystal Templates. **Journal of the American Chemical Society** 114: 10834-10843.

Bunch, T.E. and J.H. Wittke. 2008. Department of Geology, Northern Arizona Meteorite

Laboratory. **SiO₄ Tetrahedral**. Available Source: <http://www4.nau.edu/Meteorite/Meteorite/BookGlossaryS.html>, October 18, 2012.

Chapman, D.M. 1997. Coating Structure Effects on Ink Jet Printing. **Coating conference**.

Atlanta, Georgia, USA: 73-79.

Cheng, Z.P., Y. Yang, F.S. Li and Z.H. Pan. 2008. Synthesis and Characterization of Aluminum

Particles Coated with Uniform Silica Shell. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 18(2): 378-382.

Cheremisinoff, P.N. and F. Ellerbusch. 1978. **Adsorption Handbook**. Ann Arbor Science

Michigan, USA.

Chiarakorn, S. 2004. **Utilization of rice Husk Silica for Synthesis of Mesoporous Molecular Sieve MCM-41 Applied for Catalytic Hydrodechlorination of Chlorinated Volatile Organic Compounds**. Dissertation for Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Management, Graduate School, Chulaongkorn University.

Coatings Emulsions Guide. 2007. **Step into the Future of Coatings**. Celanese chemicals, Frankfurt Germany.

Della, V.P., I. Kuhn and D. Houtza. 2002. Rice Husk Ash as an Alternate Source for Active Silica Production. **Materials Letters** **57**: 818-821.

Dey, K.P., S. Ghosh and M.K. Naskar. 2012. Organic Template-Free Synthesis of ZSM-5 Zeolite Particles using Rice Husk Ash as Silica Source. **Ceramics International**.

Dutch, S. 2001. Natural and Applied Sciences, University of Wisconsin-Green Bay. **SiO₂ Crystal**. Available Source: <http://www.uwgb.edu/dutchs/EarthSC202Notes/minerals.htm>, October 18, 2012.

Fairchild, M.D. 1993. The CIE 1931 Standard Colorimetric Observer. **Color Research & Application** **18**(2): 129–134.

Flick, E.W. 1999. **Printing Ink and Overprint Varnish Formulations (2nd Edition)**. Noyes Publications /William Andrew Publishing New York, USA .ISBN: 0-8155-1440-9

Fujita, K., T. Ikemi and N. Nishiyama. 2011. Effects of Particle Size of Silica Filler on Polymerization Conversion in a Light-Curing Resin Composite. **Dental Materials** **27**(11): 1,079-1,085.

Gerber, P.J., J.A. Heitmann, T.W. Joyce, J. Buchert and M. Siika-aho. 1999. Adsorption of Hemicellulases onto Bleached Kraft Fibers. **Journal of Biotechnology** **67**(1): 67-75.

- Grisdanurak, N., S. Chiarakorn and J. Wittayakun. 2003. Utilization of Mesoporous Molecular Sieves Synthesized from Natural Source Rice Husk Silica to Chlorinated Volatile Organic Compounds (CVOCs) Adsorption. **The Korean Journal of Chemical Engineering** 20(5): 950-955.
- Helmut, K. 2001. **Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods (2001 Edition)**. Springer. ISBN: 978-3540673262.
- He, Y., E.S. Daniels, A. Klein and M.S. El-Aasser. 1997. Hydrogenation of Styrene-Butadiene Rubber (SBR) Latexes. **Journal of Applied Polymer Science** 64(10): 2,047–2,056.
- Hladnik, A. and T. Muck. 2002. Characterization of Pigments in Coating Formulations for High-end Ink-Jet Papers. **Dyes and Pigments** 54(3): 253-263.
- Hunt, R.W.G. 2004. **The Reproduction of Colour (6th Edition)**. John Wiley & Sons Ltd, the Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex England. ISBN: 978-0-470-02425-6.
- Johnson, T. 1996. Methods for characterizing colour printers. **Displays** 16(4): 193-202.
- Johnston, J.H., A.J. McFarlane, T. Borrmann and J. Moraes. 2004. Nano-Structured Silicas and Silicates: New Materials and Their Applications in Paper. **Current Applied Physics** 4(2-4): 411-414.
- Jonhed, A., C.Andersson and L. Järnström. 2008. Effects of Film Forming and Hydrophobic Properties of Starches on Surface Sized Packaging Paper. **Packaging Technology and Science** 21(3): 123–135.
- Julve, D., J. Ramos, J. Pérez and M. Menéndez. 2011. Analysis of Mercury Porosimetry Curves of Precipitated Silica, as an Example of Compressible Porous Solids. **Non-Crystalline Solids** 357: 1319–1327.

- Kajondecha, P and Y. Hoshino. 2008. Halftone Dot Size Variation in Offset, Electrophotographic, and Flexographic Printing and Its Perception. **Journal Imaging Science Technology** 52(6): 1-7.
- Krysztalkiewicz, A., S. Binkowski and I. Wysocka. 2003. Pigments on Amorphous Silica Carriers. **Powder Technology** 132(2-3): 190-195.
- Larotonda, F.D.S., K.N. Matsui, P.J.A. Sobral and J.B. Laurindo. 2005. Hygroscopicity and Water Vapor Permeability of Kraft Paper Impregnated with Starch Acetate. **Food Engineering, Volume** 71(4): 394-402.
- Liu, C., H. Yin, A. Wang, Z. Wu, G. Wu, T. Jiang, Y. Shen and T. Jiang. 2012. Size Controlled Preparation of Hollow Silica Spheres and Glyphosate Release. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 22(5): 1161-1168.
- Liu, G., L. Li, X. Yang and Z. Dai. 2008. Preparation of Silica/Polymer Hybrid Microspheres and the Corresponding Hollow Polymer Microspheres with Functional Groups. **Polymers for Advanced Technologies** 19(12): 1922-1930.
- Lundström, J. and A. Verikas. 2013. Assessing Print Quality by Machine in Offset Colour Print. **Knowledge-Based Systems** 37(1): 70-79.
- Maria, de, R.C., M.T. Santos and T.C. Diamantino. 2009. FTIR, A Powerful Technique in Organic Coatings Failure Diagnosis. **Proceedings of the EUROCORR 2009**: 57-64.
- Ozin, G. A., A.C. Aresenaut and L. Cademartiri. 2009. **Nanochemistry a Chemical Approach to Nanomaterials**. 2nd ed. United State of Kingdom: The Royal Society of Chemisty.
- Panpa, W. and S. Jinawath. 2008. Synthesis of ZSM-5 Zeolite and Silicalite from Rice Husk Ash. **Applied Catalysis B: Environmental**.

- Malla, P.B. and S. Devisetti. 2005. **Novel Kaolin Pigment for High Solids Ink Jet Coating**. Pulp & Paper Magazine. WASHINGTON, USA.
- Mariz, Inês, de, F.A., J.R. Leiza and C. de la Cal. José. 2011. Competitive Particle Growth: A Tool to Control the Particle Size Distribution for The Synthesis of High Solids Content Low Viscosity Latexes. **Chemical Engineering Journal**, 168(2): 938-946.
- Rafiee, E. and S. Shahebrahimi. 2012. Nano Silica with High Surface Area from Rice Husk as a Support for 12-Tungstophosphoric acid. **Chinese Journal of Catalysis** 33(8): 1,326-1,333.
- Rentzhog M. and A. Fogden. 2006. Print Quality and Resistance for Water-based Flexography on Polymer Coated Boards: Dependence on Ink Formulation and Substrate Pretreatment. **Progress in Organic Coatings**, 57(3): 183-194.
- Popil, R.E. 2006. Optimizing Water Resistance of Linerboard Coatings Using Pigments. **Tappi Journal**. September: 18-26.
- Sarangi, M., P. Nayak and T.N. Tiwari. 2011. Effect of Temperature on Nano-Crystalline Silica and Carbon Composites Obtained from Rice Husk Ash. **Composites: Part B** 42: 1994–1998.
- Selvam, P., S.K. Bhatia and C.G. Sonwane. 2001. Recent Advances in Processing and Characterization of Periodic Mesoporous MCM-41 Silicate Molecular Sieves, **Industrial. Engineering Chemical**. 40: 3237-3261.
- Tadjarodi, A., M. Haghverdi and V. Mohammadi. 2012. Preparation and Characterization of Nano-Porous Silica Aerogel from Rice Husk Ash by Drying at Atmospheric Pressure. **Materials Research Bulletin** 47: 2584–2589.

- Tang, Q., H. Xu, Y. Zheng, J. Wang, H. Li and J Zhang. 2012. Catalytic Dehydration of Methanol to Dimethyl Ether over Micro–Mesoporous ZSM-5/MCM-41 Composite Molecular Sieves. **Applied Catalysis A: General** 413–414: 36–42.
- Vacassy, R. and R.J. Flatt. 2000. Colloid and Interface. **Science**: 277-302.
- Verikas, A., J. Lundström, M. Bacauskiene and A. Gelzinis. 2011. Advances in Computational Intelligence-Based Print Quality Assessment and Control in Offset Colour Printing. **Expert Systems with Applications** 38(10): 13,441-13,447.
- Wu, J., L. Liu, B. Jiang, Z. Hu, X.Q. Wang, Y.D. Huang, D.R. Lin and Q.H. Zhang. 2012. A Coating of Silane Modified Silica Nanoparticles on PET Substrate Film for Inkjet Printing. **Applied Surface Science** 258(12): 5,131-5,134.
- Yalcin, N., and V. Sevinc. 2001. Studies on Silica Obtained from Rice Husk. **Ceramic International** 27: 219-224.
- Yuan, J., W. Xing, G. Gu and L. Wu. 2008. The properties of Organic Pigment Encapsulated with Nano-Silica via Layer-by-Layer Assembly Technique. **Dyes and Pigments** 76(2): 463-469.
- Youngwook, P.S. and S. Yongsok. 2012. A Simple Constitutive Model Describing the Steady State Shear Viscosity and Its Prediction of The First Normal Stress Function in Shear Flow. **Polymer** 53(5): 1,058-1,062.
- Zhang, M., J. Islam and S. Peethamparan. 2012. Use of Nano-Silica to Increase Early Strength and Reduce Setting Time of Concretes with High Volumes of Slag. **Cement and Concrete Composites** 34(5): 650-662.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

ตารางผนวกที่ ก1 องค์ประกอบเคมีของเถ้าแกลบ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

ตัวอย่าง	ปริมาณ (%)						
	SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Blank	93.4000	2.5400	1.4000	0.7300	0.4720	0.1910	0.1800
1M 60 min	99.6000	0.0130	0.0606	0.0352	0.0331	0.1180	0.0266
1M 120 min	98.1000	0.0272	0.9410	0.0405	0.5240	0.0915	0.0220
2M 60 min	98.7000	0.0257	0.5050	0.0383	0.4260	0.0880	0.0237
2M 120 min	98.6000	0.0261	0.5910	0.0362	0.4120	0.0971	0.0270
3M 60 min	98.9000	0.0309	0.3710	0.0402	0.3520	0.1550	0.0268
3M 120 min	98.7000	0.0268	0.5530	0.0279	0.4080	0.1210	0.0219

หมายเหตุ Blank = แกลบที่ต้มในน้ำกลั่น

ตารางผนวกที่ ก2 พิกัดสีด้วยเครื่องวัดค่าพิกัดสี (spectrophotometer)

ตัวอย่าง	CIE L*	CIE a*	CIE b*	Delta E (ISO 12647-1)
ISO 12647-6	95.00	0.00	0.00	-
Blank	85.42	+3.90	+1.71	10.48
1M 60 min	94.48	+0.46	+1.39	1.55
1M 120 min	93.78	+0.45	+1.31	1.85
2M 60 min	94.54	+0.49	+1.47	1.62
2M 120 min	94.79	+0.48	+1.24	1.35
3M 60 min	93.24	+0.73	+2.08	2.82
3M 120 min	94.47	+0.39	+1.24	1.40

หมายเหตุ ISO 12647-1 = มาตรฐานการพิมพ์-พารามิเตอร์และวิธีการวัด (มอก 2260-1, 2006),

ISO 12647-6 = มาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟสสีโซกราฟี (มอก 2260-6, 2006),

Blank = แกลบที่ต้มในน้ำกลั่น

ตารางผนวกที่ 3 ความขาวของซีลิกาด้วยเครื่องวัดค่าฟิกัดสี (spectrophotometer)

ตัวอย่าง	ความขาว (unit)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
Blank	39.65	38.76	39.58	38.53	39.28	39.16	0.444
1 M 60 min	79.22	81.55	78.96	80.96	80.17	80.17	0.989
1 M 120 min	81.55	80.31	82.13	80.05	80.27	80.86	0.824
2 M 60 min	82.98	82.71	82.13	81.76	80.27	81.97	0.952
2 M 60 min	84.12	84.99	83.58	83.44	84.85	84.20	0.635
3 M 60 min	84.76	84.22	84.98	83.51	84.06	84.31	0.522
3 M 120 min	85.55	84.74	84.82	85.57	83.88	84.91	0.623

หมายเหตุ Blank = แกลบที่ต้มในน้ำกลั่น

ตารางผนวกที่ 4 องค์ประกอบเคมีของซีลิกานาโนจากแกลบข้าว ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

ตัวอย่าง	ปริมาณ (%)						
	SiO ₂	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
RHS	98.60	0.02	0.59	0.03	0.41	0.09	0.03
Nano-RHS	99.76	0.01	0.08	0.02	0.02	0.08	0.03

หมายเหตุ RHS = ซีลิกาจากแกลบข้าว, Nano-RHS = ซีลิกานาโนจากแกลบข้าว

ตารางผนวกที่ 5 ขนาดของซิลิกานาโนจากแกลบข้าวด้วยวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค
การวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยแสงเลเซอร์ (PSD)

ตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค ($\mu\text{m.}$)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
RHS	2.674	3.198	3.456	2.135	2.014	2.70	0.6344153
Nano-RHS	0.011	0.012	0.012	0.011	0.013	0.012	0.0008367

หมายเหตุ RHS = ซิลิกาจากแกลบข้าว, Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแกลบข้าว

ตารางผนวกที่ 6 ปริมาตรของรูพรุนซิลิกาและซิลิกานาโนจากแกลบข้าวและพื้นที่ผิวจำเพาะ
(specific surface area) ด้วยวิธีการ (BET method) เพื่อดูความสามารถในการ
ดูดซับปริมาณก๊าซไนโตรเจน

ตัวอย่าง	ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธี BET (m^2/g)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
RHS	55.00	62.00	64.00	78.00	71.00	66.00	8.803
Nano-RHS	199.00	215.00	234.00	227.00	255.00	226.00	20.952

หมายเหตุ RHS = ซิลิกาจากแกลบข้าว, Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแกลบข้าว

ตารางผนวกที่ ๗ ค่าพิกัดสีด้วยเครื่องวัดค่าพิกัดสี (visible spectrophotometer)

ตัวอย่าง	CIE L*	CIE a*	CIE b*	Delta E (ISO 12647-1)
ISO 12647-6	95.00	0.00	0.00	-
RHS	94.79	+0.48	+1.24	3.28
Nano-RHS	95.64	+0.52	+0.87	2.98

หมายเหตุ ISO 12647-1 = มาตรฐานการพิมพ์-พารามิเตอร์และวิธีการวัด (มอก 2260-1, 2006),

ISO 12647-6 = มาตรฐานการพิมพ์ระบบเพล็กโซกราฟี (มอก 2260-6, 2006),

RHS = ซิลิกาจากแคลบข้าว, Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าว

ตารางผนวกที่ ๘ ความขาวของซิลิกาด้วยเครื่องวัดค่าสี (visible spectrophotometer)

ตัวอย่าง	ความขาว (unit)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
RHS	84.12	84.99	83.58	83.44	84.85	84.20	0.635
Nano-RHS	86.66	87.55	86.08	85.57	86.49	86.47	0.658

หมายเหตุ RHS = ซิลิกาจากแคลบข้าว, Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าว

ตารางผนวกที่ 9 ปริมาณของแข็งที่ไม่ระเหย (solid content) เพื่อหาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของสารเคลือบเมื่อแห้งตัว (ASTM D7232-06)

ตัวอย่าง	ค่าปริมาณของแข็ง (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
Nano-RHS (0%)	28.09	27.12	26.13	26.91	27.15	27.08	0.699643
Nano-RHS (1%)	28.22	28.08	28.42	27.21	26.33	27.65	0.871591
Nano-RHS (2%)	29.71	28.95	27.69	28.02	28.39	28.55	0.798699
Nano-RHS (3%)	31.07	29.10	28.40	28.18	29.71	29.29	1.162441
Nano-RHS (4%)	28.14	29.11	31.06	30.54	31.88	30.15	1.507873
Nano-RHS (5%)	31.92	29.80	30.45	31.26	30.91	30.87	0.802727

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เติมลงไปนสารเคลือบ

ตารางผนวกที่ 10 ความหนืดของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ด้วยเครื่องวัดค่าความหนืด Brookfield viscometer (ASTM D 2196-10)

ตัวอย่าง	ค่าความหนืด (cp.)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
Nano-RHS (0%)	37.9	36.5	36.2	36.8	36.9	36.9	0.643
Nano-RHS (1%)	41.2	39.7	38.1	38.0	38.9	39.2	1.322
Nano-RHS (2%)	40.5	39.9	39.1	42.3	40.0	40.4	1.195
Nano-RHS (3%)	41.9	42.5	42.1	42.4	44.1	42.6	0.872
Nano-RHS (4%)	46.0	45.9	45.1	44.9	43.7	45.1	0.928
Nano-RHS (5%)	45.9	48.3	47.8	47.9	47.2	47.4	0.936

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เติมลงไปนสารเคลือบ

ตารางผนวกที่ ก11 ความโปร่งใส (transparent) ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าว
ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (ASTM D1003-11e1)

ตัวอย่าง	ความโปร่งใส (%)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
Nano-RHS (0%)	78.60	79.65	78.19	79.55	77.31	78.66	0.977
Nano-RHS (1%)	51.39	52.72	52.94	51.83	53.56	52.49	0.873
Nano-RHS (2%)	43.79	42.08	41.45	42.33	42.18	42.37	0.864
Nano-RHS (3%)	36.06	35.25	35.88	36.71	33.99	35.58	1.029
Nano-RHS (4%)	32.39	29.31	29.05	30.17	30.19	30.22	1.314
Nano-RHS (5%)	27.89	27.08	24.59	26.01	25.05	26.12	1.374

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เติมลงไปนสารเคลือบ

ตารางผนวกที่ ก12 พิกัดสีของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน
(ASTM D1003-11e1)

ตัวอย่าง	วัดค่าพิกัดสีเฉลี่ย (CIE L*a*b*)					
	L*	a*	b*	SD L*	SD a*	SD b*
Nano-RHS coating (0%)	92.81	-0.88	11.54	0.280	0.885	0.413
Nano-RHS coating (1%)	79.24	0.35	14.64	0.380	0.863	0.643
Nano-RHS coating (2%)	72.71	0.24	14.25	0.573	0.230	0.349
Nano-RHS coating (3%)	67.84	0.27	15.30	0.358	0.142	0.334
Nano-RHS coating (4%)	63.54	0.26	26.14	0.546	0.629	0.297
Nano-RHS coating (5%)	59.97	0.18	27.27	0.238	0.164	0.384

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าว ที่เติมลงไปนสารเคลือบ

ตารางผนวกที่ ก13 ความเป็นเหลืองหรือค่า yellowness ของสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (ASTM E313-10)

ตัวอย่าง	ค่าความเป็นเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้ม (yellowness)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
Nano-RHS (0%)	22.77	20.73	19.68	20.73	19.64	20.71	1.270
Nano-RHS (1%)	33.50	29.44	30.44	29.48	29.46	30.46	1.749
Nano-RHS (2%)	32.65	32.83	30.38	31.59	30.60	31.61	1.130
Nano-RHS (3%)	36.37	35.01	36.08	36.36	33.41	35.45	1.268
Nano-RHS (4%)	40.88	39.99	37.91	37.90	37.92	38.92	1.418
Nano-RHS (5%)	42.77	42.94	43.89	43.84	40.83	42.85	1.241

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่เติมลงไปนสารเคลือบ

ตารางผนวกที่ ก14 พิกัดสีของกระดาษกราฟสีขาวเมื่อเคลือบสารที่ผสมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน (ISO 12647-1, ASTM D2244-11)

ตัวอย่าง	วัดค่าพิกัดสีเฉลี่ย (CIE L*a*b*)					
	L*	a*	b*	SD L*	SD a*	SD b*
Nano-RHS coating (0%)	95.06	0.58	3.85	0.383	0.122	0.283
Nano-RHS coating (1%)	95.07	0.32	4.71	0.141	0.026	0.109
Nano-RHS coating (2%)	94.27	0.52	3.78	0.094	0.082	0.213
Nano-RHS coating (3%)	94.20	0.60	3.84	0.130	0.201	0.087
Nano-RHS coating (4%)	93.66	0.51	3.85	0.269	0.060	0.521
Nano-RHS coating (5%)	93.57	0.42	5.21	0.241	0.105	0.219

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษกราฟสีขาว 170 แกรม

ตารางผนวกที่ 15 ความแตกต่างสี (ΔE) ของกระดาษกราฟที่เคลือบสารซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานกระดาษสำหรับการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี ISO 12647-6 (มอก 2260-6, ASTM D2244-11 และ CIE 1931)

ตัวอย่าง	ความแตกต่างสี (Delta E $L^*a^*b^*$) เทียบกับ ISO 12647-6					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
Nano-RHS (0%)	1.06	0.59	0.90	1.22	1.03	0.96	0.23
Nano-RHS (1%)	1.29	0.80	0.84	0.58	1.22	0.95	0.30
Nano-RHS (2%)	1.32	0.69	0.98	0.51	1.27	0.95	0.35
Nano-RHS (3%)	1.80	1.16	1.46	1.82	1.56	1.56	0.27
Nano-RHS (4%)	2.62	1.31	2.20	2.06	1.98	2.03	0.47
Nano-RHS (5%)	2.27	1.80	2.42	1.97	2.63	2.22	0.34

หมายเหตุ ISO 12647-6 = มาตรฐานการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี (มอก 2260-6, 2006) โดย

กำหนดค่า L^* : > 88 , a^* : -3 to $+3$ และ b^* : -5 to $+5$, Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษกราฟสีขาว 170 แกรม

ตารางผนวกที่ ก16 ความหนาของชั้นสารเคลือบบนกระดาษกราฟด์ที่เคลือบซิลิกานาโนจาก
 แกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ

ตัวอย่าง	ความหนาของสารเคลือบ (μm.)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
Nano-RHS (0%)	4.24	4.32	4.24	3.76	3.76	4.06	0.28
Nano-RHS (1%)	4.25	4.40	4.00	4.23	4.00	4.18	0.17
Nano-RHS (2%)	4.08	4.36	4.22	4.02	4.28	4.19	0.14
Nano-RHS (3%)	4.03	4.16	4.24	4.08	4.24	4.15	0.09
Nano-RHS (4%)	3.92	4.24	4.40	4.16	4.00	4.14	0.19
Nano-RHS (5%)	4.08	4.08	4.24	4.08	4.28	4.15	0.10

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษกราฟด์ข้าว 170 แกรม

ตารางผนวกที่ ก17 ความมันวาว (gloss) (ASTM D1223-93: 2006)

ตัวอย่าง	ความมันวาว (unit) ที่มุม 75°					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
White kraft 170gsm.	5.8	5.7	5.2	5.4	5.6	5.54	0.241
Nano-RHS (0%)	9.4	8.9	9.1	9.5	9.0	9.18	0.259
Nano-RHS (1%)	8.9	8.9	8.7	9.4	9.5	9.08	0.349
Nano-RHS (2%)	8.7	8.4	8.7	8.6	8.8	8.64	0.152
Nano-RHS (3%)	7.4	7.2	7.6	7.7	7.7	7.52	0.217
Nano-RHS (4%)	6.9	6.7	7.2	6.9	7.4	7.02	0.277
Nano-RHS (5%)	6.7	6.7	6.9	6.8	7.2	6.86	0.207

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษกราฟด์ข้าว 170 แกรม

ตารางผนวกที่ ก18 การดูดซึมน้ำ (cobb test) ของกระดาษที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่าง ๆ (TAPPI 441)

ตัวอย่าง	การดูดซึมน้ำ (g/m ²)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
White kraft 170 gsm.	124.45	109.97	113.04	112.45	108.97	113.78	6.20
Nano-RHS (0%)	57.46	49.87	48.87	54.16	49.31	51.93	3.74
Nano-RHS (1%)	66.52	64.45	59.12	58.16	71.96	64.04	5.65
Nano-RHS (2%)	61.18	65.34	69.01	72.28	61.01	65.76	4.92
Nano-RHS (3%)	69.35	77.64	70.10	76.75	81.54	75.08	5.21
Nano-RHS (4%)	92.25	81.14	88.44	91.15	90.47	88.69	4.44
Nano-RHS (5%)	99.87	110.56	101.17	108.84	99.13	103.91	5.37

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษคราฟต์ขาว 170 แกรม

ตารางผนวกที่ ก19 ความขรุขระ (roughness) ของกระดาษที่เคลือบซิลิกานาโนจากแกลบข้าว
ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (TAPPI T555)

ตัวอย่าง	ความขรุขระ (sec-beck)					ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
White kraft 170 gsm.	4.9	4.8	5.1	4.5	5.8	5.02	0.487
Nano-RHS (0%)	5.5	6.3	5.5	6.5	6.1	5.98	0.460
Nano-RHS (1%)	5.3	6.0	5.1	5.7	5.3	5.48	0.363
Nano-RHS (2%)	4.8	4.5	4.9	5.3	5.8	5.06	0.503
Nano-RHS (3%)	4.3	4.9	5.0	5.4	4.6	4.84	0.416
Nano-RHS (4%)	4.5	4.0	3.8	4.0	4.6	4.18	0.349
Nano-RHS (5%)	3.7	3.8	3.4	3.1	2.9	3.38	0.383

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษkraft 170 แกรม

ตารางผนวกที่ ก20 ความดำของหมึกพิมพ์ (density) แต่ละสี (ASTM D7305-08a)

ตัวอย่าง	ค่าความดำ (unit)					ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
C-White kraft 170 gsm.	0.68	0.62	0.66	0.65	0.67	0.66	0.023
C-Nano-RHS (0%)	0.71	0.66	0.65	0.67	0.69	0.68	0.024
C-Nano-RHS (1%)	0.83	0.80	0.89	0.85	0.84	0.84	0.033
C-Nano-RHS (2%)	0.83	0.81	0.88	0.85	0.89	0.85	0.033
C-Nano-RHS (3%)	0.85	0.80	0.91	0.95	0.92	0.89	0.060
C-Nano-RHS (4%)	0.91	0.99	0.87	0.82	0.82	0.88	0.071
C-Nano-RHS (5%)	0.98	0.99	1.05	1.03	1.01	1.01	0.029

ตารางผนวกที่ ก20 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าความดำ (unit)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
M-White kraft 170 gsm.	0.77	0.78	0.81	0.8	0.81	0.79	0.018
M-Nano-RHS (0%)	0.79	0.81	0.83	0.81	0.79	0.81	0.017
M-Nano-RHS (1%)	0.89	0.98	0.92	0.93	0.99	0.94	0.042
M-Nano-RHS (2%)	0.95	0.95	0.95	0.96	0.93	0.95	0.011
M-Nano-RHS (3%)	0.95	0.95	0.98	0.92	0.94	0.95	0.022
M-Nano-RHS (4%)	0.97	0.98	0.99	0.96	0.96	0.97	0.013
M-Nano-RHS (5%)	1.01	0.98	0.98	1.04	1.03	1.01	0.028
Y-White kraft 170 gsm.	0.56	0.52	0.53	0.55	0.56	0.54	0.018
Y-Nano-RHS (0%)	0.60	0.57	0.55	0.55	0.58	0.57	0.021
Y-Nano-RHS (1%)	0.72	0.71	0.73	0.75	0.69	0.72	0.022
Y-Nano-RHS (2%)	0.72	0.73	0.74	0.72	0.69	0.72	0.019
Y-Nano-RHS (3%)	0.75	0.74	0.73	0.76	0.73	0.74	0.013
Y-Nano-RHS (4%)	0.74	0.75	0.78	0.75	0.74	0.75	0.016
Y-Nano-RHS (5%)	0.79	0.80	0.79	0.82	0.78	0.80	0.015
K-White kraft 170 gsm.	0.72	0.7	0.73	0.68	0.67	0.70	0.025
K-Nano-RHS (0%)	0.78	0.73	0.71	0.70	0.70	0.72	0.034
K-Nano-RHS (1%)	0.94	0.95	0.99	0.99	0.94	0.96	0.026
K-Nano-RHS (2%)	0.96	1.04	0.97	0.97	0.98	0.98	0.032
K-Nano-RHS (3%)	0.94	0.94	0.99	1.06	1.03	0.99	0.054

ตารางผนวกที่ ก20 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าความดำ (unit)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
K-Nano-RHS (4%)	1.06	1.04	0.99	1.01	1.08	1.04	0.036
K-Nano-RHS (5%)	1.01	1.08	1.10	1.09	1.05	1.07	0.036

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษกราฟดำขาว 170 แกรม,

C = หมึกพิมพ์สี Cyan, M = หมึกพิมพ์สี Magenta, Y = หมึกพิมพ์สี Yellow และ

K = หมึกพิมพ์สี Black

ตารางผนวกที่ ก21 การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เม็ดสกรีน (tone value increase, TVI) แต่ละสีของงานพิมพ์ (มอก. 2260-1, 2006)

สีบนกระดาษ- วัดครั้งที่	พื้นที่เม็ดสกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
C on W-1	0	33	43	52	63	71	81	87	86	96	100
C on W-2	0	34	43	56	65	74	79	89	94	96	100
C on W-3	0	32	44	55	66	74	85	87	95	96	100
C on W-4	0	31	44	56	65	67	80	82	87	93	100
C on W-5	0	33	43	55	63	73	83	88	92	95	100
ค่าเฉลี่ย C-W	0	33	43	55	64	72	82	87	91	95	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.14	0.55	1.64	1.34	2.95	2.41	2.70	4.09	1.30	0.00
C on (0%)-1	0	37	48	59	67	78	85	91	94	98	100
C on (0%)-2	0	36	48	59	67	78	85	90	98	94	100
C on (0%)-3	0	37	45	57	68	75	85	89	96	99	100
C on (0%)-4	0	36	46	57	65	75	86	88	92	97	100
C on (0%)-5	0	34	44	57	67	76	87	88	91	97	100

ตารางผนวกที่ ก21 (ต่อ)

สึบนกระดาช- วัดครั้งที	พื้นที่เมืดสกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ค่าเฉลี่ย C-0%	0	36	46	58	67	76	86	89	94	97	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.22	1.79	1.10	1.10	1.52	0.89	1.30	2.86	1.87	0.00
C on (1%)-1	0	34	45	60	70	75	85	90	94	98	100
C on (1%)-2	0	32	51	62	71	76	82	91	95	97	100
C on (1%)-3	0	38	48	62	72	77	85	91	90	95	100
C on (1%)-4	0	34	47	59	69	73	81	90	93	95	100
C on (1%)-5	0	36	46	60	70	77	85	90	94	96	100
ค่าเฉลี่ย C-1%	0	35	47	61	70	76	84	90	93	96	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	2.28	2.30	1.34	1.14	1.67	1.95	0.55	1.92	1.30	0.00
C on (2%)-1	0	42	52	66	77	84	91	93	98	99	100
C on (2%)-2	0	36	49	60	73	80	89	93	96	98	100
C on (2%)-3	0	38	48	60	73	78	88	94	97	99	100
C on (2%)-4	0	38	49	60	72	79	87	92	93	94	100
C on (2%)-5	0	38	49	61	72	76	81	89	96	98	100
ค่าเฉลี่ย C-2%	0	38	49	61	73	79	87	92	96	98	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	2.19	1.52	2.61	2.07	2.97	3.77	1.92	1.87	2.07	0.00
C on (3%)-1	0	37	47	57	68	80	84	88	94	95	100
C on (3%)-2	0	39	49	58	70	80	85	87	93	97	100
C on (3%)-3	0	39	48	60	72	82	89	90	98	99	100
C on (3%)-4	0	35	45	59	71	80	85	90	95	98	100
C on (3%)-5	0	37	50	61	71	81	86	92	93	98	100
ค่าเฉลี่ย C-3%	0	37	48	59	70	81	86	89	95	97	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.67	1.92	1.58	1.52	0.89	1.92	1.95	2.07	1.52	0.00
C on (4%)-1	0	34	45	57	71	77	84	89	92	95	100
C on (4%)-2	0	37	49	61	69	78	89	90	93	92	100

ตารางผนวกที่ ก21 (ต่อ)

สปีบนกระดาด- วัดครั้งที่	พื้นที่เมล็ดสกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
C on (4%)-3	0	36	47	61	69	79	90	92	94	99	100
C on (4%)-4	0	36	49	61	73	79	88	92	97	99	100
C on (4%)-5	0	37	49	61	76	80	90	91	96	100	100
ค่าเฉลี่ย C-4%	0	36	48	60	72	79	88	91	94	97	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.22	1.79	1.79	2.97	1.14	2.49	1.30	2.07	3.39	0.00
C on (5%)-1	0	38	46	61	71	81	87	91	92	99	100
C on (5%)-2	0	36	46	60	72	79	85	89	93	96	100
C on (5%)-3	0	37	46	61	72	79	85	91	91	97	100
C on (5%)-4	0	36	47	60	72	78	84	89	88	95	100
C on (5%)-5	0	36	48	62	74	79	87	93	95	98	100
ค่าเฉลี่ย C-5%	0	37	47	61	72	79	86	91	92	97	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.89	0.89	0.84	1.10	1.10	1.34	1.67	2.59	1.58	0.00
M on W-1	0	35	47	64	72	82	88	94	95	99	100
M on W-2	0	37	52	63	74	82	91	93	97	100	100
M on W-3	0	35	46	62	74	80	89	92	95	98	100
M on W-4	0	35	51	65	73	79	87	94	96	99	100
M on W-5	0	37	51	64	71	80	87	93	97	99	100
ค่าเฉลี่ย M-W	0	36	49	64	73	81	88	93	96	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.10	2.70	1.14	1.30	1.34	1.67	0.84	1.00	0.71	0.00
M on (0%)-1	0	41	57	69	79	82	90	95	97	99	100
M on (0%)-2	0	41	59	69	80	85	90	97	98	99	100
M on (0%)-3	0	42	58	67	81	86	91	97	98	100	100
M on (0%)-4	0	41	55	68	78	84	89	95	98	99	100
M on (0%)-5	0	42	50	65	81	88	90	95	97	98	100
ค่าเฉลี่ย M-0%	0	41	56	68	80	85	90	96	98	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.55	3.56	1.67	1.30	2.24	0.71	1.10	0.55	0.71	0.00

ตารางผนวกที่ ก21 (ต่อ)

สปีบนกระดาษ- วัดครั้งที่	พื้นที่เมล็ดสกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
M on (1%)-1	0	38	55	64	77	83	90	94	97	98	100
M on (1%)-2	0	37	55	66	76	85	91	93	95	98	100
M on (1%)-3	0	39	54	67	77	85	91	96	97	99	100
M on (1%)-4	0	39	53	64	75	85	90	96	97	99	100
M on (1%)-5	0	38	53	65	75	84	91	94	95	99	100
ค่าเฉลี่ย M-1%	0	38	54	65	76	84	91	95	96	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.84	1.00	1.30	1.00	0.89	0.55	1.34	1.10	0.55	0.00
M on (2%)-1	0	44	58	78	88	91	94	96	98	99	100
M on (2%)-2	0	42	60	77	85	93	94	97	98	99	100
M on (2%)-3	0	44	59	76	87	92	94	97	98	99	100
M on (2%)-4	0	43	60	81	87	92	93	96	98	99	100
M on (2%)-5	0	43	58	75	82	88	93	96	98	99	100
ค่าเฉลี่ย M-2%	0	43	59	77	86	91	94	96	98	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.84	1.00	2.30	2.39	1.92	0.55	0.55	0.00	0.00	0.00
M on (3%)-1	0	45	57	68	82	81	90	95	97	100	100
M on (3%)-2	0	48	58	69	78	84	90	96	97	99	100
M on (3%)-3	0	46	61	70	80	85	91	96	97	98	100
M on (3%)-4	0	44	60	71	81	81	92	96	95	98	100
M on (3%)-5	0	45	60	73	81	86	92	95	97	99	100
ค่าเฉลี่ย M-3%	0	46	59	70	80	83	91	96	97	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.52	1.64	1.92	1.52	2.30	1.00	0.55	0.89	0.84	0.00
M on (4%)-1	0	41	58	72	83	88	92	95	98	99	100
M on (4%)-2	0	43	60	72	80	88	92	95	98	100	100
M on (4%)-3	0	43	61	72	80	87	92	95	97	98	100
M on (4%)-4	0	43	60	70	80	86	93	96	98	100	100
M on (4%)-5	0	44	58	72	81	88	92	96	97	98	100

ตารางผนวกที่ ก21 (ต่อ)

สึบนกระดาช- วัดครั้งที	พื้นที่เมืคสกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ค่าเฉลี่ย M-4%	0	43	59	72	81	87	92	95	98	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.10	1.34	0.89	1.30	0.89	0.45	0.55	0.55	1.00	0.00
M on (5%)-1	0	46	60	80	86	91	93	96	98	99	100
M on (5%)-2	0	43	62	78	85	92	95	97	98	99	100
M on (5%)-3	0	46	60	78	87	90	94	96	97	99	100
M on (5%)-4	0	45	61	79	85	91	94	97	98	99	100
M on (5%)-5	0	42	59	78	85	90	94	95	97	99	100
ค่าเฉลี่ย M-5%	0	44	60	79	86	91	94	96	98	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.82	1.14	0.89	0.89	0.84	0.71	0.84	0.55	0.00	0.00
Y on W-1	0	33	45	56	65	74	81	85	94	98	100
Y on W-2	0	33	46	58	66	74	80	83	92	94	100
Y on W-3	0	31	46	57	63	74	80	87	91	97	100
Y on W-4	0	33	48	61	67	78	83	88	96	97	100
Y on W-5	0	33	48	58	64	72	83	87	93	99	100
ค่าเฉลี่ย Y-W	0	33	47	58	65	74	81	86	93	97	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.89	1.34	1.87	1.58	2.19	1.52	2.00	1.92	1.87	0.00
Y on (0%)-1	0	34	47	58	66	76	86	90	96	98	100
Y on (0%)-2	0	33	49	60	67	75	82	89	96	99	100
Y on (0%)-3	0	36	47	61	71	81	86	91	98	99	100
Y on (0%)-4	0	34	50	58	69	77	82	94	96	98	100
Y on (0%)-5	0	33	46	58	68	75	85	92	97	99	100
ค่าเฉลี่ย Y-0%	0	34	48	59	68	77	84	91	97	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.22	1.64	1.41	1.92	2.49	2.05	1.92	0.89	0.55	0.00
Y on (1%)-1	0	33	45	55	69	71	80	89	93	97	100
Y on (1%)-2	0	33	48	57	69	75	80	85	91	95	100
Y on (1%)-3	0	34	48	57	68	77	82	88	92	96	100

ตารางผนวกที่ ก21 (ต่อ)

สปีบนกระดาด- วัดครั้งที่	พื้นที่เมล็ดสกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Y on (1%)-4	0	34	47	59	69	74	81	87	91	96	100
Y on (1%)-5	0	35	49	60	68	75	84	88	93	99	100
ค่าเฉลี่ย Y-1%	0	34	47	58	69	74	81	87	92	97	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.84	1.52	1.95	0.55	2.19	1.67	1.52	1.00	1.52	0.00
Y on (2%)-1	0	40	52	65	73	85	90	94	98	100	100
Y on (2%)-2	0	34	48	61	70	79	82	86	87	95	100
Y on (2%)-3	0	35	50	62	72	80	91	92	94	97	100
Y on (2%)-4	0	34	48	61	70	78	85	89	94	96	100
Y on (2%)-5	0	36	50	64	72	81	88	94	96	97	100
ค่าเฉลี่ย Y-2%	0	36	50	63	71	81	87	91	94	97	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	2.49	1.67	1.82	1.34	2.70	3.70	3.46	4.15	1.87	0.00
Y on (3%)-1	0	37	51	65	75	86	89	91	94	98	100
Y on (3%)-2	0	35	48	61	73	80	85	92	95	97	100
Y on (3%)-3	0	37	50	60	71	81	85	90	95	97	100
Y on (3%)-4	0	35	47	56	71	79	86	92	96	97	100
Y on (3%)-5	0	34	48	62	69	81	85	93	97	99	100
ค่าเฉลี่ย Y-3%	0	36	49	61	72	81	86	92	95	98	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.34	1.64	3.27	2.28	2.70	1.73	1.14	1.14	0.89	0.00
Y on (4%)-1	0	34	48	59	72	79	82	90	94	95	100
Y on (4%)-2	0	34	48	61	73	83	85	91	95	99	100
Y on (4%)-3	0	35	46	62	70	82	87	89	96	100	100
Y on (4%)-4	0	32	50	63	72	83	86	90	97	100	100
Y on (4%)-5	0	33	46	59	69	78	83	91	93	95	100
ค่าเฉลี่ย Y-4%	0	34	48	61	71	81	85	90	95	98	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.14	1.67	1.79	1.64	2.35	2.07	0.84	1.58	2.59	0.00

ตารางผนวกที่ ก21 (ต่อ)

สปีบนกระดาช- วัดครั้งที่	พื้นที่เมล็ดสกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Y on (5%)-1	0	39	53	72	81	90	95	97	99	100	100
Y on (5%)-2	0	39	51	67	80	89	96	97	98	97	100
Y on (5%)-3	0	36	50	66	72	89	91	96	99	100	100
Y on (5%)-4	0	39	54	75	78	90	92	96	96	100	100
Y on (5%)-5	0	38	52	68	79	89	90	94	97	98	100
ค่าเฉลี่ย Y-5%	0	38	52	70	78	89	93	96	98	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.30	1.58	3.78	3.54	0.55	2.59	1.22	1.30	1.41	0.00
K on W-1	0	32	47	61	66	76	84	84	91	100	100
K on W-2	0	33	47	60	64	69	78	83	93	96	100
K on W-3	0	34	48	60	59	70	82	89	90	98	100
K on W-4	0	34	49	63	65	72	86	88	91	98	100
K on W-5	0	31	47	61	66	73	81	84	90	96	100
ค่าเฉลี่ย K-W	0	33	48	61	64	72	82	86	91	98	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.30	0.89	1.22	2.92	2.74	3.03	2.70	1.22	1.67	0.00
K on (0%)-1	0	34	51	62	68	75	89	91	93	98	100
K on (0%)-2	0	35	53	62	66	75	85	94	96	97	100
K on (0%)-3	0	34	51	63	68	74	86	91	94	98	100
K on (0%)-4	0	35	52	65	70	76	89	93	95	98	100
K on (0%)-5	0	33	51	65	66	75	87	91	96	99	100
ค่าเฉลี่ย K-0%	0	34	52	63	68	75	87	92	95	98	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.84	0.89	1.52	1.67	0.71	1.79	1.41	1.30	0.71	0.00
K on (1%)-1	0	34	49	63	72	79	87	92	96	99	100
K on (1%)-2	0	33	48	66	73	78	88	94	95	97	100
K on (1%)-3	0	35	47	64	72	80	89	94	95	99	100
K on (1%)-4	0	34	52	65	71	79	88	93	95	98	100
K on (1%)-5	0	35	49	63	72	81	87	94	95	97	100

ตารางผนวกที่ ก21 (ต่อ)

สึบนกระดาษ- วัดครั้งที	พื้นที่เมืดสกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ค่าเฉลี่ย K-1%	0	34	49	64	72	79	88	93	95	98	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.84	1.87	1.30	0.71	1.14	0.84	0.89	0.45	1.00	0.00
K on (2%)-1	0	35	51	66	77	82	90	94	98	99	100
K on (2%)-2	0	34	49	66	74	84	91	93	97	99	100
K on (2%)-3	0	35	52	64	77	82	89	91	94	96	100
K on (2%)-4	0	34	57	68	76	82	91	93	96	98	100
K on (2%)-5	0	35	58	65	77	82	87	94	96	99	100
ค่าเฉลี่ย K-2%	0	35	53	66	76	82	90	93	96	98	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.55	3.91	1.48	1.30	0.89	1.67	1.22	1.48	1.30	0.00
K on (3%)-1	0	39	57	68	76	78	89	92	95	98	100
K on (3%)-2	0	39	55	70	77	80	89	91	95	99	100
K on (3%)-3	0	42	57	72	78	83	86	92	98	99	100
K on (3%)-4	0	41	57	71	76	85	89	94	96	99	100
K on (3%)-5	0	41	56	68	78	84	89	95	97	99	100
ค่าเฉลี่ย K-3%	0	40	56	70	77	82	88	93	96	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.34	0.89	1.79	1.00	2.92	1.34	1.64	1.30	0.45	0.00
K on (4%)-1	0	42	61	70	80	86	90	95	97	98	100
K on (4%)-2	0	41	58	67	76	89	90	92	96	99	100
K on (4%)-3	0	40	59	70	82	86	91	95	99	100	100
K on (4%)-4	0	41	58	68	80	85	93	95	99	100	100
K on (4%)-5	0	42	59	71	78	87	91	96	98	99	100
ค่าเฉลี่ย K-4%	0	41	59	69	79	87	91	95	98	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	0.84	1.22	1.64	2.28	1.52	1.22	1.52	1.30	0.84	0.00
K on (5%)-1	0	39	59	72	83	92	92	97	98	99	100
K on (5%)-2	0	42	61	75	85	91	92	96	98	99	100
K on (5%)-3	0	42	61	70	84	88	89	95	97	99	100

ตารางผนวกที่ ก21 (ต่อ)

สีบนกระดาษ- วัดครั้งที่	พื้นที่เม็ดสีกรีน (%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
K on (5%)-4	0	43	59	75	81	89	92	94	96	100	100
K on (5%)-5	0	41	60	71	82	87	91	94	95	99	100
ค่าเฉลี่ย K-5%	0	41	60	73	83	89	91	95	97	99	100
ค่าเบี่ยงเบน	0.00	1.52	1.00	2.30	1.58	2.07	1.30	1.30	1.30	0.45	0.00

หมายเหตุ W = กระดาษกราฟสีขาว 170 แกรม, (0%) = พิมพ์บนสารเคลือบที่มีเฉพาะเรซิน,
 (1%) = พิมพ์บนสารเคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเรซิน,
 (2%) = พิมพ์บนสารเคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเรซิน,
 (3%) = พิมพ์บนสารเคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเรซิน,
 (4%) = พิมพ์บนสารเคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวร้อยละ 4 โดยน้ำหนักเรซิน,
 (5%) = พิมพ์บนสารเคลือบซิลิกานาโนจากแอลบขาวร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเรซิน,
 C = หมึกพิมพ์สี Cyan, M = หมึกพิมพ์สี Magenta, Y = หมึกพิมพ์สี Yellow และ
 K = หมึกพิมพ์สี Black

ตารางผนวกที่ ก22 ความแตกต่างสี (ΔE) งานพิมพ์แต่ละสี เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานทางการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี่ ISO 12647-6 (ASTM D2244-11 และ CIE 1931)

ตัวอย่าง/สีบนกระดาษ	ค่าพิกัดสี CIE				ค่าเบี่ยงเบน
	L*	a*	b*	Delta E _{L*a*b*}	
C-White kraft 170 gsm.	69.04	-28.24	-37.68	12.68	0.51
C-Nano-RHS (0%)	68.64	-29.63	-36.57	13.34	0.52
C-Nano-RHS (1%)	67.53	-30.58	-37.82	12.21	0.23
C-Nano-RHS (2%)	68.89	-28.44	-36.19	13.38	1.02
C-Nano-RHS (3%)	68.80	-28.24	-36.66	12.97	0.77
C-Nano-RHS (4%)	68.16	-30.47	-37.01	13.08	0.64
C-Nano-RHS (5%)	68.76	-28.36	-37.51	12.56	0.54

ตารางผนวกที่ ก22 (ต่อ)

ตัวอย่าง/สีบนกระดาษ	ค่าพิกัดสี CIE				ค่าเบี่ยงเบน
	L*	a*	b*	Delta E _{L*a*b*}	
M-White kraft 170 gsm.	63.94	69.39	-16.77	21.15	0.34
M-Nano-RHS (0%)	63.98	70.25	-17.62	22.24	0.98
M-Nano-RHS (1%)	64.05	67.97	-17.22	20.81	0.42
M-Nano-RHS (2%)	64.04	69.38	-17.99	22.06	0.93
M-Nano-RHS (3%)	63.68	70.25	-18.03	22.39	0.92
M-Nano-RHS (4%)	63.71	70.29	-17.38	21.97	0.51
M-Nano-RHS (5%)	64.09	69.01	-16.58	20.91	0.26
Y-White kraft 170 gsm.	96.04	-3.94	72.38	10.42	0.39
Y-Nano-RHS (0%)	95.56	-3.89	77.64	9.98	0.51
Y-Nano-RHS (1%)	95.39	-3.98	75.09	9.51	0.36
Y-Nano-RHS (2%)	95.41	-4.15	74.88	9.43	0.20
Y-Nano-RHS (3%)	95.70	-4.01	76.64	10.03	0.66
Y-Nano-RHS (4%)	95.40	-4.21	75.46	9.57	0.88
Y-Nano-RHS (5%)	96.06	-3.85	71.39	10.88	1.01
K-White kraft 170 gsm.	54.30	1.85	3.95	23.51	1.25
K-Nano-RHS (0%)	47.12	1.81	4.19	16.46	1.27
K-Nano-RHS (1%)	38.37	1.42	2.98	7.71	1.21
K-Nano-RHS (2%)	41.42	1.67	3.72	10.79	0.66
K-Nano-RHS (3%)	41.30	1.49	3.16	10.56	2.34
K-Nano-RHS (4%)	41.30	1.53	3.80	10.69	0.95
K-Nano-RHS (5%)	53.60	1.95	4.07	22.83	1.05

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษคราฟต์ขาว 170 แกรม

C = หมึกพิมพ์สี Cyan, M = หมึกพิมพ์สี Magenta, Y = หมึกพิมพ์สี Yellow และ

K = หมึกพิมพ์สี Black

ตารางผนวกที่ ก23 ความทนทานต่อการขัดถูของงานพิมพ์บนสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโน
จากแคลบข้าว (ASTM D5264-98)

ตัวอย่าง	ความทนทานต่อการขัดถู Rub resistance (ร้อยละ)					ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	วัดครั้งที่ 5		
White kraft 170 gsm.	65	68	62	63	58	63.2	3.31
Nano-RHS (0%)	55	52	58	55	51	54.2	2.48
Nano-RHS (1%)	83	79	75	72	74	76.6	3.93
Nano-RHS (2%)	79	78	73	71	69	74.0	3.90
Nano-RHS (3%)	55	51	58	56	54	54.8	2.32
Nano-RHS (4%)	39	35	36	39	31	36.0	2.97
Nano-RHS (5%)	25	19	20	15	19	19.6	3.20

หมายเหตุ Nano-RHS = ซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่เคลือบผิวกระดาษคราฟต์ข้าว 170 แกรม



ภาคผนวก ข
ภาพถ่ายจากการทำวิจัย



ภาพผนวกที่ ข1 แกลบข้าวเปลือก



ภาพผนวกที่ ข2 ต้มแกลบข้าวด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน



ภาพผนวกที่ ข3 แกลบข้าวก่อนเผา



ภาพผนวกที่ ข4 ถั่วแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 240 นาที



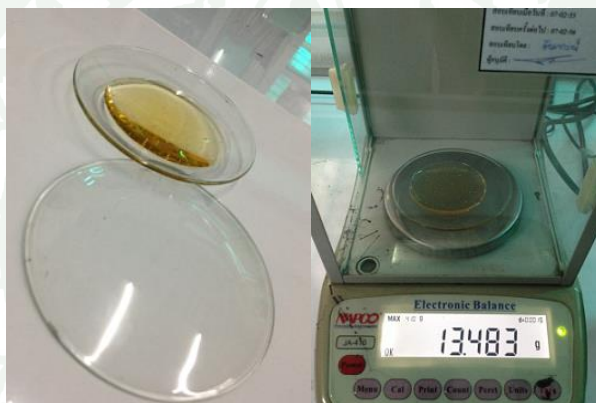
ภาพผนวกที่ ข5 เครื่องบดลูกแก้วชนิด 2 แกน



ภาพผนวกที่ ข6 ซิลิกาโนจากแกลบข้าวที่ได้จากการสังเคราะห์



ภาพผนวกที่ ข7 ปั่นกวนให้เรซินและน้ำละลายเป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพผนวกที่ ข8 เติมซิลิกานาโนจากแกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ กัน แล้วปั่นกระจายตัวโดยมีการใส่สารช่วยกระจายตัวและสารลดฟอง



ภาพผนวกที่ ข9 อุปกรณ์วัดค่าความหนืด (brookfield viscometer)



ภาพผนวกที่ ข10 อุปกรณ์วัดค่าสีของเหลว (x-rite i5) ขณะวัดค่าสีสารเคลือบ



ภาพผนวกที่ ข11 หาค่าของแข็งที่ไม่ระเหย (solid content)



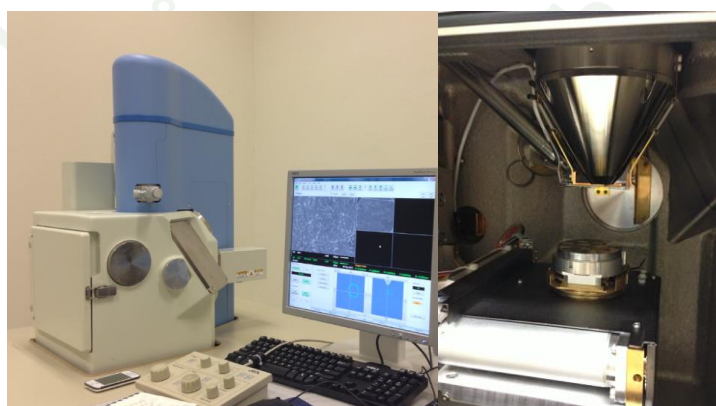
ภาพผนวกที่ ข12 วิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อดูหมู่ฟังก์ชันภายในของตัวสารเคลือบที่ผสมซิลิกานาโนจากแคลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้เครื่อง FT-IR



ภาพผนวกที่ ข13 เคลือบผิวกระดาษกราฟด้วยสารเคลือบผสมซิลิกานาโนจากเกลบข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยการเคลือบระบบลูกกลิ้งกราเวียร์ ขนาด 23.5 lpc



ภาพผนวกที่ ข14 วัดค่าความมันวาวกระดาษกราฟด้วยเครื่องวัดค่าความมันวาว มุม 75 องศา



ภาพผนวกที่ ข15 ถ่ายภาพกำลังขยายสูงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



ภาพผนวกที่ ข16 วิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำ cobb test (Tappi 441)



ภาพผนวกที่ ข17 ไฟล์งานทดสอบสี (test chart) สำหรับวิเคราะห์คุณภาพงานพิมพ์



ภาพผนวกที่ ข18 แม่พิมพ์เฟล็กโซกราฟี สี CMYK เป็นยางสังเคราะห์พื้นนูน แม่พิมพ์มีความหนา 1.14 มิลลิเมตร มีรายละเอียด 31.5 lpc



ภาพผนวกที่ ข19 พิมพ์งานทดสอบด้วยเครื่องพิมพ์เฟล็กโซกราฟี Nilpeter รุ่น 200 FB



ภาพผนวกที่ ข20 งานพิมพ์ 4 สีบนกระดาษกราฟด์ขาวที่ผ่านเคลือบซิลิกานาโนจากแถบข้าวที่อัตราส่วนผสมต่างร้อยละ 0-5 ของน้ำหนักรезิน



ภาพผนวกที่ ข21 วิเคราะห์ความคมชัดของตัวอักษรและลายเส้นด้วยกล้องจุลทรรศน์



ภาพผนวกที่ ข22 การหาค่าขอบเขตสีทางการพิมพ์ (color gamut)



ภาพผนวกที่ ข23 วัดค่าพิกัดสีของกระดาษและงานพิมพ์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์



ภาพผนวกที่ ข24 ทดสอบความทนทานต่อการขัดถูของงานพิมพ์ ด้วยเครื่อง Sutherland Rub Tester (ASTM D 5264-98)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล นายนิทัศน์ ทิพย์โสตนัยนา

วัน เดือน ปี ที่เกิด 16 พฤศจิกายน 2525

สถานที่เกิด แขวงศิริราช เขตบางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา วท.บ. (เทคโนโลยีการพิมพ์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
วท.ม. (เทคโนโลยีการพิมพ์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรณรักษ์ฯ คณะ
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี

สถานที่ทำงานปัจจุบัน ภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรณรักษ์ฯ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนน
ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ -