



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ
สาขา ภาควิชา

เรื่อง สารปรับสภาพผิวอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์/อีพอกซีเรซินของฟิล์ม
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำสำหรับการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

Surface Treating Agent of TiO₂ Nanoparticle/Epoxy Resin of LDPE Film for
Flexographic Printing

นามผู้วิจัย นางสาวดวงกมล โภคะไพบุลย์สุข

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงษ์ จารุพันธ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชिरาวดี เพชรเย็น, วท.ค.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชญารัตน์ จิฎกานูจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สารปรับสภาพผิวอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์/อีพอกซีเรซินของฟิล์ม
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำสำหรับการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

Surface Treating Agent of TiO₂ Nanoparticle/Epoxy Resin of LDPE Film for
Flexographic Printing

โดย

นางสาวดวงกมล โภคะไพบูลย์สุข

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2555

ดวงกมล โภคะไพบลูย์สุข 2555: สารปรับสภาพผิวอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์/
อิพอกซีเรซินของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำสำหรับการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ
ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์, Ph.D. 92 หน้า

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาคุณภาพงานพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยวิธีการ
ปาดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิพอกซีเรซิน เพื่อปรับสภาพผิวฟิล์มให้มีพลังงานผิว
เพิ่มมากขึ้น ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตรและ 150 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น
ร้อยละ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนักและเปรียบเทียบพลังงานผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความ
หนาแน่นต่ำ 3 ชนิด คือ ชนิดเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิพอกซี
เรซิน ชนิดไม่เคลือบผิว และชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว รวมถึงการ
วิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณภาพงานพิมพ์ด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การวัดความเข้มสีของหมึกพิมพ์
การทนต่อการขีดถู และการยึดติดของหมึกพิมพ์บนฟิล์มทั้ง 3 ชนิด หลังจากพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์
เพื่อทดสอบความสามารถทางการพิมพ์ไอจีที ระบบเฟล็กโซกราฟีโดยใช้หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี
ฐานแอลกอฮอล์ 4 สี คือ cyan magenta yellow และ black ซึ่งผลการทดลองพบว่าสารเคลือบผิว
ไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิพอกซีเรซินสามารถปรับสภาพผิวฟิล์มพอลิเอทิลีนความ
หนาแน่นต่ำให้มีค่าพลังงานผิวเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าพลังงานผิวที่เพิ่มขึ้นไม่เทียบเท่ากับฟิล์มชนิดที่
มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์ทางการค้า แต่การทนต่อการขีดถูและการยึดติดของหมึก
พิมพ์มีคุณภาพดีขึ้นหลังการเคลือบผิว หากมีการปรับปรุงเทคนิคให้อนุภาคไทเทเนียม
ไดออกไซด์ระดับนาโนมีการกระจายตัวที่ดีและไม่เกาะตัวเป็นก้อน ค่าความต้านแรงดึงหลังการ
เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนขนาด 100 นาโนเมตรที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ
0.5 ในอิพอกซีเรซินมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 30.904 เมกกะปาสคาล อีกทั้งพบว่ามีเกาะตัวเป็นกลุ่ม
ก้อนน้อยที่สุดในชั้นเคลือบ และสำหรับงานวิจัยนี้การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนขนาด
100 นาโนเมตรที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0.5 มีความเหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้เป็นอีก
วิธีการหนึ่งในปรับสภาพฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเพื่อเตรียมผิวหน้าสำหรับการพิมพ์

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Duangkamon Phokhaphaiboonsuk 2012: Surface Treating Agent of TiO₂ Nanoparticle/Epoxy Resin of LDPE Film for Flexographic Printing. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Lerpong Jarupan, Ph.D. 92 pages.

This research aimed to study printing qualities of low density polyethylene (LDPE) film by a cast coating with titanium dioxide (TiO₂) nano-particles mixed in epoxy resin for surface treatment to enhance the surface energy. Surface energy modification of the treated LDPE film used two different TiO₂ nano-particles in size (100 nm and 150 nm) and various loadings (0.5%, 1.0%, 2.0% and 4.0%, on weight basis). Surface energy of the coated LDPE film was compared with that of an uncoated LDPE film and a commercial treated LDPE film. There were printed by IGT printability tester with 4 alcohol-based flexographic printing ink *viz.*, cyan, magenta, yellow, and black, which are process colors. The print qualities in terms of visual appearance, color change, abrasive resistance, ink density and adhesion of the TiO₂-coated film, uncoated film, and commercial film were analyzed and compared. The results showed that the coating with TiO₂ nanoparticles could improve surface energy of the LDPE film although the surface energy of the coated film was less than the commercial printing film. However, it was suggested that better abrasion resistance and ink adhesion after the coating can be achieved if the technique in the distribution of particles for less agglomeration is done. Tensile strength after the coating with 0.5% 100-nm TiO₂ nano-particles was increased to 30.904 MPa. This condition showed the least agglomeration on the coating layer. To this end, it can be concluded in this study that the 0.5% 100-nm TiO₂ nano-particles was a suitably sufficient loading to use for surface treatment of LDPE film in order to prepare the surface for flexographic printing.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอพงค์ จารุพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและพิจารณาแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ รวมถึงคอยให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำดีๆ และเป็นผู้กระตุ้นให้สามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จตามระยะเวลา ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ ผู้ทรงวุฒิภายนอก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชนัสสนา นันท์วัชรินทร์ สำหรับคำแนะนำที่ทำให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุทุกท่านที่ให้ความเมตตากรุณาอบรมสั่งสอน ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ที่ให้คำปรึกษาคำแนะนำตลอดจนคอยช่วยเหลือจนการปฏิบัติงานสามารถผ่านไปได้อย่างดี

ขอขอบพระคุณบริษัทบริษัท ฟิล์มมาสเตอร์ จำกัด และบริษัท บริษัท แอมคอร์ เฟล็กซิเบิล ประเทศไทย จำกัด ที่เอื้อเฟื้อฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ บริษัท ซิกเวอร์ค (ไทยแลนด์) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานแอลกอฮอล์ 4 สี บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสทรี จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออ็อกซีและพอลิเอไมด์ เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย รวมถึงภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จครั้งนี้ อันได้แก่ คุณป้า คุณแม่ และครอบครัว ซึ่งเป็นผู้ที่ให้โอกาส ทุนทรัพย์และกำลังใจแก่ข้าพเจ้าจนมีทุกวันนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจกันตลอดมา รวมถึงผู้มีพระคุณท่านอื่นๆ ที่มีได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ ผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จ

ดวงกมล โภคะไพบุลย์สุข

เมษายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	31
สรุปและข้อเสนอแนะ	73
สรุป	73
ข้อเสนอแนะ	75
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก ค่าความหนืดของสารเคลือบผิว	81
ภาคผนวก ข ค่าการทดสอบสีของสารเคลือบ	83
ภาคผนวก ค ค่าการทดสอบความแข็งแรงของฟิล์ม	85
ภาคผนวก ง ค่าการทดสอบความเข้มสีของหมึกพิมพ์	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	92

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2	สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในผลึกรูปแบบต่างๆ	5
3	ความเป็นกรด-ด่างของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิพอกซีเรซิน	32
4	พลังงานผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว	49
5	ผลการทดสอบการทนต่อการขัดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	61
6	การจำแนกผลการทดสอบการยึดติด	66
7	ผลการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	67
ตารางผนวกที่		
ก1	ค่าความหนืดของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิพอกซีเรซิน	82
ข1	ค่าการวัดสี CIE L*a*b* ของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิพอกซีเรซิน	84
ค1	ค่าการทดสอบความแข็งแรงของฟิล์ม	86
ง1	ค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์สี Cyan	88
ง2	ค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์สี Magenta	89
ง3	ค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์สี Yellow	90
ง4	ค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์สี Black	91

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) แบบรูไทล์ (ข) แบบอนาเทส และ (ค) แบบบรูคไคท์	5
2	โครงสร้างของหมู่ไอพอกซี	7
3	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	8
4	การเคลือบโดยการจุ่ม	11
5	การเคลือบโดยใช้แท่งเหล็ก	11
6	การเคลือบโดยใช้มีด	12
7	การเคลือบโดยใช้มีดลม	13
8	การเคลือบโดยใช้ระบบกราเวียร์	14
9	การเคลือบโดยใช้ลูกกลิ้งหมุน	15
10	การเคลือบโดยปล่อยสารเคลือบผ่านหัวปล่อยและการอัดรีด	16
11	การเคลือบโดยผ่านม้วนสารเคลือบ	17
12	ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือทดสอบการชุบขีด	18
13	แนวทิศทางของแรงดึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว ที่แสดงในรูปเวกเตอร์	18
14	ลักษณะของหยดที่มีพลังงานพื้นผิวต่างๆ	19
15	หลักการพิมพ์ระบบกราเวียร์	21
16	หลักการพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี	21
17	เครื่องพิมพ์เพื่อทดสอบความสามารถทางการพิมพ์	22
18	ค่าความหนืดของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในไอพอกซีเรซิน	31
19	สเปกตรัมของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของ (ก) อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร (ข) อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	34
20	สเปกตรัมของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของไอพอกซีเรซินและพอลิเอไมด์	35
21	สเปกตรัมของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในไอพอกซีเรซินขนาด 100 นาโนเมตร (ก) ร้อยละ 0.5 (ข) ร้อยละ 1 (ค) ร้อยละ 2 (ง) ร้อยละ 4	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	สเปกตรัมของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ในอีพอกซีเรซินขนาด (ก) ร้อยละ 0.5 (ข) ร้อยละ 1 (ค) ร้อยละ 2 (ง) ร้อยละ 4	37
23	ชนิดและรูปแบบโครงสร้างผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	38
24	ชนิดและรูปแบบโครงสร้างผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	39
25	ชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิวและการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ระดับนาโนในอีพอกซีเรซิน (ก) 0.5% TiO ₂ 100 นาโนเมตร (ข) 1% TiO ₂ 100 นาโนเมตร (ค) 2% TiO ₂ 100 นาโนเมตร (ง) 4% TiO ₂ 100 นาโนเมตร	41
26	ชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิวและการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ระดับนาโนในอีพอกซีเรซิน (ก) 0.5% TiO ₂ 150 นาโนเมตร (ข) 1% TiO ₂ 150 นาโนเมตร (ค) 2% TiO ₂ 150 นาโนเมตร (ง) 4% TiO ₂ 150 นาโนเมตร	43
27	ค่าความสว่าง (L*) ของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนใน อีพอกซีเรซินบนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	45
28	ค่าสี (a*b*) ของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซี เรซินบนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	46
29	ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนและหลังการ เคลือบผิว	47
30	ค่ามอดูลัสยังของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนและหลังการเคลือบผิว	48
31	ลักษณะของสี Cyan บนงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะ ต่างๆ	51
32	ลักษณะของสี Magenta บนงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ ภาวะต่างๆ	52
33	ลักษณะของสี Yellow บนงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะ ต่างๆ	53

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
34	ลักษณะของสี Black บนงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	54
35	ความเข้มสี Cyan ของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	56
36	ความเข้มสี Magenta ของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	57
37	ความเข้มสี Yellow ของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	58
38	ความเข้มสี Black ของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	59
39	การประเมินผลการทดสอบการทนต่อการขีดถู	60
40	ลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์สี Cyan ที่ผ่านการขีดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	63
41	ลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์สี Magenta ที่ผ่านการขีดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	63
42	ลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์สี Yellow ที่ผ่านการขีดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	64
43	ลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์สี Black ที่ผ่านการขีดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	64
44	ผลของการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์สี Cyan บนเทปกาวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	69
45	ผลของการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์สี Magenta บนเทปกาวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	70
46	ผลของการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์สี Yellow บนเทปกาวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 47 ผลของการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์สี Black บนเทปกาวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ

72



สารปรับสภาพผิวอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์/อีพอกซีเรซินของฟิล์ม
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำสำหรับการพิมพ์เฟล็กโซกราฟี

Surface Treating Agent of TiO₂ Nanoparticle/Epoxy Resin of LDPE Film
for Flexographic Printing

คำนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ได้นำพลาสติกมาใช้ทดแทนบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้ว กระจก และ โลหะเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะพลาสติกที่อยู่ในรูปของฟิล์มนั้นมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นฟิล์มชนิดหนึ่งที่ยิมนำใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากหาได้ง่าย มีความยืดหยุ่น ราคาไม่สูง ทนต่อสารเคมี และสามารถผลิตให้โปร่งใสได้ในแผ่นฟิล์มที่บาง ซึ่งฟิล์มพลาสติกที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ส่วนมากจะมีผิวที่เรียบ จึงต้องมีการเตรียมผิวหน้าของวัสดุก่อนพิมพ์ เพื่อให้หมึกพิมพ์สามารถยึดติดได้ดีขึ้นบนผิวของพลาสติก (มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช, 2539) การเคลือบผิวเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ปรับผิวหน้าของพลาสติกให้มีพลังงานผิวเพิ่มมากขึ้น สามารถพิมพ์ติดได้ดีขึ้น ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำและเป็นที่ยิมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะมีการนำมาใช้เป็นสารเคลือบผิวและสารเติมแต่ง โดยมีอีพอกซีเรซินทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยึดติดระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์ม และการตรวจสอบคุณภาพงานพิมพ์บนพลาสติกนั้นสามารถพิจารณาจากการตรวจสอบความต้านทานต่อการขัดถู (rub resistance) (Rentzhog and Fogden, 2006) และการตรวจสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์บนผิวของวัสดุที่เป็นพลาสติก รวมถึงการพิจารณาความเข้มสีของหมึกพิมพ์ (density)

ด้วยเหตุผลนี้ ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซินเพื่อใช้ปรับผิวหน้าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำให้เหมาะสมต่อการพิมพ์ด้วยระบบเฟล็กโซกราฟี ศึกษาสมบัติของผิวฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนและหลังการเคลือบผิว และพิจารณาคุณภาพงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเมื่อเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของวิธีการปรับผิวหน้าพลาสติกเพื่อเตรียมพิมพ์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซินบนผิวหน้าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
2. ศึกษาสมบัติของผิวฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนและหลังการเคลือบผิว
3. ศึกษาคุณภาพงานพิมพ์เฟล็กโซกราฟีบนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเมื่อเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซิน

การตรวจเอกสาร

1. นาโนเทคโนโลยี (Nano technology)

นาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีที่เกี่ยวกับกระบวนการสร้าง สังกะระห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร (1×10^{-9} เมตร) (ชัชฎา, 2553) ซึ่งปัจจุบันเป็นที่นิยมในการนำมาประยุกต์กับอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา สารเคลือบผิว หรือผสมลงในวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับผลิตภัณฑ์ เป็นต้น (Ozin *et al.*, 2009)

1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนีย เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน (CERAM Research Ltd., 2002) มีสมบัติโดยทั่วไปดังตารางที่ 1 ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในกระบวนการบำบัดทางสิ่งแวดล้อม มีความเหมาะสมในการประยุกต์เพื่อการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) มีความคงตัวไม่เปลี่ยนรูปเมื่อเกิดปฏิกิริยาและไม่เกิดการกัดกร่อน (วิไลวรรณ, 2548) และได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์กับงานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่ฟุ้งกระจายง่าย ผสมรวมตัวได้ง่ายกับสารอื่นๆ มีความเป็นพิษต่ำและราคาไม่แพงมาก นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ หมึกพิมพ์ เครื่องสำอาง วัสดุเคลือบผิว สารเติมแต่ง เป็นส่วนผสมในพลาสติก เซรามิก เส้นใยและสิ่งทอ เป็นต้น

ไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อแบ่งตามลักษณะโครงสร้างผลึกสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ (You *et al.*, 2005) ดังภาพที่ 1 ได้แก่

1. รูไทล์ (Rutile) สามารถเหนียวทำให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูง ชนิดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนมากจะเป็นแบบรูไทล์ เช่น สี เครื่องสำอาง และอาหาร เป็นต้น

2. อนาเทส (Anatase) สามารถเหนียวทำให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทล์ ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการใส่แสง

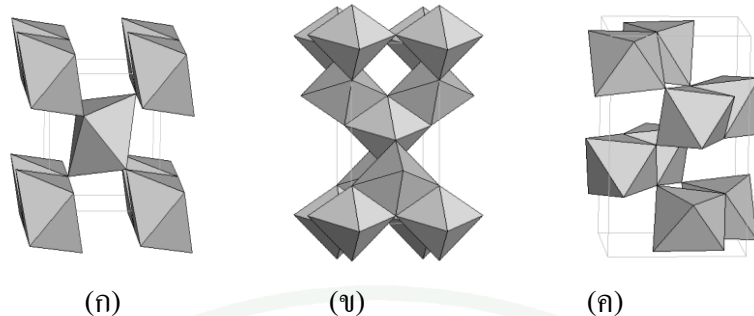
3. บรูกไคท์ (Brookite) ไม่ค่อยนิยมนำมาใช้งานในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นผลึกที่หายาก พบในแร่เท่านั้น

สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในผลึกรูปแบบต่างๆ ดังตารางที่ 2 ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในธรรมชาติ แต่ได้มาจากอิลเมไนท์ (Ilmenite) ซึ่งเป็นแร่สีดำชนิดหนึ่งพวกเหล็กไทเทเนต (Iron titanate: FeTiO_3) หรือแร่ลูโซซีน (Leucocene ores) มีลักษณะโปร่งใสเช่นเดียวกับพวกอัญมณี สะท้อนแสงได้ และมีสมบัติในการกำจัดสิ่งสกปรก

ตารางที่ 1 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

ชื่อ	ไทเทเนียมไดออกไซด์
สูตรโครงสร้าง	TiO_2
น้ำหนักโมเลกุล	79.9 หน่วยมวลอะตอม
ลักษณะและสี	ของแข็งสีขาว
จุดเดือด	2,500 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	1,830 องศาเซลเซียส

ที่มา: สุนทร (2549)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ก) แบบรูไทล์ (ข) แบบอนาเทส และ (ค) แบบบรูคไคท์

ที่มา: สุรเชษฐ์ (2551)

ตารางที่ 2 สมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ในผลึกรูปแบบต่างๆ

สมบัติ	โครงสร้าง		
	รูไทล์	อนาเทส	บรูคไคท์
น้ำหนักโมเลกุล	79.890	79.890	79.890
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	4.2743	3.895	4.123
ความถ่วงจำเพาะ	3.90-4.10	3.90-4.10	3.90-4.10
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1,800-1,900	1,835	1,800-1,900
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	2,500-3,000	2,500-3,000	2,500-3,000
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล	ออร์โธโรมบิก

ที่มา: Smyths (n.d.)

การประยุกต์ใช้งานที่สำคัญที่สุดของไทเทเนียมไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมคือ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงเพื่อใช้เป็นเม็ดสีสำหรับสร้างความขาวและความทึบแสงให้แก่ผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น สีหรือสารเคลือบต่างๆ พลาสติก กระจก หมึกพิมพ์ เส้นใย อาหาร และเครื่องสำอาง ซึ่งเป็นสารที่ใช้ผลิตเป็นเม็ดสีขาวมากที่สุด มีความขาวมากและมีดัชนีหักเหสูงรองจากเพชร (สุคนธ์, 2549) ทำให้ถูกนำมาใช้เป็นตัวทำให้ทึบแสงสำหรับสารเคลือบผิวแก้ว

กระดาษและสี จัดอยู่ในกลุ่มสารสีที่ปลอดภัย ไม่มีกลิ่น ข้อดีอีกประการของสารนี้คือ ความทนต่อการซีดของสีเมื่อสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเล็ต และยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการออกซิเดชันได้อีกด้วย (Ye *et al.*, 2007) แต่ข้อเสียของไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน คืออนุภาคจับตัวเป็นก้อนได้ง่าย (Gao *et al.*, 2006) และอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากนี้หากมีการสะสมในปริมาณมากอาจเป็นอันตรายต่อร่างกายได้

1.2 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนสำหรับสารเคลือบผิว (Coating agents)

1.2.1 ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

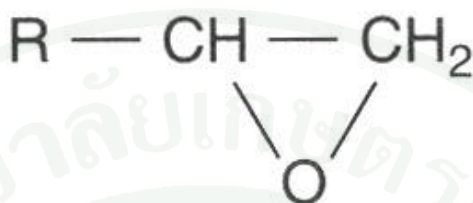
ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียและย่อยสลายซากของแบคทีเรียที่ตายแล้ว (Endotoxin) ได้เมื่อมีแสงอัลตราไวโอเล็ต (Parkin and Palgrave, 2005) ซึ่งต่างจากซิลเวอร์ไอออนซึ่งเป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนเซลล์ของแบคทีเรีย โดยไม่ต้องอาศัยแสงช่วงกระตุ้น ดังนั้นหากนำไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลเวอร์ไอออนมาใช้งานร่วมกันก็จะส่งผลต่อการกำจัดและทำลายเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถทำงานได้ทั้งในที่ที่มีแสงและไม่มีแสง

1.2.2 ความสามารถด้านการทำความสะอาดตัวเอง

ไทเทเนียมไดออกไซด์ใช้เคลือบผิวของวัสดุ เมื่อเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทำให้สามารถกำจัดสิ่งสกปรกที่ยึดเกาะบริเวณผิวของวัสดุทำให้มีความสะอาด (เนตร และ สุภัทรา, 2548) เช่น ผนังด้านนอกของอาคารที่ปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อทาผนังตึกถูกทาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาคด้วยแสง ทำให้ผนังมีสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อกระตุ้นด้วยแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่างๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และจะถูกชะล้างออกจากผนังได้เมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

2. อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin)

อีพอกซีเรซิน คือ พอลิอีเทอร์เรซินที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกซี (epoxy group) ซึ่งโครงสร้างของหมู่อีพอกซีจะประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนเชื่อมกับคาร์บอน 2 อะตอม ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างของหมู่อีพอกซี

ที่มา: Pazzi and Mittal (1994)

อีพอกซีเรซินเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตชนิดหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารเคลือบ (coating materials) สารช่วยในการยึดติด (adhesives) พลาสติกช่วยในการเสริมแรง (reinforced plastics) และเมตริกซ์เรซิน (matrix resins) สำหรับวัสดุประกอบ (composite materials) มีความถ่วงจำเพาะ 1.11 ถึง 1.18 สมบัติของอีพอกซีเรซินมีมากมาย ขึ้นรูปได้ง่าย ซึ่งเมื่ออยู่ในรูปของเหลวจะมีความสามารถในการยึดติดที่ดีกับพื้นผิววัสดุที่หลากหลาย เช่น โลหะ แก้ว พลาสติก เซรามิก และยาง เป็นต้น โดยสามารถใช้ได้ทั้งกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน ผิวเรียบ หรือขรุขระ ทนสารเคมีและตัวทำละลายได้ดี แต่มีความเหนียวต่ำและเปราะ (Bauer, 1983; Petric, 2006)

เรซินชนิดนี้แห้งตัวได้โดยการเกิดพันธะเชื่อมขวาง (cross-link) กับสารช่วยในการแห้งตัว (hardener) ซึ่งสารช่วยในการแห้งตัวที่ใช้กับอีพอกซีเรซินนั้นมีมากมาย ประกอบด้วย เอมีน (amines) เอไมด์ (amides) เมอร์แคปแทน (mercaptans) แอนไฮไดรด์ (anhydrides) กรดลิวอิส (Lewis acid) และเบส (base) ขึ้นอยู่กับชนิดและการใช้งานของเรซิน (Pazzi and Mittal, 1994)

3. พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE)

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ประเภทเทอร์โมพลาสติก มีความยืดหยุ่นทำให้มีอุณหภูมิแก้ว (T_g) ค่อนข้างต่ำ ซึ่งขึ้นกับปริมาณส่วนที่เป็นอสัณฐานและผลึก โดย T_g มีค่าตั้งแต่ -130 ถึง 60 องศาเซลเซียส มีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นพอลิเอทิลีนจึงมีทั้งยืดหยุ่นและแข็งที่ภาวะปกติ แล้วแต่ชนิดของพอลิเอทิลีนชนิดนั้นๆ (ดวงกมล และ อัญชติ, 2548) เนื่องจากพอลิเอทิลีนมีความหนาแน่นหลายระดับ ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene: HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นปานกลาง (medium density polyethylene: MDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene: LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene: LLDPE)

โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 105 ถึง 115 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่จำนวนมากจึงมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าพอลิเอทิลีน โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแสดงดังภาพที่ 3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับบรรจุภัณฑ์โดยตรงหรือใช้ประกอบติดกับอลูมิเนียมฟอยล์ กระดาษ เป็นต้น เนื่องจากหาได้ง่าย มีความยืดหยุ่น ราคาไม่สูง ทนต่อสารเคมี และสามารถผลิตให้โปร่งใสได้ในแผ่นฟิล์มที่บาง แต่บริเวณผิวจะมีลักษณะเหนียวต่อปฏิกิริยาเคมีและไม่ชอบน้ำ จึงต้องมีการปรับผิวให้มีความชอบน้ำมากขึ้นเพื่อช่วยให้มีความสามารถในการยึดติดและพิมพ์ติดดีขึ้น (Park and Jin, 2001) นิยมนำมาขึ้นรูปเป็นหีบห่อบรรจุอาหาร เช่น ถู ขวด เป็นต้น



ภาพที่ 3 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ที่มา: ดวงกมล และ อัญชติ (2548)

4. การเตรียมผิวหน้าพลาสติกก่อนการพิมพ์

ธรรมชาติของพลาสติกนั้นมีผิวที่เรียบและไม่มีความพรุนซึ่งแตกต่างจากกระดาษ ทำให้ไม่สามารถดูดซึมตัวทำละลายในหมึกพิมพ์หรือให้หมึกพิมพ์ซึมผ่านได้บ้าง เนื่องจากผิวหน้าพลาสติกทั่วไปประกอบด้วยพันธะของคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำให้มีลักษณะไม่มีขั้ว (non-polar) จึงไม่เกิดการยึดติดของหมึกพิมพ์กับพลาสติก พลาสติกส่วนใหญ่จึงพิมพ์ติดได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมผิวหน้าพลาสติกให้เหมาะสมก่อนการพิมพ์ การเตรียมผิวหน้าเป็นการดึงอะตอมของไฮโดรเจนออกและแทนที่ด้วยออกซิเจน ให้เกิดพันธะของคาร์บอนและออกซิเจนซึ่งมีขั้วสูงขึ้น ทำให้ผิวหน้าของพลาสติกกับหมึกได้ (มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช, 2539) ซึ่งการเตรียมผิวหน้าสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

4.1 การใช้ตัวทำละลายหรือสารเคมี (Solvent or chemical treatment)

เป็นการใช้ตัวทำละลายหรือสารเคมีบางชนิดทำให้ผิวหน้าของพลาสติกเกิดการบวมตัว ทำให้ผิวหน้าขรุขระไม่เรียบ

4.2 การใช้เปลวไฟ (Flame treatment)

เป็นวิธีแรกที่น่ามาใช้ในการเตรียมผิวหน้าพลาสติกพวกฟิล์มและยังคงใช้มาจนถึงปัจจุบัน แต่นิยมใช้กับพวกขวดหรือถ้วยพลาสติกมากกว่า โดยใช้วิธีการผ่านพลาสติกให้ได้รับเปลวไฟส่วนที่เป็นเปลวออกซิไดซ์ (ส่วนปลายของเปลวไฟที่มีสีน้ำเงิน) ในช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 0.2-3.0 วินาที ทำให้ผิวหน้าของพลาสติกเกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ลักษณะมีขั้วสูงขึ้น หากเป็นพวกฟิล์มพลาสติกจะใช้เวลาในการผ่านสั้นกว่าพวกขวดหรือถ้วยพลาสติก ซึ่งการเตรียมผิวหน้าพลาสติกพวกฟิล์มบางทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากต้องไม่ให้ฟิล์มได้รับความร้อนมากเกินไปจนเกิดการเหยียน โดยปกติเมื่อเตรียมผิวหน้าพลาสติกด้วยเปลวไฟแล้วควรนำมาใช้พิมพ์ภายใน 24 ชั่วโมง

4.3 การยิงด้วยประจุไฟฟ้า (Corona discharge)

เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมผิวหน้าพลาสติกพวกฟิล์มบางมากที่สุดและมักใช้ทำอย่างต่อเนื่องกับกระบวนการผลิตฟิล์มพลาสติกด้วยการรีด หลักการของวิธีนี้คือ พลาสติกที่

ต้องการเตรียมผิวจะอยู่ระหว่างขั้ว 2 ขั้วที่อยู่ห่างกันประมาณ 1.5 ถึง 3.0 มิลลิเมตร และเมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในขั้วไฟฟ้า อากาศบริเวณช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจะถูกทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งจะทำให้ผิวฟิล์มเกิดออกซิเดชันและมีลักษณะขรุขระสูงชัน ส่งผลให้หมึกพิมพ์ยึดติดผิวฟิล์มได้ดีขึ้น แต่ฟิล์มที่ผ่านการเตรียมผิวหน้าจะเสื่อมสภาพลงได้เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งและเกิดฝุ่นเกาะได้ง่าย จึงไม่ควรเก็บไว้ก่อนนำไปใช้พิมพ์

5. กระบวนการเคลือบผิว (Coating process)

การเคลือบผิววัสดุต่างๆ สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ การทา (spreading process) และการพ่น (spraying process) สำหรับวิธีการทายังแบ่งได้เป็นการใช้แปรงทา การใช้ลูกกลิ้ง การจุ่ม เป็นต้น ส่วนวิธีการพ่นก็ยังรวมไปถึงการใช้ผงสีและชุบด้วยไฟฟ้า (electro deposition) (อรอุษา, 2544) หรืออาจจะแบ่งตามจำนวนชั้นของการเคลือบผิว นั่นคือ เคลือบผิวชั้นเดียว (Single layer methods) และเคลือบผิวหลายชั้น (multilayer coating methods) (Cohen and Gutoff, 1996)

5.1 เคลือบผิวชั้นเดียว (Single layer methods)

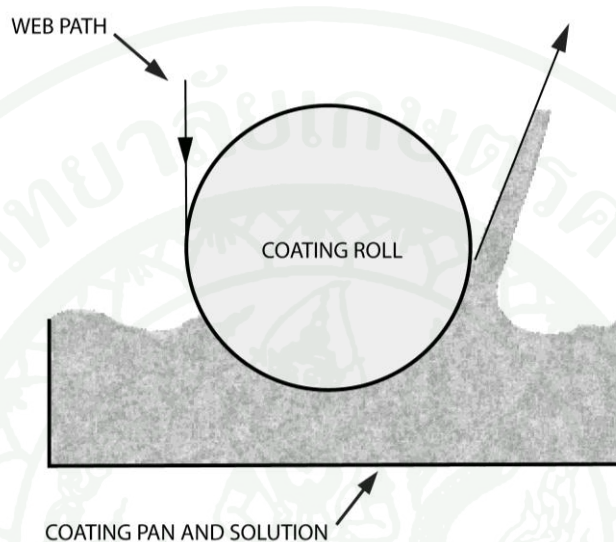
5.1.1 การเคลือบโดยการจุ่ม (Dip coating)

วิธีการเคลือบด้วยวิธีการจุ่มนั้นเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุดและง่ายที่สุด ทำได้รวดเร็วและประหยัด เหมาะสำหรับการเคลือบชิ้นงานเล็กๆ จำนวนมากๆ โดยวัสดุที่ต้องการเคลือบจะถูกจุ่มลงในอ่างสารเคลือบแล้วดึงกลับ สามารถเคลือบเพียงด้านเดียวหรือพร้อมกันทั้งสองด้านได้ ดังภาพที่ 4 สารเคลือบที่ใข้มักมีความหนืดต่ำ เหมาะกับวัสดุที่มีรูพรุน และชั้นสารเคลือบที่ได้มักมีความหนา ซึ่งความหนาของสารเคลือบบนผิววัสดุขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลือบ รวมทั้งความหนืดของสารเคลือบและองศาในการดึงวัสดุออก แต่วิธีนี้อาจมีอุปกรณ์ที่ช่วยปาดสารเคลือบส่วนเกินออกด้วยได้ (doctoring)

5.1.2 การเคลือบโดยใช้แท่งเหล็ก (Rod coating)

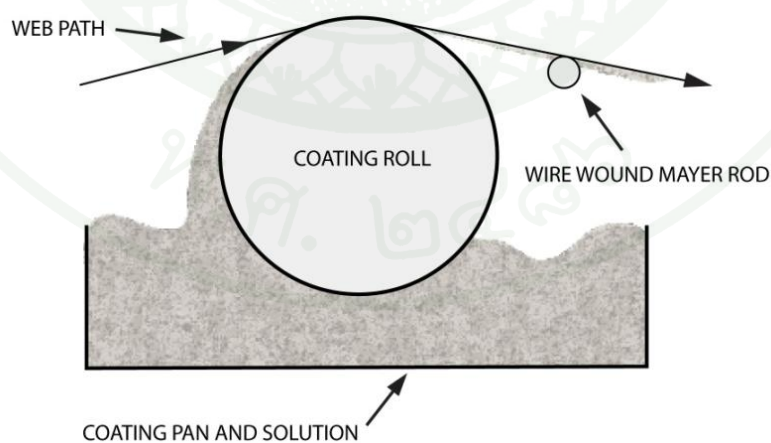
วัสดุจะรับสารเคลือบผิวมาจากลูกกลิ้งที่แช่อยู่ในอ่างสารเคลือบ แท่งเหล็ก (wire wound mayer rod) จะเป็นตัวปาดสารเคลือบส่วนเกินออก ดังภาพที่ 5 โดยปกติแล้วทิส

ทางการหมุนของแท่งเหล็กนั้นจะกำหนดให้หมุนในทิศทางเดียวกับลูกกลิ้งเคลือบหรือคนละทิศก็ได้ ความหนาของสารเคลือบบนผิววัสดุจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลือบ แรงตึงผิวของสารเคลือบและขนาดขดลวดที่พันอยู่รอบแท่งเหล็ก หากขดลวดมีขนาดใหญ่จะทำให้สารเคลือบผ่านได้น้อยและได้ชั้นสารเคลือบที่บาง



ภาพที่ 4 การเคลือบโดยการจุ่ม

ที่มา: Cohen and Guttoff (1996)

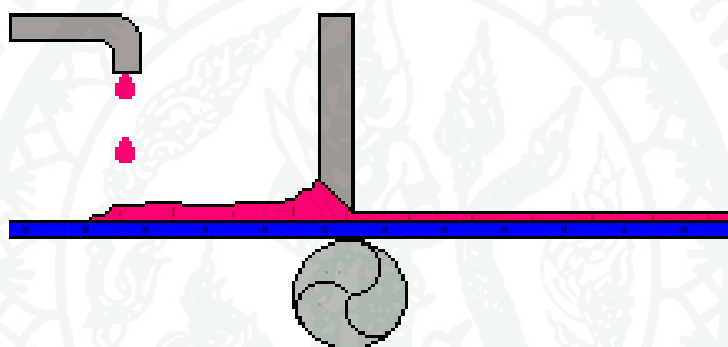


ภาพที่ 5 การเคลือบโดยใช้แท่งเหล็ก

ที่มา: Cohen and Guttoff (1996)

5.1.3 การเคลือบโดยใช้มีด (Knife coating หรือ Gap coating)

วิธีนี้สารที่นำมาเคลือบจะสัมผัสกับวัสดุโดยตรง ใบมีดปาดมีความแข็ง ไม่ยืดหยุ่นและกำหนดให้อยู่กับที่ เพื่อใช้ในการปาดสารเคลือบส่วนเกินออก บริเวณคมมีดมีทั้งแบบใบมีดตัดตรงและแบบเฉียง โดยระยะห่างระหว่างใบมีดปาดและวัสดุเป็นส่วนที่ควบคุมความหนาของสารเคลือบ ดังภาพที่ 6 เหมาะสำหรับสารเคลือบที่มีความหนืดสูง การเคลือบด้วยวิธีนี้มีแรงดันในการเคลือบ ทำให้ผิวหน้าของสารเคลือบมีความเรียบ แต่เป็นวิธีที่ต้องการการดูแลรักษาเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุปกรณ์มีการสึกหรอได้ง่าย



ภาพที่ 6 การเคลือบโดยใช้มีด

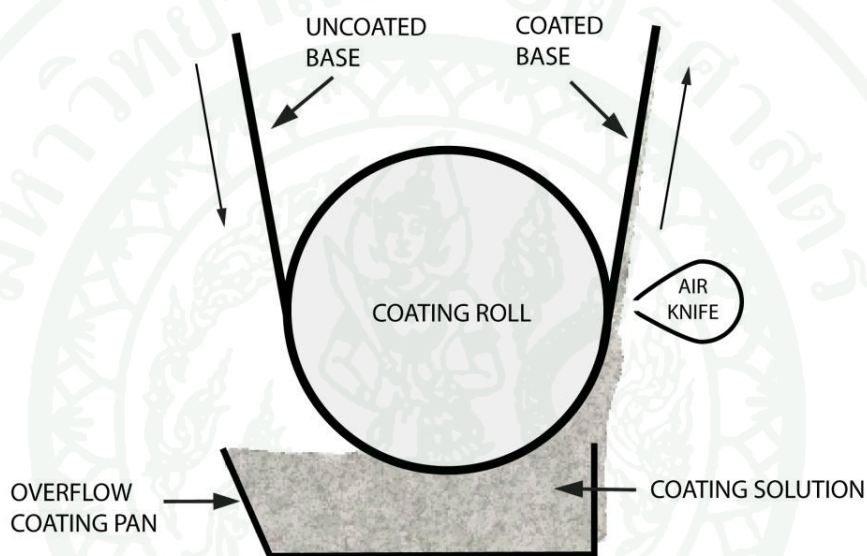
ที่มา: Technical Coating International (n.d.)

5.1.4 การเคลือบโดยใช้ใบมีด (Blade coating)

เป็นวิธีที่มีความคล้ายคลึงกับการเคลือบโดยใช้มีด (knife coating) แต่วิธีนี้ใช้มีดที่มีความยืดหยุ่นวางตั้งฉากหรือใช้ใบมีดที่มีลักษณะแข็งวางทำมุมเฉียงสวนทางกับวัสดุที่ต้องการเคลือบเพื่อปาดสารเคลือบส่วนเกินออก นิยมใช้กับสารเคลือบที่มีสารสีจำนวนมาก ให้สารเคลือบที่มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร จนถึง 30 ไมโครเมตร ซึ่งผิวหน้าของสารเคลือบที่ได้นั้นมีความเรียบเช่นเดียวกับวิธีการเคลือบโดยใช้มีด

5.1.5 การเคลือบโดยใช้มีดลม (Air knife coating)

เป็นวิธีที่ง่ายโดยใช้แรงลมความดันสูงเป่าสารเคลือบส่วนเกินออกจากวัสดุ ดังภาพที่ 7 ความเร็วที่ใช้เคลื่อนตัวของวัสดุในการเคลือบและความหนืดของสารเคลือบเป็นตัวกำหนดความหนา สารเคลือบที่ได้มีความหนาดำ เหมาะสำหรับสารเคลือบที่มีความหนืดน้อย มีน้ำเป็นองค์ประกอบ และนิยมใช้สำหรับเคลือบในอุตสาหกรรมกระดาษ

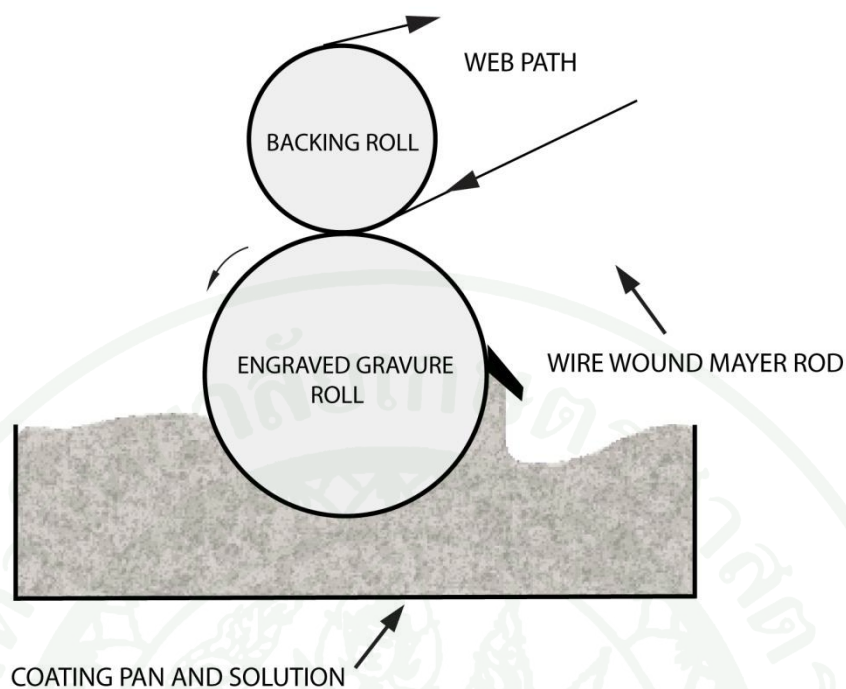


ภาพที่ 7 การเคลือบโดยใช้มีดลม

ที่มา: Cohen and Guttoff (1996)

5.1.6 การเคลือบโดยใช้ระบบกราเวียร์ (Gravure coating)

ใช้ลูกกลิ้งแกะสลัก (engraved roller) หมุนอยู่ในอ่างสารเคลือบ ทำให้สารเคลือบเกาะติดบนหลุมของลูกกลิ้ง สารเคลือบส่วนเกินจะถูกปาดออกโดยมีดปาด (doctor blade) เมื่อวัสดุวิ่งผ่านระหว่างลูกกลิ้งแกะสลักและลูกกลิ้งกด (pressure roller) สารเคลือบจะติดไปบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ ดังภาพที่ 8 สารเคลือบที่ใช้ต้องมีความหนืดต่ำกว่า 5,000 มิลลิปาสกาลวินาที (mPa s) และมีแรงตึงผิวต่ำ การเคลือบโดยใช้ระบบกราเวียร์นี้เหมาะสำหรับการเคลือบแบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลานานๆ ได้สารเคลือบที่มีความหนาดำ และมีความสม่ำเสมอ วิธีนี้แม่นยำกว่าวิธีอื่นๆ

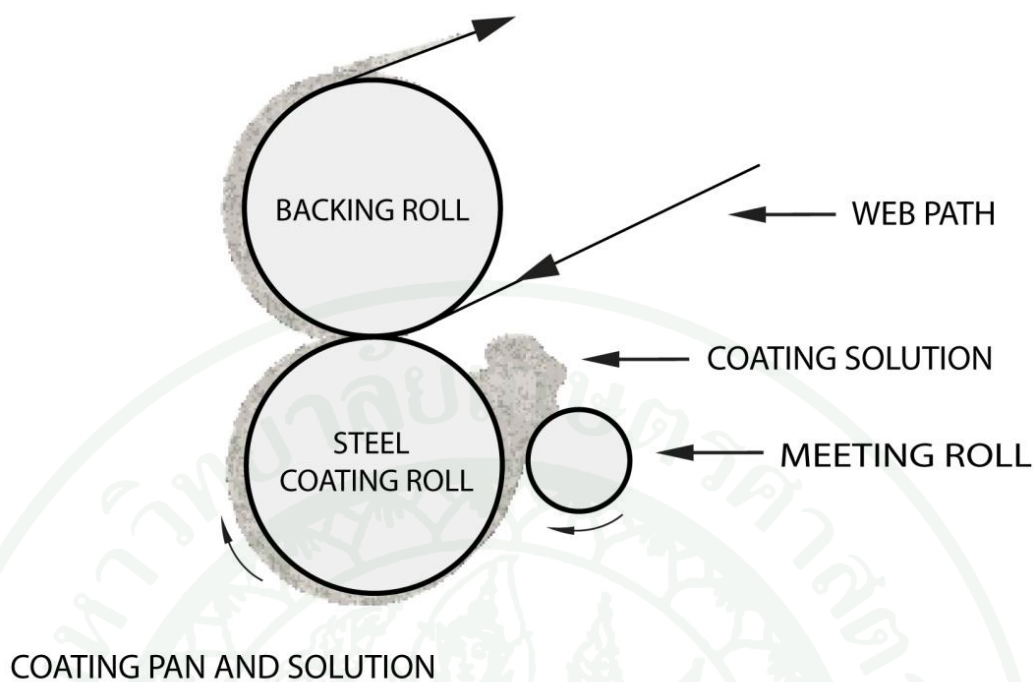


ภาพที่ 8 การเคลือบโดยใช้ระบบกราวัวร์

ที่มา: Cohen and Guttoff (1996)

5.1.7 การเคลือบโดยใช้ลูกกลิ้งหมุน (Forward and reverse roll coating)

การเคลือบโดยลูกกลิ้งหมุนไปด้านหน้า (forward roll coating) ลูกกลิ้งแอปพลิเคชัน (application roll) จะหมุนในทิศทางเดียวกับวัสดุที่นำมาเคลือบ โดยมีลูกกลิ้งที่ช่วยในการกด (impression roll) ปลดสารเคลือบออกจากช่องว่างของลูกกลิ้งทั้งสอง (nip) ส่วนการเคลือบโดยลูกกลิ้งหมุนไปด้านหลัง (reverse roll coating) ลูกกลิ้งแอปพลิเคชันจะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน ดังภาพที่ 9 ซึ่งโดยปกติการเคลือบโดยลูกกลิ้งหมุนไปด้านหน้าจะมีการใช้ในระบบการเคลือบน้อยกว่าแบบการเคลือบโดยลูกกลิ้งหมุนไปด้านหลัง

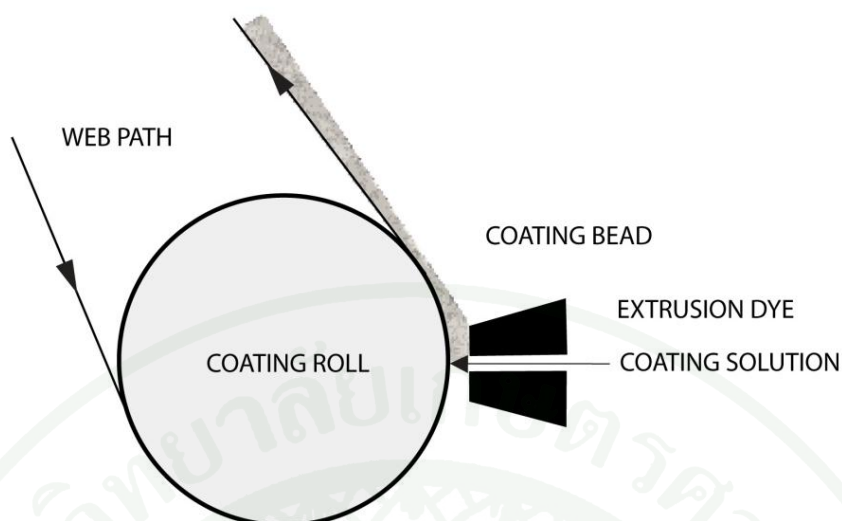


ภาพที่ 9 การเคลือบโดยใช้ลูกกลิ้งหมุน

ที่มา: Cohen and Gutoff (1996)

5.1.8 การเคลือบโดยปล่อยสารเคลือบผ่านหัวปล่อยและการอัดรีด (Slot and extrusion coating)

การเคลือบโดยปล่อยสารเคลือบผ่านไปยังหัวปล่อยซึ่งมีลักษณะเป็นช่องเล็กๆ อยู่ในระยะที่ใกล้กับวัสดุที่ต้องการเคลือบผิว ทำให้ได้สารเคลือบที่มีความหนาต่ำ เหมาะกับสารเคลือบที่มีความหนืดต่ำ ส่วนการเคลือบโดยการอัดรีดจะมีกระบวนการคล้ายกับการเคลือบโดยปล่อยสารเคลือบผ่านหัวปล่อย แต่สารเคลือบที่ใช้มักมีความหนืดที่สูงกว่า ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การเคลือบโดยปล่อยสารเคลือบผ่านหัวปล่อยและการอัดรีด

ที่มา: Cohen and Guttoff (1996)

5.2 เคลือบผิวหลายชั้น (Multilayer coating methods)

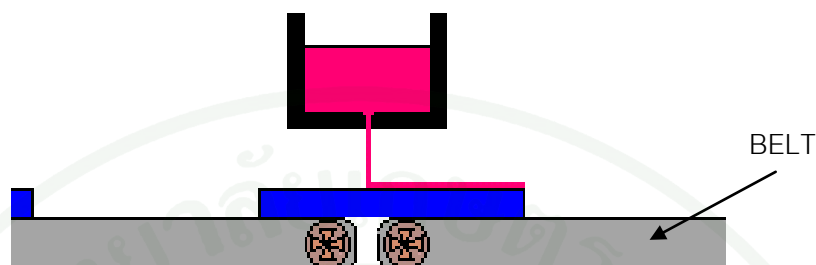
5.2.1 การเคลือบโดยการเคลื่อนที่แบบสไลด์ (Slide coating)

เป็นวิธีที่พัฒนามาใช้ในอุตสาหกรรมภาพถ่าย สำหรับการเคลือบหลายชั้นบนฟิล์ม สารเคลือบจะถูกปล่อยลงมาให้เกิดการฟอร์มตัวอยู่ระหว่างเครื่องเคลือบและวัสดุที่ต้องการเคลือบ จากนั้นวัสดุเคลื่อนลงมาปิดทับชั้นสารเคลือบโดยมีระบบสูญญากาศช่วยให้ชั้นสารเคลือบติดกับวัสดุได้อย่างแน่นหนาและได้สารเคลือบที่มีความหนาต่ำ เหมาะสำหรับสารเคลือบที่มีความหนืดต่ำ

5.2.2 การเคลือบโดยผ่านม่านสารเคลือบ (Curtain coating)

การเคลือบผิวด้วยวิธีนี้มีการใช้มานานหลายปีในอุตสาหกรรมการแปรรูป แต่ได้มีการนำมาใช้ในการเคลือบกระดาษและแม่กระดาษแผ่นไม้อัด ในกระบวนการนี้วัสดุที่ต้องการเคลือบจะเคลื่อนที่ตามสายพานไปรับสารเคลือบที่ถูกปล่อยให้ไหลลงมาสู่วัสดุ ดังภาพที่ 11 ความ

หนาของสารเคลือบขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ ในช่วงคริสต์ศักราช 1970 บริษัท โกดัก ได้นำ การเคลือบวิธีนี้มาประยุกต์ในการเคลือบฟิล์ม



ภาพที่ 11 การเคลือบโดยผ่านม่านสารเคลือบ

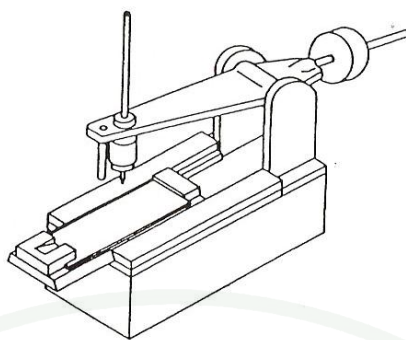
ที่มา: Technical Coating International (n.d.)

6. การทดสอบสารเคลือบผิว

6.1 ความแข็ง (Hardness)

เป็นความสามารถในการทนต่อการเกิดรอย จากการกดหรือขีดด้วยของแข็งของ สารเคลือบผิวบนฟิล์ม ซึ่งวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปคือ การทดสอบการขีด (scratch test) เป็นการหา ความต้านทานต่อการแทงทะลุของสารเคลือบผิวบนฟิล์ม โดยการขีดด้วยเข็ม ทำได้โดยใช้เครื่องมือ ทดสอบการขีด (mechanized scratch test apparatus) (อรอุษา, 2544) ดังภาพที่ 12

วิธีการทดสอบหาความแข็งของสารเคลือบผิวบนฟิล์มวิธีอื่นๆ ได้แก่ การทดสอบ ความแข็งโดยใช้ดินสอ (pencil hardness test) วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและสามารถใช้ ประโยชน์ได้ดี ซึ่งการทดสอบทำได้โดยการนำดินสอที่มีความแข็งต่างๆ กัน (ความแข็งของดินสอ จะลดลงจากเบอร์ 6H ถึง 4B) กดลงบนฟิล์ม ถ้าปลายดินสอเบอร์ใดแตกในระหว่างที่แทงทะลุผิวลง ไป ก็ถือว่าฟิล์มดังกล่าวมีความแข็งเท่ากับความแข็งของดินสอนั้น เช่น หากดินสอสามารถแทงทะลุ ผ่านผิวฟิล์มได้โดยที่ดินสอไม่แตกเลย แม้กระทั่งเบอร์ 4B ซึ่งมีความแข็งน้อยที่สุด ก็แสดงว่าฟิล์ม นั้นมีผิวเคลือบที่อ่อน (soft coating)

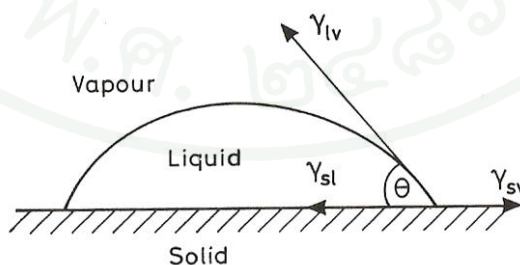


ภาพที่ 12 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือทดสอบการชุคขีด

ที่มา: อรุษา (2544)

6.2 แรงตึงผิว (Surface tension) และมุมสัมผัส (Contact angle)

แรงตึงผิวเป็นปัจจัยสำคัญของพื้นผิวและสมบัติในการยึดติดของพอลิเมอร์ แรงที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของของไหลสัมผัสกับของไหลอื่นหรือกับผิวของแข็งโดยมีพลังงานเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล เรียกว่าพลังงานอิสระที่พื้นผิว (surface free energy) มักแสดงปริมาณในรูปของพลังงานต่อระยะทาง พลังงานที่เกินพอนี้เกิดขึ้นที่ระหว่างผิวของของไหลสองชนิด ถ้าหากของไหลชนิดหนึ่งอยู่ในสถานะของเหลว พลังงานที่วัดได้จากผิวของของแข็งจะถูกเรียกว่าแรงตึงผิว ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ค่าแรงตึงผิวสามารถคำนวณได้เฉพาะวัสดุที่อยู่ในสถานะเป็นของเหลว ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว แสดงในรูปเวกเตอร์ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แนวทิศทางของแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว ที่แสดงในรูปเวกเตอร์

ที่มา: Wilson *et al.* (1990)

โดยจากแรงของเวกเตอร์ทั้ง 3 ทิศทาง จะได้ตั้งสมการที่ 1

$$\gamma_{sv} - \gamma_{sl} - \gamma_{lv} \cos \theta = 0 \quad (1)$$

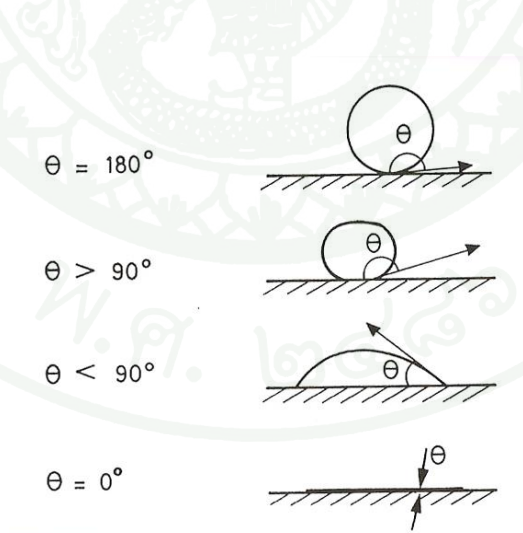
γ_{sv} คือแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ไอ ณ สภาวะสมดุล (Surface tension of solid and vapor)

γ_{sl} คือแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว ณ สภาวะสมดุล (Surface tension of solid and liquid)

γ_{lv} คือแรงตึงผิวระหว่างของเหลว-ไอ ณ สภาวะสมดุล (Surface tension of liquid and vapor)

θ คือมุมสัมผัสที่วัดได้จากหยดของของเหลวบนของแข็ง

มุมสัมผัส คือ มุมที่หยดของของเหลวทำกับพื้นผิวโดยวัดจากขอบนอกสุด (three-phase boundary) ณ สภาวะสมดุลของของเหลวที่ทำมุมกับพื้นที่ผิวของของแข็ง มุมสัมผัสของของเหลวบนผิวของของแข็งนั้น สามารถบอกระดับการเปียกผิวของของเหลว (degree of wetting) ได้ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะดังภาพที่ 14 คือ $\theta = 180^\circ$ หมายถึงของเหลวนั้นไม่สามารถเปียกผิวของแข็งได้เลย หาก $\theta > 90^\circ$ แสดงว่ามีการเปียกผิวที่ไม่ดี หาก $\theta < 90^\circ$ แสดงว่าการเปียกผิวดีแต่ยังไม่สมบูรณ์ แต่หาก $\theta = 0^\circ$ นั้นหมายถึงมีการเปียกผิวที่สมบูรณ์



ภาพที่ 14 ลักษณะของหยดที่มีพลังงานพื้นผิวต่างๆ

ที่มา: Wilson *et al.* (1990)

7. ระบบการพิมพ์ที่นิยมใช้กับฟิล์มพลาสติก

ระบบพิมพ์ที่มีความเหมาะสมและเป็นที่ยอมรับสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการพิมพ์ฟิล์มพลาสติก ได้แก่ ระบบกราเวียร์และระบบเฟล็กโซกราฟี ส่วนการเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยในการผลิต เช่น ปริมาณในการพิมพ์ ต้นทุนในการผลิต ความละเอียดของกราฟิก เป็นต้น

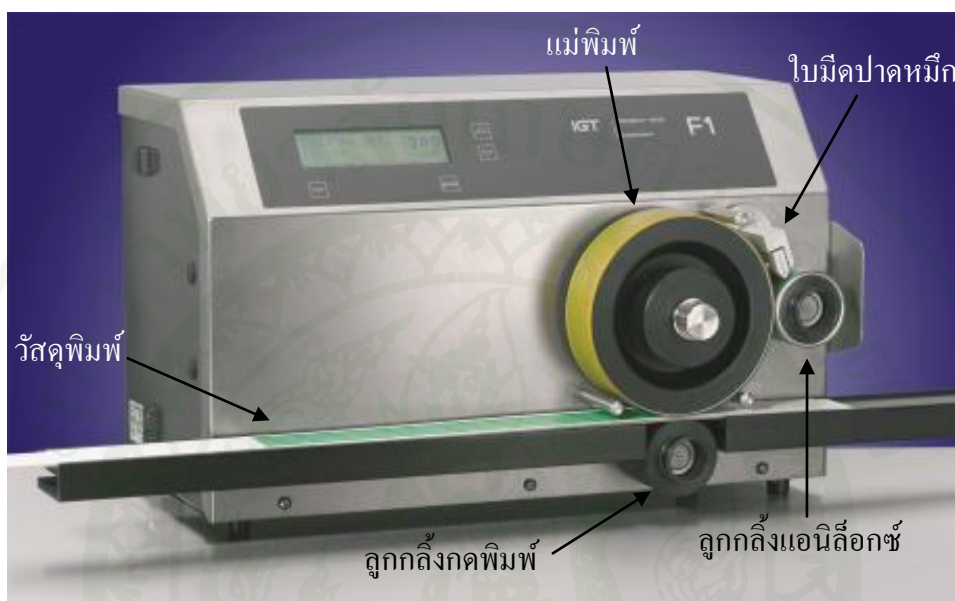
7.1 การพิมพ์ระบบกราเวียร์ (Gravure printing)

กราเวียร์เป็นระบบการพิมพ์พื้นลึก แม่พิมพ์เป็นลูกกลิ้งที่ผลิตจากท่อเหล็กกล้าแล้วนำมาชุบด้วยนิกเกิลและทองแดง จากนั้นจึงนำมาปรับผิวให้เรียบและมีความกลมสม่ำเสมอตลอดทั้งแม่พิมพ์ (มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, 2539) การสร้างภาพบนแม่พิมพ์นิยมใช้กันอยู่ 2 วิธี ได้แก่ การใช้สารเคมีกัดและใช้เครื่องเจาะหัวเพชร ซึ่งบริเวณภาพบนแม่พิมพ์จะเป็นร่องลึกลงไปเพื่อรับหมึก บริเวณไม่ใช่ภาพจะอยู่สูงกว่า โดยแม่พิมพ์บางส่วนจะจมอยู่ในอ่างหมึก ซึ่งระบบพิมพ์กราเวียร์นี้ใช้หมึกเหลว หมึกจะเข้าไปอยู่ในร่องของแม่พิมพ์ มีใบมีดปาดหมึกช่วยปาดหมึกส่วนเกินให้กลับลงสู่อ่างหมึก เมื่อวัสดุพิมพ์เคลื่อนที่มาสัมผัสกับแม่พิมพ์จะเกิดการถ่ายโอนหมึกขึ้น โดยอาศัยแรงกดพิมพ์จากลูกกลิ้งกดพิมพ์ช่วยให้ภาพคมชัด (Gravure Association of America and Gravure Education Foundation, 1991) ดังภาพที่ 15 เนื่องจากร่องลึกจะสามารถเก็บหมึกได้มาก ทำให้บริเวณนี้มีสีเข้ม ส่วนบริเวณที่เป็นร่องตื้นสีจะอ่อนกว่า ทำให้เกิดเป็นน้ำหนักภาพตามแม่พิมพ์ (ศิริพงษ์, 2530) ระบบการพิมพ์นี้นิยมใช้พิมพ์บรรจุภัณฑ์ประเภทอ่อนนุ่ม เช่น ซองพลาสติก อลูมิเนียมฟอยล์ เป็นต้น

7.2 การพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟี (Flexography printing)

เฟล็กโซกราฟีเป็นการพิมพ์ทางตรงจากแม่พิมพ์สู่วัสดุพิมพ์ ใช้หลักการแม่พิมพ์พื้นนูน บริเวณภาพบนแม่พิมพ์จะสูงกว่าบริเวณที่ไม่ใช่ภาพ หมึกจะเกาะติดบริเวณส่วนที่นูนขึ้นมาเท่านั้น (กำธร, 2521) ซึ่งแม่พิมพ์ทำจากยางหรือพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นสูง (อรรณู, 2545) ถ่ายโอนหมึกเหลวจากรางหมึก (fountain pan) ผ่านระบบควบคุมปริมาณหมึก ซึ่งมีใบมีดปาดหมึก (doctor blade) ทำหน้าที่ปาดหมึกส่วนเกินออกจากลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์ (anilox roll) ส่งต่อไปยังแม่พิมพ์ (printing plate) และวัสดุพิมพ์ตามลำดับ ดังภาพที่ 16 โดยการถ่ายโอนหมึกพิมพ์ลงบนวัสดุพิมพ์นั้นอาศัยลูกกลิ้งกดพิมพ์ เนื่องจากวัสดุพิมพ์แต่ละชนิดมีความหนาแตกต่างกัน ดังนั้นลูกกลิ้งกดพิมพ์นี้จึงต้องมีการตั้งแรงกดพิมพ์ระหว่างแม่พิมพ์และวัสดุพิมพ์ให้เหมาะสมตาม

เครื่องพิมพ์เพื่อทดสอบความสามารถทางการพิมพ์ (IGT Printability Tester) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับจำลองการพิมพ์ ระบบเฟล็กโซกราฟฟี ดังภาพที่ 17 ใช้ได้กับทั้งหมึกพิมพ์ ที่เป็นฐานน้ำ ฐานตัวทำละลาย และยูวี บนวัสดุที่หลากหลาย รวมถึงกระดาษลูกฟูก นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการตรวจสอบระบบการพิมพ์กราเวียร์ได้อีกด้วย



ภาพที่ 17 เครื่องพิมพ์เพื่อทดสอบความสามารถทางการพิมพ์

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Park and Jin (2001) ศึกษาการปรับสภาพผิวฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำด้วยวิธีการยิงด้วยประจุไฟฟ้า (corona discharge) และทำการกราฟ (grafting) ด้วยกรดอะคริลิก (acrylic acid) รวมทั้งวิเคราะห์ผลของความสามารถในการติดสี พลังงานผิว และความสัมพันธ์ของกรด-ด่าง ระหว่างการปรับสภาพพอลิเอทิลีนและสีย้อมที่ใช้ พบว่าวิธีการยิงด้วยประจุไฟฟ้าเป็นการเพิ่มหมู่ที่มีขั้ว เช่น $O=C-O$, $C=O$ และ $C-O$ เป็นต้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพลังงานผิวให้มากขึ้นและติดสีได้ดีขึ้นด้วย

Parkin and Palgrave (2005) ศึกษาการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (self-cleaning coating) โดยเฉพาะวัสดุที่มีการประยุกต์ใช้กันในการก่อสร้าง และลักษณะการเคลือบผิวเพื่อให้อยู่ในสภาวะที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ

(hydrophobic) รวมทั้งกลไกการทำความสะอาดตัวเองและความสัมพันธ์ของสมบัติของวัสดุจากการเคลือบผิว ซึ่งสามารถกำจัดสิ่งสกปรกบนพื้นผิวจากการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์ และมีกรนำไปใช้เคลือบผิวกระจกหน้าต่าง นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดแบคทีเรีย (MRSA- Superbug) ได้อีกด้วย ทั้งนี้งานวิจัยที่คล้ายคลึงกัน Yaghoubi *et al.*(2010) ได้ศึกษาและพัฒนาการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ลักษณะผลึกแบบอนาเทซขนาด 30 นาโนเมตร เพื่อสมบัติการทำความสะอาดตัวเองบนวัสดุพอลิคาร์บอเนต (polycarbonate: PC) ซึ่งเป็นการสร้างหมู่ที่ชอบน้ำบนพื้นผิวหน้าวัสดุ และทำการวิเคราะห์โดย X-ray photoelectron spectroscopy พบว่าเกิดออกซิเดชันขึ้นบริเวณผิว ทำให้มีพลังงานผิวมากขึ้น มีสมบัติเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิต โดยไม่มีการใส่สารลดแรงดึงผิว และการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อสมบัติการทำความสะอาดตัวเองบนพอลิคาร์บอเนตนั้น ทำให้มีความแข็งแรงและทนต่อการขีดขีดเพิ่มมากขึ้น แต่ความโปร่งใสลดลงร้อยละ 10-15

Rentzhog and Fogden (2006) ศึกษาการพิมพ์ด้วยหมึกอะคริลิกฐานน้ำระบบเฟล็กโซกราฟีบนแผ่นไม้ที่มีการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ 3 ชนิดที่ต่างกัน ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวแล้ว (oriented polypropylene: OPP) และ พอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP) ซึ่งคุณภาพงานพิมพ์ที่ได้และสมบัติการทนต่อภาวะต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับสูตรหมึกที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะชนิดของอิมัลชันพอลิเมอร์และสารเติมแต่งซิลิโคนที่มีอยู่ในหมึก และระดับในการปรับผิวหน้าพลาสติกด้วยวิธีการยิงด้วยประจุไฟฟ้า ปัจจัยที่กำหนดคุณภาพงานพิมพ์ ได้แก่ สมบัติเชิงกลและสมบัติการทนต่อสารเคมี การไหลของหมึก แรงดึงผิวในสภาวะเปียก และพลังงานผิวในสภาวะแห้งทั้งก่อนและหลังการพิมพ์ ผลการศึกษาพบว่า ชนิดของอิมัลชันพอลิเมอร์มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพงานพิมพ์และการทนต่อสภาวะต่างๆ ซิลิโคนในหมึกเป็นตัวกำหนดสมบัติในการทนต่อภาวะต่างๆ เช่น การยึดติด การขัดถูในสภาวะเปียกและการขีดขีด โดยซิลิโคนทำให้ความสามารถในการทนต่อการขัดถูในสภาวะเปียกลดลง แต่ทำให้ความสามารถในการทนต่อการขีดขีดเพิ่มมากขึ้น และพบว่า OPP สามารถทนการขัดถูในสภาวะเปียกได้ดีที่สุด พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำสามารถทนการขีดขีดได้ดีที่สุด และพอลิโพรพิลีนมีความสามารถในการยึดติดดีที่สุด ส่วนระดับในการปรับผิววิธีการยิงด้วยประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญน้อยกว่าการใช้ซิลิโคนเป็นสารเติมแต่งในหมึกพิมพ์

Sabzi *et al.* (2009) ได้ศึกษาผลความแตกต่างของน้ำหนักรวม amino propyl trimethoxy silane (APS) ที่กราฟในอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน ผสมกับพอลิยูรีเทน (polyurethane: PU) ใช้เป็นสารเคลือบบนวัสดุที่เป็นแก้ว เพื่อช่วยให้อนุภาคระดับนาโนมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น ปรับสมบัติเชิงกลและป้องกันแสงยูวีจากการเคลือบยูรีเทนแบบใส พบว่าเมื่อเพิ่มอนุภาคระดับ

นาโนทำให้ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ความแข็ง (hardness) และพลังงานที่ทำให้สารเคลือบผิวแตกออก (energy to break) เพิ่มมากขึ้น

Al-Turaif *et al.* (2010) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลของขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน 2 ขนาด คือ 17 นาโนเมตรและ 50 นาโนเมตร ในอัตราส่วนน้ำหนักที่ต่างกันคือร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 220 นาโนเมตร ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซี โดยพิจารณาสมบัติความเค้นแรงดึง (tensile stress) ความเค้นการโค้งงอ (flexural stress) แรงในการดึงออก (pull-off strength) และการทนต่อการขัดถู (abrasion resistance) วิเคราะห์ผลโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Scanning electron microscopy: SEM) ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนขนาดเล็กกว่าให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า เมื่อใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณร้อยละ 3 ขนาด 17 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร ให้ค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด แต่หากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 220 นาโนเมตร ต้องใช้ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักจึงจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด ส่วนสมบัติการโค้งงอที่มีค่าสูงที่สุดต้องใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่ต่ำสุดเท่านั้น นั่นคือร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

งานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนและอีพอกซีเรซินมาใช้เป็นสารเคลือบผิวสำหรับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เพื่อปรับสภาพผิวหน้าฟิล์มให้สามารถพิมพ์ติดได้ และศึกษาคุณภาพงานพิมพ์เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนนี้ เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารเคลือบเพื่อปรับผิวหน้าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เทียบเท่าการปรับผิวหน้าฟิล์มด้วยวิธีอื่น ซึ่งได้งานพิมพ์ที่มีคุณภาพ โดยทำการทดสอบคุณภาพงานพิมพ์ด้วยการตรวจสอบความสม่ำเสมอของหมึกพิมพ์ ความเข้มข้น การทนต่อการขัดถู และการยึดติดของหมึกพิมพ์ และพิจารณาคุณภาพงานพิมพ์ของฟิล์มที่มีการเคลือบผิวและไม่เคลือบผิวเปรียบเทียบกันด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุคืบ

- 1.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร จากบริษัท เมอร์ค ประเทศไทย จำกัด
- 1.2 อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร กระจายตัวอยู่ในน้ำ จากบริษัท เมอร์ค ประเทศไทย จำกัด
- 1.3 फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว แต่ทิ้งไว้เป็นเวลานานก่อนนำมาทำการวิจัย (Treat 1) จากบริษัท แอมคอร์ เฟล็กซ์เบิ้ล ประเทศไทย จำกัด และชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว (Treat 2) จากบริษัท फिल्मมาสเตอร์ จำกัด
- 1.4 फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้า (Untreat) จากบริษัท फिल्मมาสเตอร์ จำกัด
- 1.5 หมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟีฐานแอลกอฮอล์ 4 สี คือ Cyan Magenta Yellow และ Black จากบริษัท ซิกเวอร์ค (ประเทศไทย) จำกัด
- 1.6 อีพอกซีเรซิน (EPICLON 1050-75X) จากบริษัท สยามเคมีคอลอินดัสทรี จำกัด
- 1.7 พอลิเอไมด์ (LUCKAMIDE 12-242) จากบริษัท สยามเคมีคอลอินดัสทรี จำกัด
- 1.8 ปากกาทดสอบค่าพลังงานผิว (Dyne test pens) 38-40 ดายนต์ต่อเซนติเมตร (dynes/cm) จากบริษัท เอ็น เอ็น พี เทรดิง จำกัด
- 1.9 อะซิโตน (Analyzed, Merck, ประเทศเยอรมนี)
- 1.10 ไซลีน (Analyzed, Carlo Erba Reagenti, ประเทศอิตาลี)
- 1.11 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Analyzed, J.T.Baker, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 1.12 โพรพานอล (Analyzed, J.T.Baker, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- 1.13 น้ำกลั่น
- 1.14 ยูนิเวอร์แซล อินดิเคเตอร์
- 1.15 เทปกาวใสยี่ห้อ 3M เบอร์ 600
- 1.16 อลูมิเนียมฟอยล์

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 อุปกรณ์เคลือบผิว (K control coater รุ่น K 202) (RK Printcoat Instrument, ประเทศสหราชอาณาจักร)

2.2 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle meter รุ่น OCA15SEC, software SCA20) (Dataphysics, ประเทศเยอรมนี)

2.3 กล้องจุลทรรศน์ (Stereo microscope รุ่น S8APO, software Leica Application Suite) (Leica, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์)

2.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรง (Tensile strength tester รุ่น 5965) (Instron, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.5 เครื่องวัดความเข้มสี (Densitometer รุ่น vipdens 1000P) (Viptronic, ประเทศอินเดีย)

2.6 เครื่องจำลองการพิมพ์ไอจีที สำหรับระบบเพล็ทชกรรารี (IGT Printability Tester รุ่น IGT F1) (IGT Testing Systems, ประเทศเนเธอร์แลนด์)

2.7 เครื่องตรวจสอบการทนต่อการขีดถู (Ink rub tester รุ่น Sutherland 2000) (Danilee Co., ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.8 เครื่องวัดความหนืด (Viscometer รุ่น VDII+) (Brookfield, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.9 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) (X-ray diffraction รุ่น D8) (Bruker AXS, ประเทศเยอรมนี)

2.10 เครื่องวัดสี (Spectrophotometer รุ่น Spectroeye) (X-rite, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์)

2.11 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR รุ่น NiColet 6700 FTIR, software OMNIC) (Thermo Scientific, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.12 เครื่องให้ความร้อน (รุ่น C-MAG HS 7, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.13 ตู้อบ (Binder รุ่น ED53/E2, ประเทศเยอรมนี)

2.14 เครื่องชั่ง (Sartorius AG รุ่น CP 224S, ประเทศเยอรมนี)

2.15 บีกเกอร์

2.16 ซ้อนตักสาร

2.17 แท่งแก้วคนสาร

วิธีการ

1. ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนเคลือบผิว

1.1 นำฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้วและชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้า มาวัดค่าพลังงานผิวโดยใช้ปากกาทดสอบค่าพลังงานผิว 38-40 ดายนต์ต่อเซนติเมตร หลังจากนั้นฟิล์มชนิดที่ไม่ติดด้วยปากกาจะถูกนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลามากกว่า 40 ชั่วโมง โดยอ้างอิงตาม ASTM: D2578-09 เพื่อนำมาวัดมุมสัมผัสของฟิล์มด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส ทดสอบโดยการใช้ น้ำกลั่น โพรพานอลและพอลิเอทิลีนไกลคอลในการใช้คำนวณหาค่าพลังงานผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีพลังงานผิวดำกว่า 38-40 ดายนต์ต่อเซนติเมตร

2. เตรียมสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซินและศึกษาสมบัติของสารเคลือบผิว

2.1 นำอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร กระจายตัวอยู่ในน้ำ ไล่บีกเกอร์และเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วจึงนำผงไทเทเนียมไปบดให้ละเอียดก่อนนำไปใช้งาน

2.2 นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 2 ชนิดไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

2.3 เตรียมสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซิน โดยให้ความร้อนกับอิมพอกซีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร ให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก คนให้ทั่วเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงลดอุณหภูมิลงเหลือ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นผสมพอลิเอไมด์เพื่อช่วยในการแห้งตัวของอิมพอกซีเรซินลงไปในอัตราส่วนอิมพอกซีต่อพอลิเอไมด์ เท่ากับ 100:32 โดยน้ำหนัก

2.4 เตรียมสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอพอกซีเรซิน โดยให้ความร้อนกับอพอกซีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร ให้ได้ความเข้มข้นร้อยละ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก คนให้ทั่วเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงลดอุณหภูมิลงเหลือ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นผสมพอลิเอไมด์เพื่อช่วยในการแห้งตัวของอพอกซีเรซินลงไปอัตราส่วนอพอกซีต่อพอลิเอไมด์เท่ากับ 100:32 โดยน้ำหนัก

2.5 ใช้ยูนิเวอร์แซล อินดิเคเตอร์ ในการหาความเป็นกรด-ด่างของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอพอกซีเรซินและในอพอกซีเรซินผสมกับพอลิเอไมด์

2.6 หาความหนืดของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอพอกซีเรซิน โดยผสมตัวทำละลายไซลีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ต่อสารเคลือบผิวร้อยละ 60 แล้ววัดค่าความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืดบรูคฟิลด์ (brookfield viscometer) หัววัด (spindle) เบอร์ 21 ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที (rpm)

2.7 นำสารเคลือบผิวที่เตรียมไว้เคลือบด้วยวิธีการปาดลงบนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้าด้วยอุปกรณ์เคลือบผิว (K control coater) ใช้เบอร์ 0 (4 ไมโครเมตร)

3. ศึกษาสมบัติของฟิล์มหลังการเคลือบผิว

3.1 ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในแต่ละภาวะ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (stereo microscope)

3.2 ศึกษาโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 2 ชนิด รวมถึงอพอกซีเรซินผสมกับพอลิเอไมด์และสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอพอกซีเรซิน โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

3.3 วัดค่าสี CIE L*a*b* ของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอพอกซีเรซิน โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer)

3.4 วัดค่าความต้านแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของฟิล์ม (Young's modulus) ของฟิล์มชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้าก่อนการเคลือบผิว และหลังการเคลือบผิว ซึ่งก่อนทำการวัดได้นำฟิล์มไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลามากกว่า 40 ชั่วโมง โดยอ้างอิงตาม ASTM: D882-09

4. ศึกษาคุณภาพงานพิมพ์

4.1 นำฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว (Treat 1 และ Treat 2) ชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้าที่ยังไม่ได้ทำการเคลือบผิว (Untreat) และฟิล์มที่ทำการเคลือบผิวแล้วทั้ง 8 ภาวะ มาพิมพ์ด้วยเครื่องจำลองการพิมพ์ไอจีทีสำหรับระบบเพลตโซกราฟี โดยใช้หมึกพิมพ์ฐานแอลกอฮอล์ 4 สี คือ Cyan Magenta Yellow และ Black ใช้แรงกดพิมพ์ (printing force) เท่ากับ 475 นิวตัน (N) แรงกดของลูกกลิ้งแอนิล็อกซ์ (anilox force) เท่ากับ 100 นิวตัน ความเร็วในการพิมพ์ เท่ากับ 0.3 เมตร/วินาที (m/s)

4.2 วัดความเข้มสีของหมึกพิมพ์บนตัวอย่างทั้ง 11 ตัวอย่าง โดยใช้เครื่องวัดความเข้มสี (Densitometer)

4.3 ทดสอบการทนต่อการขัดถู (abrasion resistance) โดยใช้น้ำหนัก 4 ปอนด์ จำนวนครั้งในการขัดถูเท่ากับ 10 stroke ความเร็วระดับ 4 สังเกตการหลุดของหมึกพิมพ์โดยแบ่งเป็น 5 ระดับ ประเมินผลตามสมาคมการพิมพ์ไทย

4.4 ทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์ (tape test) ใช้อุปกรณ์ทำ cross-cut แนวตั้งและแนวนอน หลังจากนั้นใช้เทปกาวใส 3M เบอร์ 600 ดัดบนผิวชั้นฟิล์มของหมึกกดให้เทปกาวแนบกับผิวชั้นฟิล์มแล้วดึงออกในมุม 180 องศา สังเกตการยึดติดของหมึกพิมพ์โดยแบ่งเป็น 6 ระดับ อ้างอิงตาม ASTM D3359-09

5. วิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยใช้วิธี Duncan's test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version

6. สถานที่ทำการทดลอง

6.1 ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

6.2 ห้องปฏิบัติการทางการพิมพ์ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3 ห้องปฏิบัติการภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.4 ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

7. ระยะเวลาทำการวิจัย

เริ่มต้นตั้งแต่เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2553 และสิ้นสุดเมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2555 รวมระยะเวลาในการทำงานวิจัย 22 เดือน

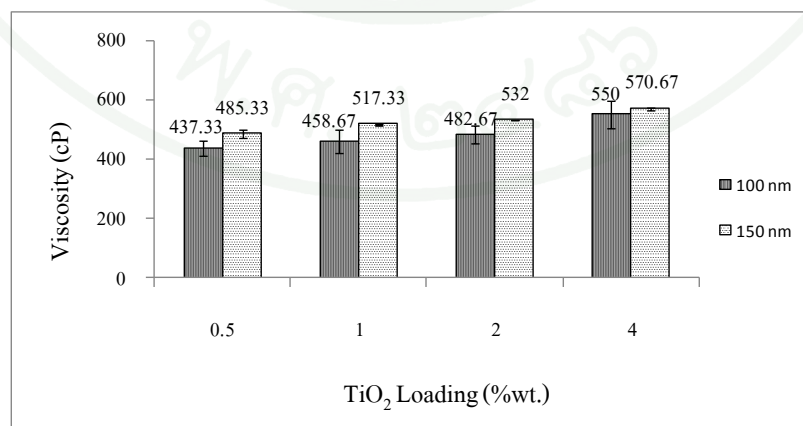
ผลและวิจารณ์

1. สารเคลือบผิว

1.1 สมบัติทางกายภาพของสารเคลือบผิว

1.1.1 ความหนืด

เนื่องจากสารเคลือบที่เตรียมได้สามารถแห้งตัวได้อย่างรวดเร็ว ขาดต่อการวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด จึงต้องผสมตัวทำละลายไซลีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักต่อสารเคลือบร้อยละ 60 เพื่อช่วยชะลอการแห้งตัว ตามมาตรฐานของบริษัท สยามเคมีคอลอินดัสทรี จำกัด ผลจากการนำสารเคลือบหลังจากผสมตัวทำละลายแล้วไปวัดค่าความหนืดพบว่า สารเคลือบทั้ง 8 ภาวะมีค่าความหนืดดังภาพที่ 18 และตารางภาคผนวก ก1 โดยสารเคลือบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก ขนาด 150 นาโนเมตร มีความหนืดสูงที่สุดเท่ากับ 570.67 เซนติพอยท์ (cP) ในขณะที่สารเคลือบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ขนาด 100 นาโนเมตร มีความหนืดต่ำที่สุดเท่ากับ 437.33 เซนติพอยท์ ความหนืดของสารเคลือบมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นและอนุภาคใหญ่ขึ้น โดยค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายตัวในอีพอกซีเรซิน ดังนั้นปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้นทำให้ค่าความหนืดของสารเคลือบเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 18 ค่าความหนืดของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซิน

1.1.2 ความเป็นกรด-ด่าง

จากการทดสอบความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอีพอกซีเรซินที่ภาวะต่างๆ พบว่าค่า pH ของอีพอกซีเรซินที่ผสมกับพอลิเอไมด์นั้นมีค่าเท่ากับ 8 ซึ่งเป็นค่าอ่อน เมื่อผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 0.5 พบว่า ค่า pH ที่ได้เท่ากับ 7 นั่นคือสารเคลือบมีความเป็นกลาง และเมื่อใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น นั่นคือ ร้อยละ 1.0 ร้อยละ 2.0 และร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่า pH ที่ได้เท่ากับ 6 สารเคลือบมีความเป็นกรดอ่อน สารเคลือบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งขนาด 100 นาโนเมตรและขนาด 150 นาโนเมตร ดังตารางที่ 3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ไปนั้นทำให้สารเคลือบมีฤทธิ์เป็นกรดมากขึ้น แต่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารเคลือบทั้งหมดนั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีฤทธิ์เป็นกลางและกรดอ่อน ซึ่งไม่เกิดการระคายเคืองหรือมีผลกระทบต่อ เมื่อนำไปใช้งานหรือนำไปพิมพ์ในกระบวนการถัดไป

ตารางที่ 3 ความเป็นกรด-ด่างของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซิน

สารเคลือบผิว	ค่า pH
อีพอกซี + พอลิเอไมด์	8
0.5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร + อีพอกซี + พอลิเอไมด์	7
1% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร + อีพอกซี + พอลิเอไมด์	6
2% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร + อีพอกซี + พอลิเอไมด์	6
4% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร + อีพอกซี + พอลิเอไมด์	6
0.5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร + อีพอกซี + พอลิเอไมด์	7
1% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร + อีพอกซี + พอลิเอไมด์	6
2% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร + อีพอกซี + พอลิเอไมด์	6
4% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร + อีพอกซี + พอลิเอไมด์	6

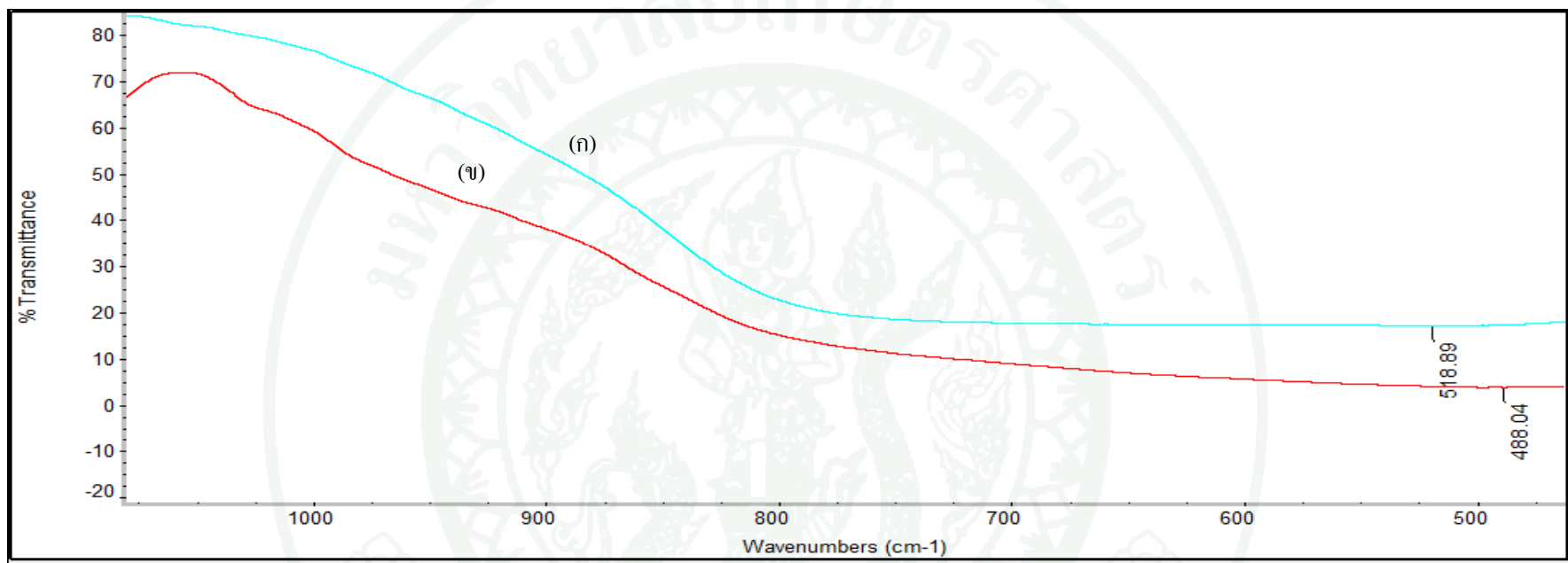
1.2 สมบัติทางเคมีของสารเคลือบผิว

จากการวิเคราะห์สารเคลือบด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่าง เมื่อวิเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตรและ 150 นาโนเมตร พบเลขคลื่นของไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วง 450 ถึง 880 cm^{-1} (Yin *et al.*, 2007) แสดงดังภาพที่ 19 ซึ่งหมู่ฟังก์ชันพบเลขคลื่นของ C-O-C ที่ประมาณ 870 cm^{-1} และ 1251 cm^{-1} ในขณะที่หมู่เอไมด์พบเลขคลื่นของ C=O ที่ประมาณ 1670 cm^{-1} และ N-H ที่ประมาณ 1557 cm^{-1} (สมเดช, 2547) และจากการวิเคราะห์ของอิพอกซีเรซินผสมกับพอลิเอไมด์แสดงภาพที่ 20 พบเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่ประมาณ 830 cm^{-1} และ 1218 cm^{-1} อีกทั้งพบเลขคลื่นของหมู่เอไมด์ที่ประมาณ 1511 cm^{-1} และ 1607 cm^{-1}

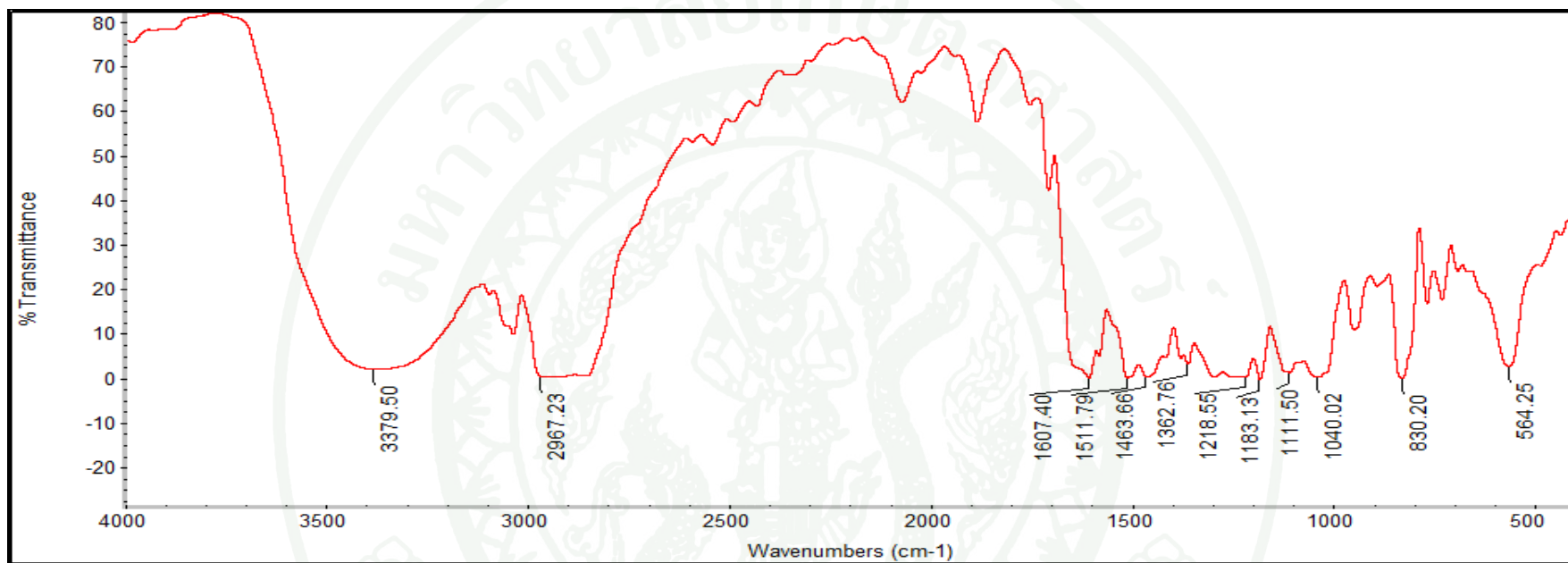
เมื่อวิเคราะห์สารเคลือบผิวพบว่าสเปกตรัมของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิพอกซีเรซินขนาด 100 นาโนเมตร และ 150 นาโนเมตร ดังภาพที่ 21 และภาพที่ 22 พบว่าตัวอย่างสารเคลือบมีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกัน พบเลขคลื่นที่ใกล้เคียงกับไทเทเนียมไดออกไซด์ หมู่ฟังก์ชันและหมู่เอไมด์ นั่นคือสารเคลือบนี้มีส่วนประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์และอิพอกซีเรซินผสมกับพอลิเอไมด์นั่นเอง

1.3 โครงสร้างของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

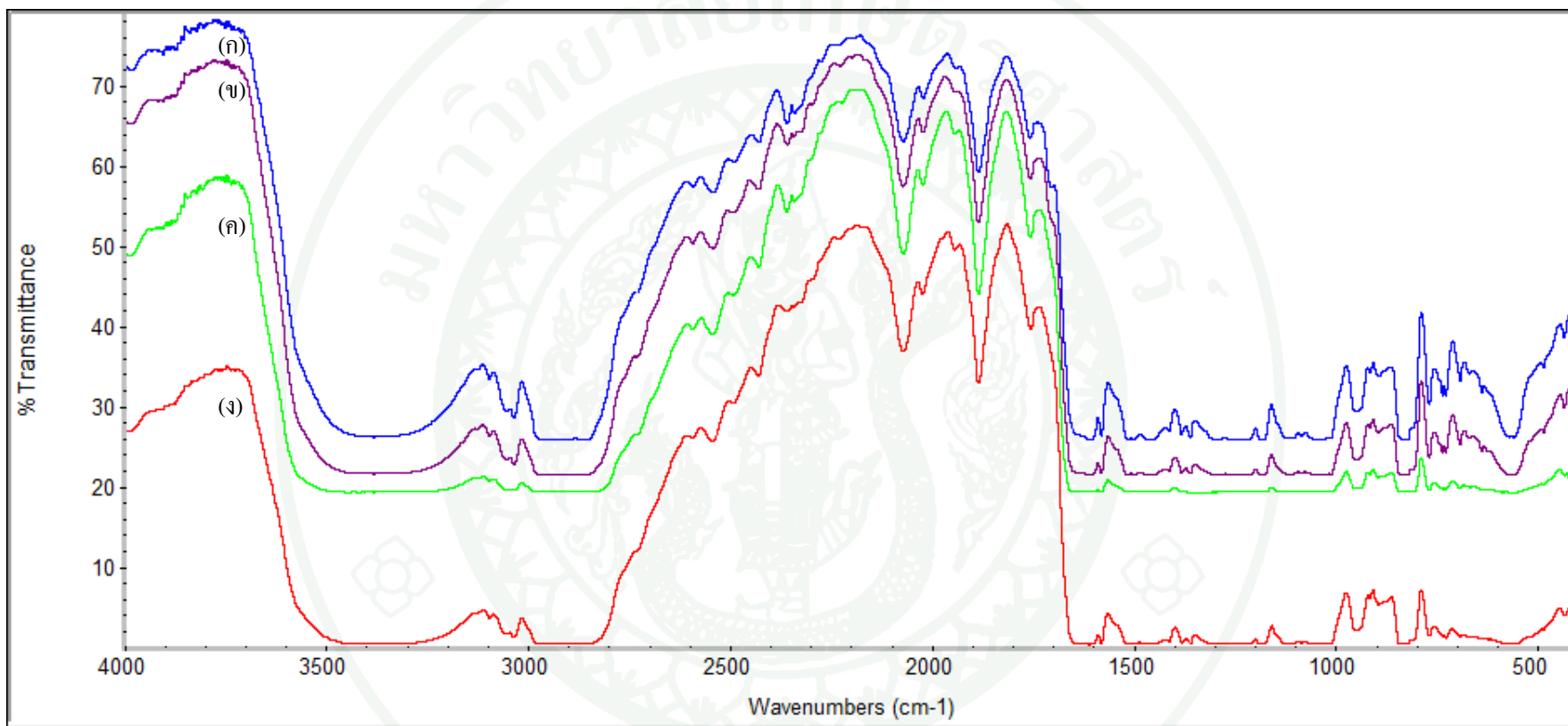
จากการวิเคราะห์อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 2 ชนิด ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร มีปริมาณโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ร้อยละ 78.82 และชนิดอนาเทสร้อยละ 21.18 ดังภาพที่ 23 ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร มีปริมาณโครงสร้างผลึกชนิดรูไทล์ร้อยละ 11.97 และชนิดอนาเทสร้อยละ 88.03 ดังภาพที่ 24 นั่นคือไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมระหว่างโครงสร้างผลึกรูไทล์และชนิดอนาเทสแต่มีส่วนของแต่ละชนิดผลึกที่แตกต่างกัน เนื่องจากชนิดของผลึกมีผลต่อความเหมาะสมในการเลือกใช้งาน (สุคนธ์, 2549)



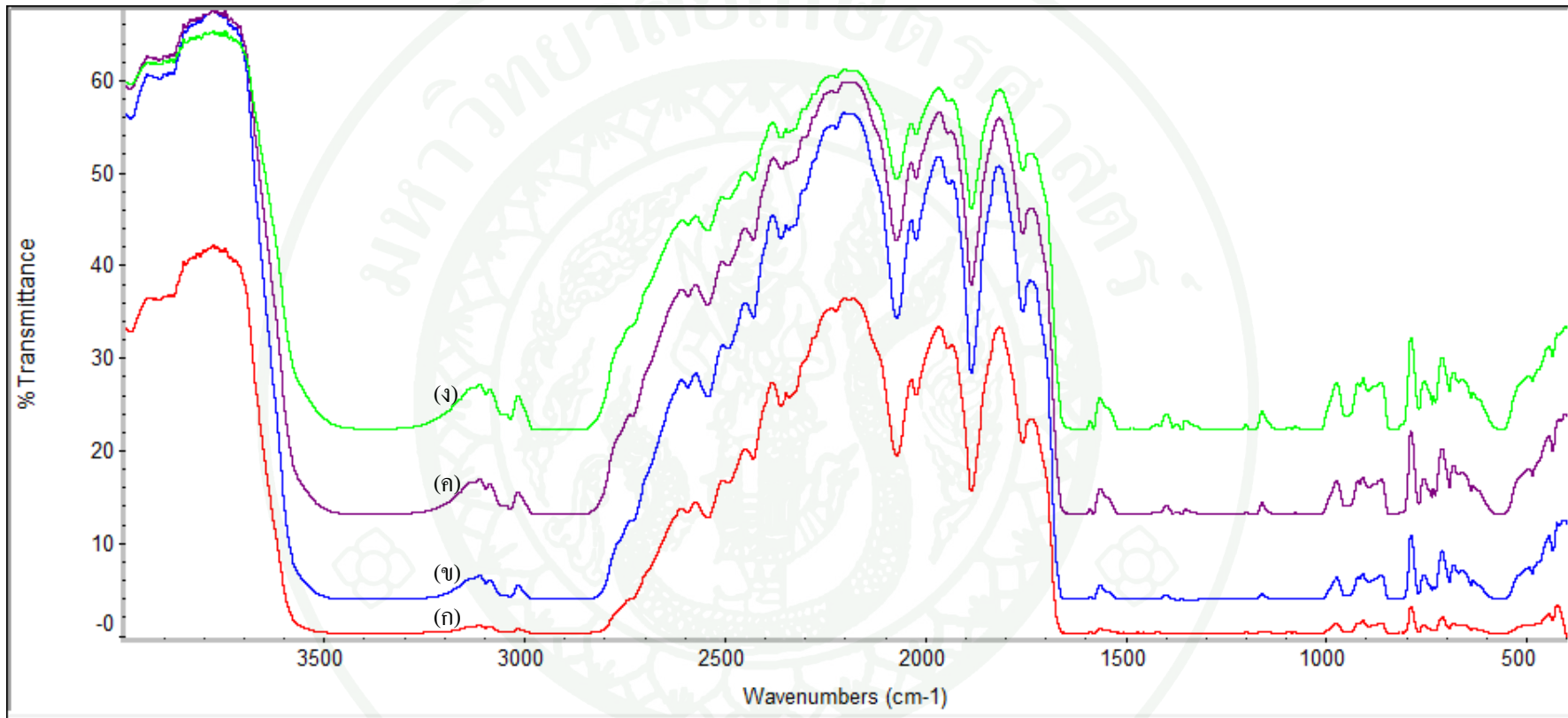
ภาพที่ 19 สเปกตรัมของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของ (ก) อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร (ข) อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร



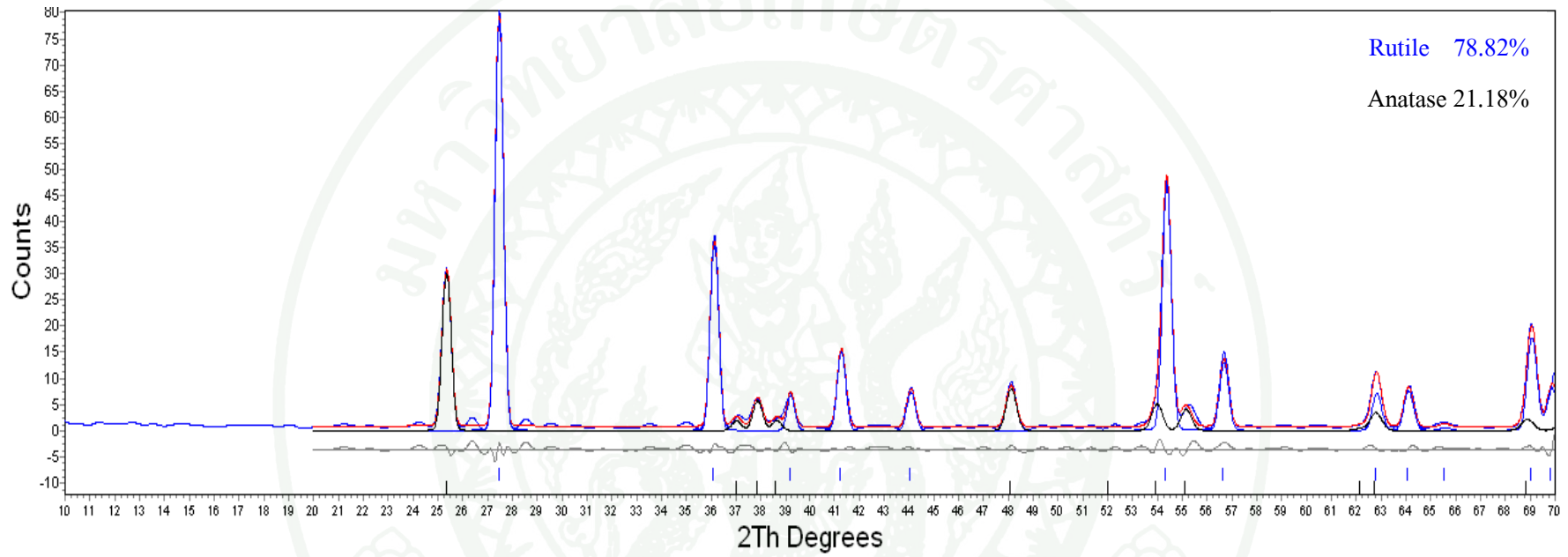
ภาพที่ 20 สเปกตรัมของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของอิมพอกซีเรซินและพอลิเอไมด์



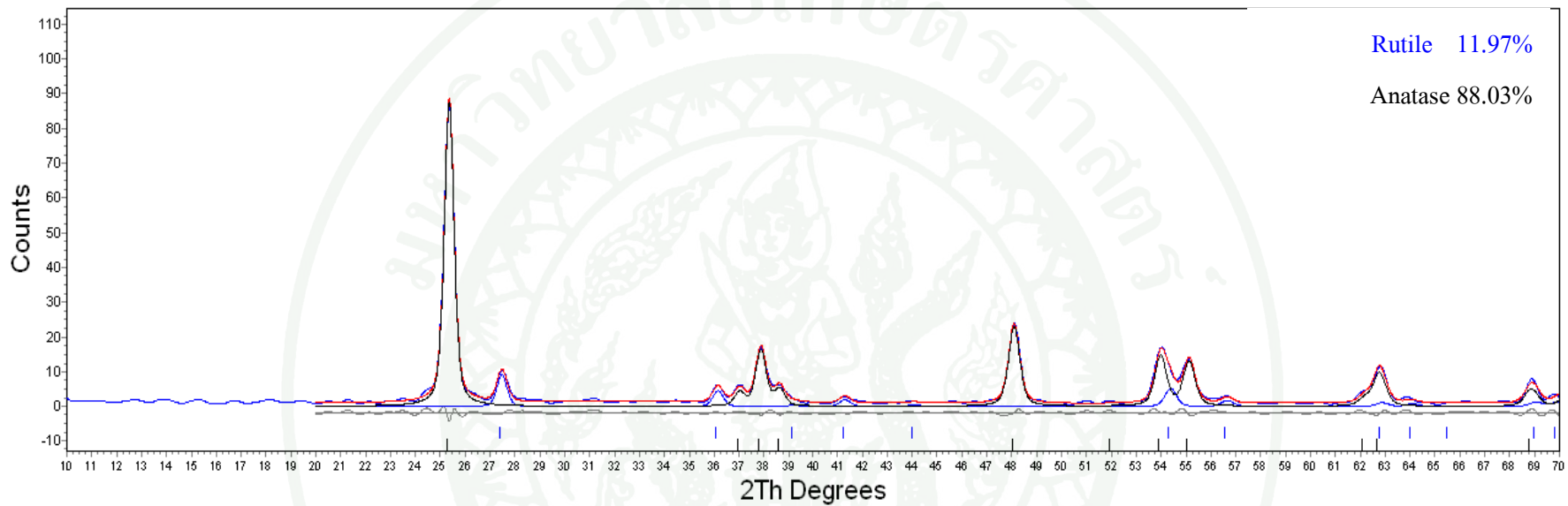
ภาพที่ 21 สเปกตรัมของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมัลชันซิลิกาขนาด 100 นาโนเมตร (ก) ร้อยละ 0.5 (ข) ร้อยละ 1 (ค) ร้อยละ 2 (ง) ร้อยละ 4



ภาพที่ 22 สเปกตรัมของอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมัลชันซิลิกาขนาด 150 นาโนเมตร (ก) ร้อยละ 0.5 (ข) ร้อยละ 1 (ค) ร้อยละ 2 (ง) ร้อยละ 4



ภาพที่ 23 ชนิดและรูปแบบโครงสร้างผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร



ภาพที่ 24 ชนิดและรูปแบบโครงสร้างผลึกของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร

1.4 สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจากบริษัท แอมคอล จำกัด ความหนา 60 ไมโครเมตร ชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว แต่มีพลังงานผิวที่ต่ำลงจากการปรับผิวในครั้งแรก เนื่องจากฟิล์มปรับสภาพผิวแล้วเป็นเวลานานจึงนำมาใช้ในการทดลอง (Treat 1)

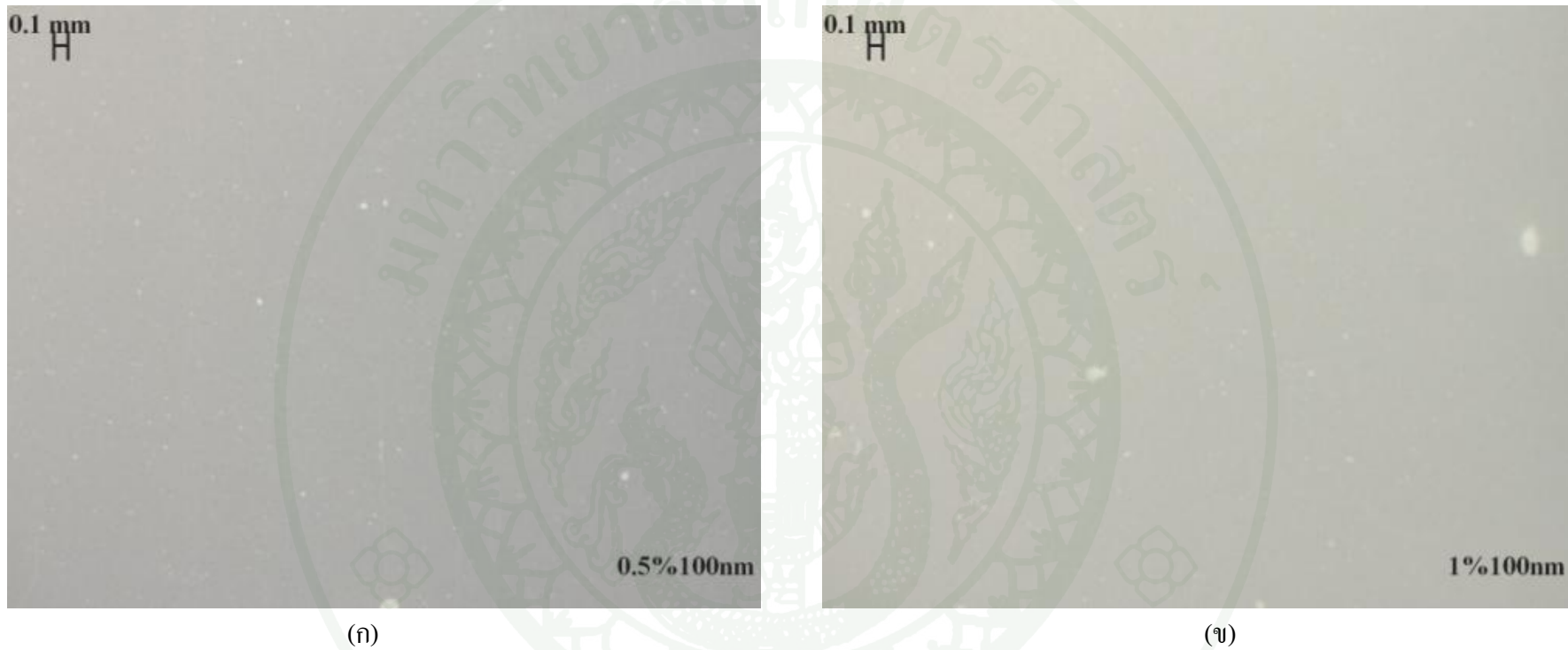
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจากบริษัท ฟิล์มมาสเตอร์ จำกัด ความหนา 52 ไมโครเมตร ชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว (Treat 2) และความหนา 62 ไมโครเมตรชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้า (Untreat)

2. ชั้นฟิล์มของสารเคลือบ

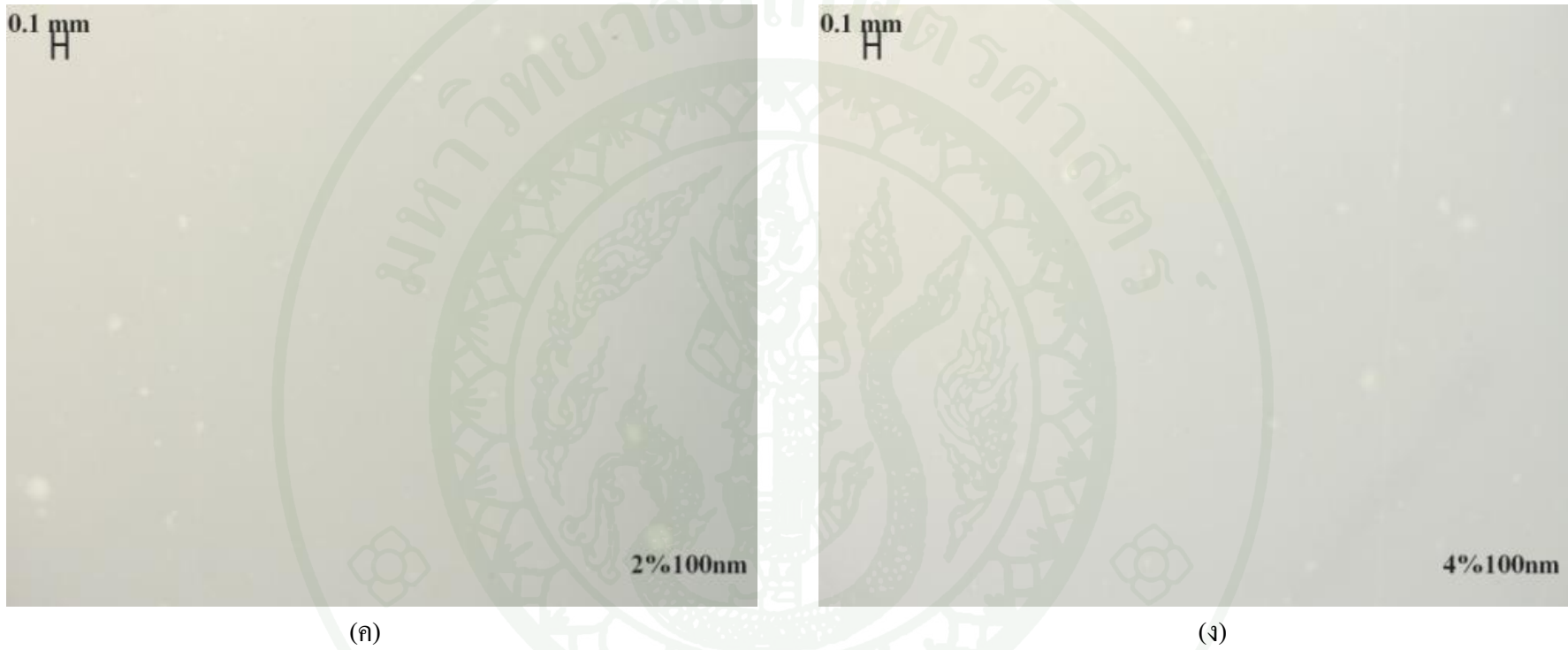
2.1 สมบัติทางกายภาพของชั้นฟิล์ม

2.1.1 ลักษณะชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิพอกซีเรซิน

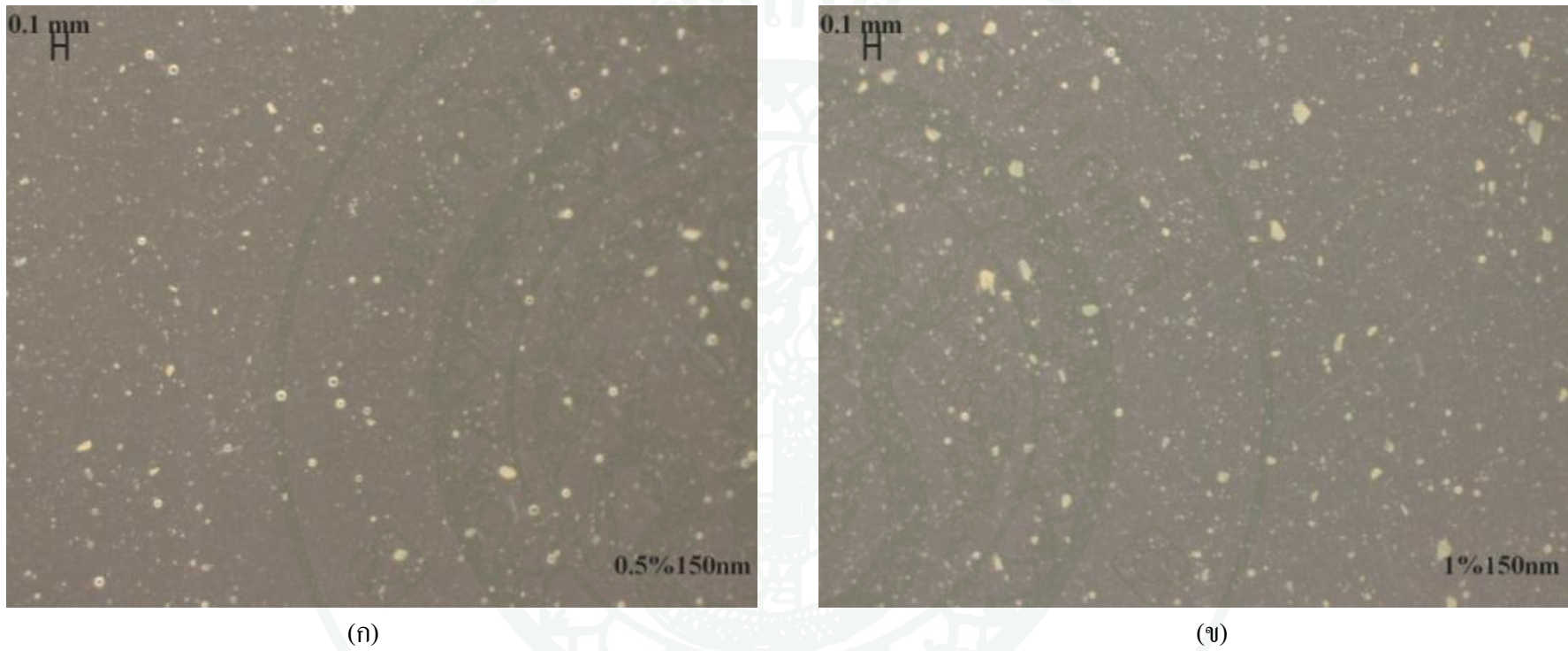
จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (stereo microscope) ดังภาพที่ 25 และภาพที่ 26 พบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าระดับนาโนเมตร สารเคลือบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร อนุภาคเกาะกลุ่มกันน้อยกว่าขนาด 150 นาโนเมตร เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร มีปริมาณโครงสร้างผลึกแบบอนาเทกมากกว่าแบบรูไทล์ ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบอนาเทกจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าแบบรูไทล์จึงทำให้สามารถเกาะกลุ่มกันได้ดีกว่า และการใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้อนุภาคเกาะกลุ่มกันมากขึ้นด้วย ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เห็นได้ว่าสารเคลือบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก จะพบอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายอยู่เป็นจำนวนมากและจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมากกว่าในสารเคลือบที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 2.0 ร้อยละ 1.0 และร้อยละ 0.5 ตามลำดับ



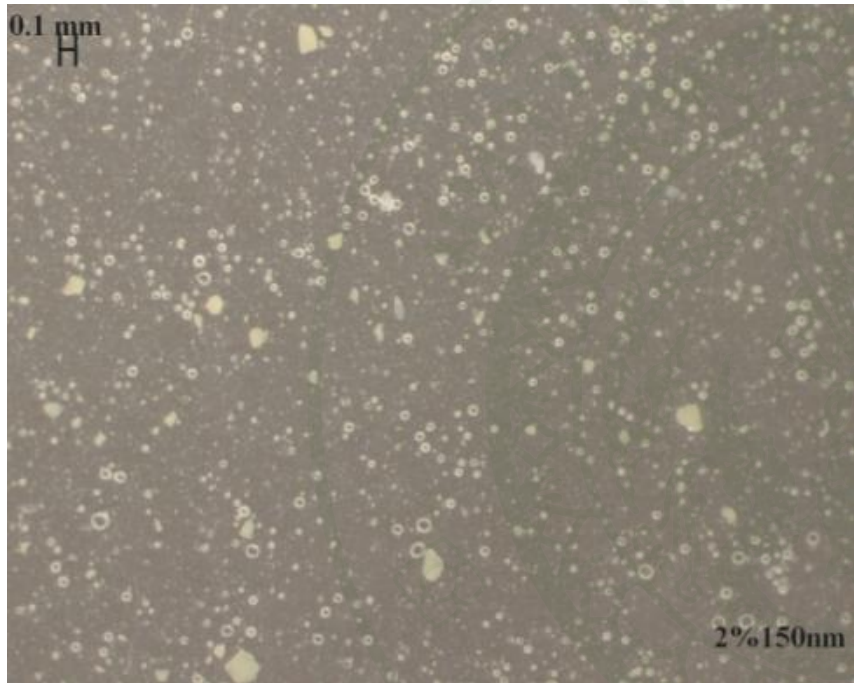
ภาพที่ 25 ชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิวและการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซิน (ก) 0.5% TiO₂ 100 นาโนเมตร (ข) 1% TiO₂ 100 นาโนเมตร (ค) 2% TiO₂ 100 นาโนเมตร (ง) 4% TiO₂ 100 นาโนเมตร



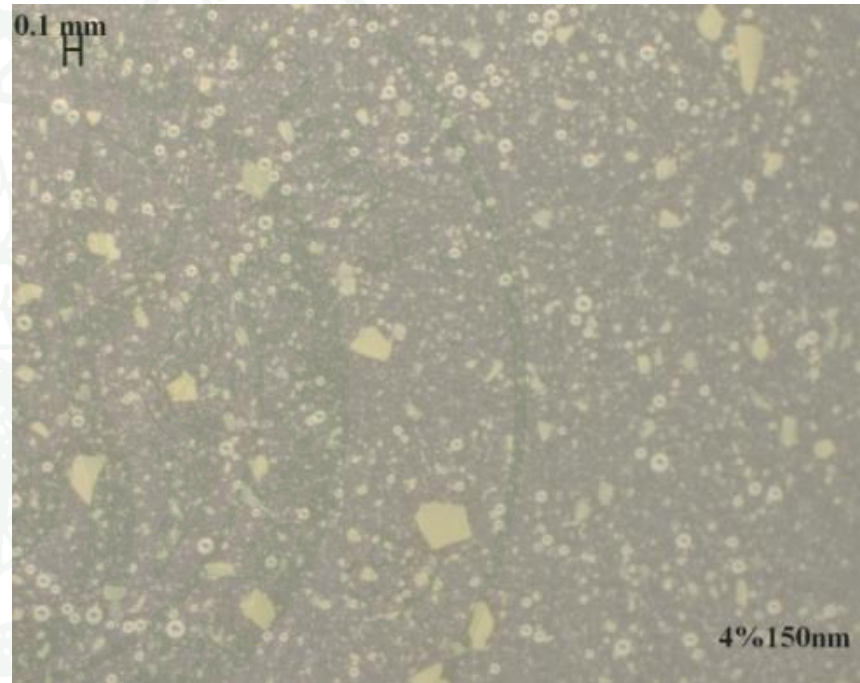
ภาพที่ 25 (ต่อ)



ภาพที่ 26 ชั้นฟิล์มของสารเคลือบผิวและการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซิน (ก) 0.5% TiO₂ 150 นาโนเมตร (ข) 1% TiO₂ 150 นาโนเมตร (ค) 2% TiO₂ 150 นาโนเมตร (ง) 4% TiO₂ 150 นาโนเมตร



(ค)



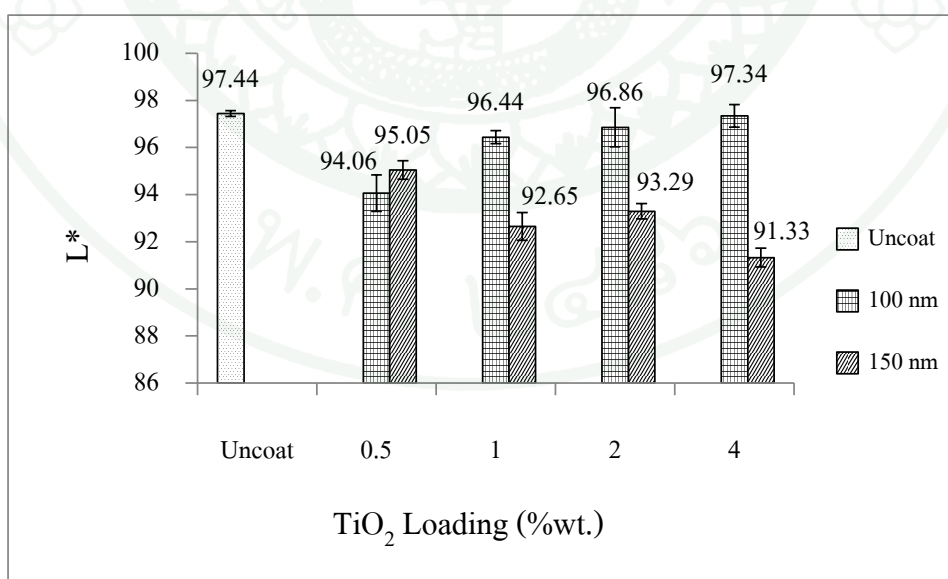
(ง)

ภาพที่ 26 (ต่อ)

2.1.2 สีของสารเคลือบ (CIE L*a*b*)

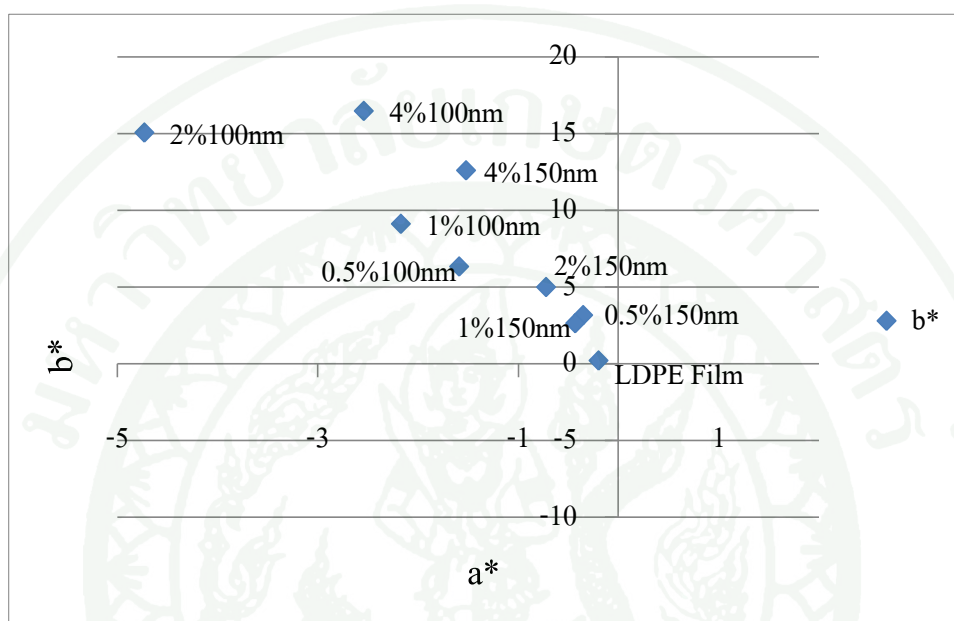
การวัดค่าสีด้วยระบบ Lab Color ค่า L* แสดงค่าความสว่าง ($L^* = 0$ หมายถึงสีดำ และ $L^* = 100$ หมายถึงสีขาว) ค่า a* แสดงตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสีแดง (Red) กับสีเขียว (Green) (ถ้าค่าเป็นลบแสดงว่ามีแนวโน้มเป็นสีเขียวมากกว่า ถ้าเป็นบวกแสดงว่ามีแนวโน้มเป็นสีแดงมากกว่า) และ ค่า b* แสดงตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสีเหลือง (Yellow) กับสีน้ำเงิน (Blue) (ถ้าค่าเป็นลบแสดงว่ามีแนวโน้มเป็นสีน้ำเงินมากกว่า ถ้าเป็นบวกแสดงว่ามีแนวโน้มเป็นสีเหลืองมากกว่า) ในทางการพิมพ์สีของสารเคลือบมีผลต่อคุณภาพงานพิมพ์เนื่องจากสามารถทำให้เกิดสีเพี้ยนได้

จากผลการวัดสีของฟิล์มทั้งหมด 9 ตัวอย่างบนกระดาษขาว พบว่าฟิล์มที่ไม่มีการเคลือบผิว (Uncoat) เป็นฟิล์มที่มีความใส ดังภาพที่ 27 และตารางภาคผนวก ข1 มีค่าความสว่างมากที่สุดเท่ากับ 97.44 ส่วนฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมพอกซีเรซินที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาค 100 นาโนเมตร มีค่าความสว่างเท่ากับ 97.34 มีลักษณะขาวขุ่น เนื่องจากสารเคลือบมีความขาวจากผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมพอกซีเรซินที่ความเข้มข้นร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร มีค่าความสว่างต่ำที่สุด สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ขนาด 100 นาโนเมตรมีแนวโน้มค่าความสว่างมากกว่าขนาด 150 นาโนเมตร



ภาพที่ 27 ค่าความสว่าง (L^*) ของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซินบนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ในขณะที่สีของตัวอย่างที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในอพอกซีเรซิน มีแนวโน้มค่าสีเป็นเหลืองอมเขียว ดังภาพที่ 28 และตารางภาคผนวก ข1 โดยที่สารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ขนาด 150 นาโนเมตรมีแนวโน้มที่จะเป็นสีเหลืองมากกว่าขนาด 100 นาโนเมตร



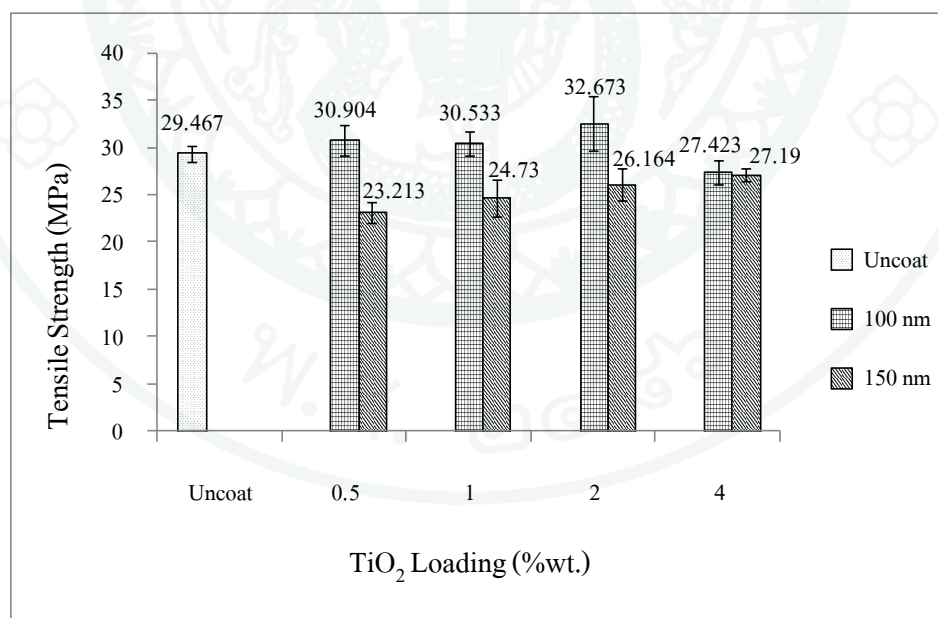
ภาพที่ 28 ค่าสี (a^*b^*) ของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอพอกซีเรซินบนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

2.1.3 ความต้านทานแรงดึงและมอดูลัสยัง

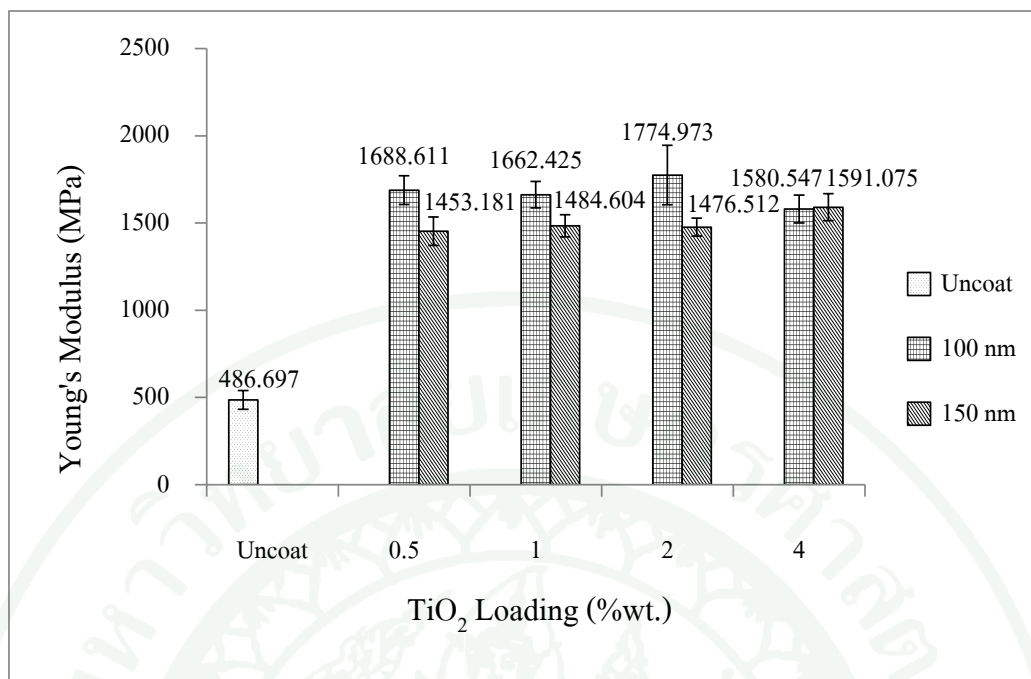
ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นฟิล์มที่มีความนุ่ม ยืดหยุ่นและเหนียว เมื่อวัดค่าความแข็งแรงในการทนต่อแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำพบว่ามีค่าเท่ากับ 29.467 เมกกะปาสคาล และเมื่อเคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในอพอกซีเรซินขนาด 100 นาโนเมตร ดังภาพที่ 29 และตารางภาคผนวก ค1 ปริมาณร้อยละ 0.5 ร้อยละ 1.0 และร้อยละ 2.0 มีค่าเท่ากับ 30.904, 30.533 และ 32.673 เมกกะปาสคาลตามลำดับ ค่าความแข็งแรงการดึงของฟิล์มที่วัดได้หลังเคลือบผิวมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อใส่ในปริมาณที่มากขึ้นเป็นร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก ความแข็งแรงมีค่าต่ำลง รวมถึงฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเมื่อเคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในอพอกซีเรซินขนาด 150 นาโนเมตร มีค่าความแข็งแรงลดลงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Turaiif *et al.* (2010) ศึกษา

ความสัมพันธ์ระหว่างผลของขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน 2 ขนาด คือ 17 นาโนเมตร และขนาด 50 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับขนาด 220 นาโนเมตร พบว่าอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าขนาดใหญ่

ส่วนค่ามอดูลัสยังเป็นค่าที่บอกระดับความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 30 และตารางภาคผนวก ค1 พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่ามอดูลัสยังเท่ากับ 486.697 เมกกะปาสคาล เมื่อเคลือบด้วยสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมพอกซีเรซิน ค่ามอดูลัสยังเพิ่มขึ้นสูงที่สุดเป็น 1774.973 เมกกะปาสคาล สำหรับสารเคลือบที่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ขนาด 100 นาโนเมตร ส่วนภาวะอื่นๆ มีค่ามอดูลัสยังสูงกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเช่นกัน ในการนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุภัณฑ์จึงต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและความสามารถในการยืดหยุ่นของฟิล์มด้วยเช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าสารเคลือบที่ทำให้ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีขึ้น ได้แก่ ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่เคลือบด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร ปริมาณร้อยละ 2.0 ร้อยละ 0.5 และร้อยละ 1.0 ตามลำดับ



ภาพที่ 29 ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนและหลังการเคลือบผิว



ภาพที่ 30 ค่ามอดูลัสยังของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนและหลังการเคลือบผิว

2.2 สมบัติทางเคมีของชั้นฟิล์ม

2.2.1 พลังงานผิวของฟิล์ม

จากการวัดค่าพลังงานผิวด้วยปากกาวัดค่าพลังงานผิว พบว่ามีเพียงตัวอย่างเดียวเท่านั้นที่ติดปากกา คือฟิล์มชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว ตัวอย่างที่ 2 (Treat 2) นั่นคือฟิล์มชนิดนี้จะมีค่าพลังงานผิวประมาณ 38-40 ดายนต์ต่อเซนติเมตร (dynes/cm) ส่วนฟิล์มอื่นๆไม่สามารถติดหมึกจากปากกาวัดพลังงานผิวได้ จึงต้องวัดค่าพลังงานผิวด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่น โพรพานอลและพอลิเอทิลีน ไกลคอล เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพลังงานผิวด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส เนื่องจากค่าพลังงานผิวของฟิล์มชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้วแต่ทิ้งไว้เป็นเวลานาน ตัวอย่างที่ 1 (Treat 1) และชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้า ไม่อยู่ในช่วงที่ปากกาวัดค่าพลังงานผิวจะวัดได้ ผลแสดงดังตารางที่ 4

ค่าพลังงานผิวเป็นค่าที่บอกความสามารถในการเปียกผิวของฟิล์ม มีผลต่อการพิมพ์ติดของหมึก นั่นคือหากพลังงานผิวของฟิล์มมีค่าต่ำ หมึกจะไม่สามารถเปียกผิวฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์และอาจทำให้พิมพ์ไม่ติด ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการปรับสภาพผิวฟิล์มให้มีพลังงานผิวสูงขึ้น

เพื่อให้หมึกพิมพ์ติดได้อย่างสมบูรณ์ โดยฟิล์มเมื่อทำการปรับสภาพผิวแล้วไม่ควรเก็บไว้เป็นระยะเวลา นานก่อนนำไปพิมพ์ เนื่องจากค่าพลังงานผิวจะลดลงตามระยะเวลาที่เก็บ และควรวัดค่าพลังงานผิวก่อนนำไปพิมพ์ เพื่อจะได้ไม่เกิดความเสียหายจากการคุณภาพงานพิมพ์ไม่ได้ตามต้องการจากฟิล์มที่มีพลังงานผิวดำกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 4 พลังงานผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว

ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	พลังงานผิว (dynes/cm)
ฟิล์มชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวน้ำ (Untreat)	21.15
ฟิล์มชนิดที่มีการปรับสภาพผิวน้ำเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว ตัวอย่างที่ 1 (Treat 1)	30.10
ฟิล์มชนิดที่มีการปรับสภาพผิวน้ำเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว ตัวอย่างที่ 2 (Treat 2)	38-40
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 0.5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	24.91
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 1% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	23.66
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 2% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	23.18
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 4% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	23.73
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 0.5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	23.69
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 1% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	22.84
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 2% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	23.18
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 4% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	23.90

จากตารางผลการวัดค่าพลังงานผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดต่างๆ พบว่าสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมพอกซีเรซินสามารถเพิ่มค่าพลังงานผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำให้สูงขึ้นได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมพอกซีเรซินช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับฟิล์ม เช่นเดียวกับการปรับสภาพผิวด้วยวิธีอื่นๆ ถึงแม้ว่าสามารถเพิ่มพลังงานผิวฟิล์มให้สูงขึ้นได้ แต่ยังคงมีค่าพลังงานผิวดำกว่าฟิล์มที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว ซึ่งโดยปกติแล้วค่าพลังงานผิวที่มีความเหมาะสมต่อการพิมพ์ด้วยระบบเฟล็กโซกราฟีด้วยหมึกพิมพ์ฐานแอลกอฮอล์อยู่ที่ประมาณ 36-40 ดายนต์ต่อเซนติเมตร

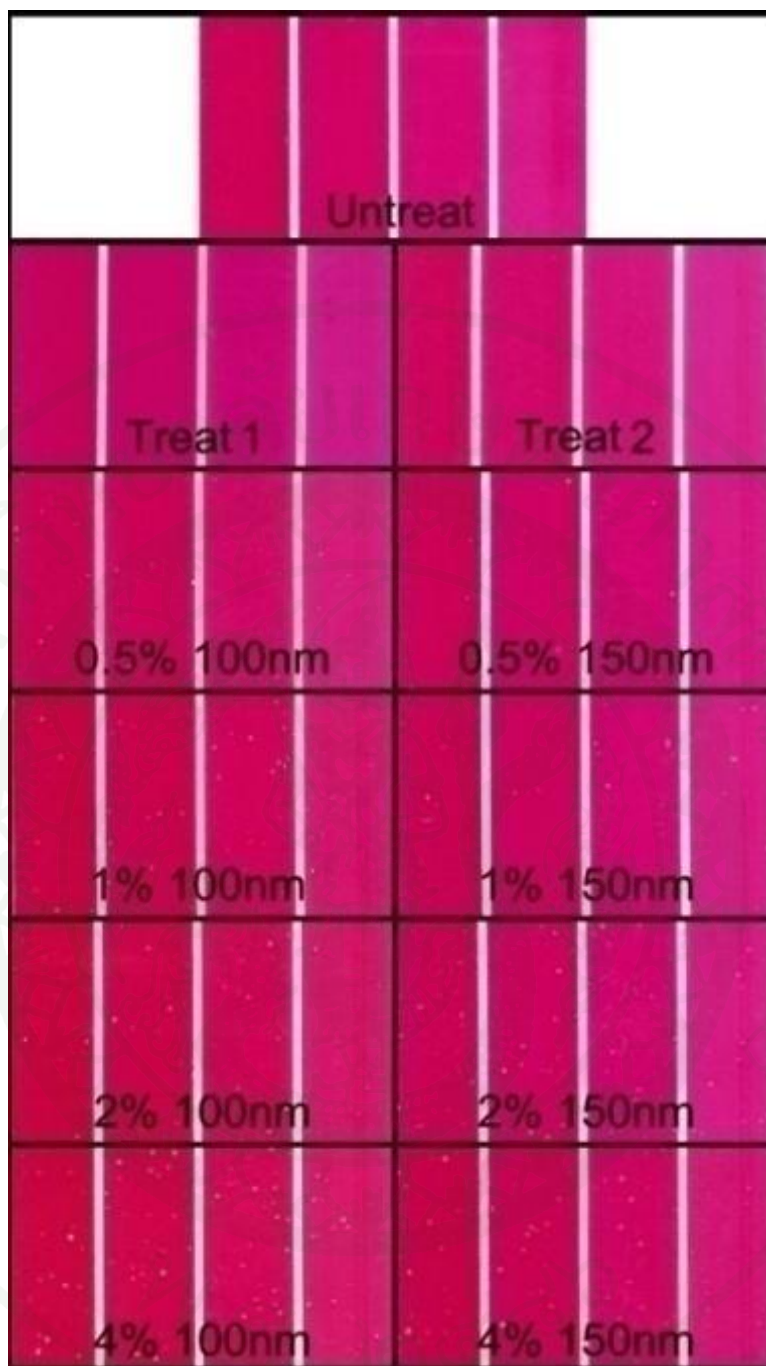
3. คุณภาพงานพิมพ์

3.1 ลักษณะทางกายภาพของงานพิมพ์

เมื่อทดลองพิมพ์ตัวอย่างฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำทั้ง 11 ภาวะด้วยเครื่องจำลองการพิมพ์ไอจีที สำหรับระบบเฟล็กโซกราฟีด้วยหมึกทั้ง 4 สีคือ Cyan Magenta Yellow และ Black พบว่าฟิล์มที่ไม่มีการเคลือบผิวทั้ง 3 ตัวอย่าง คือ ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้วแต่ทิ้งไว้เป็นเวลานานาน (Treat 1) จึงทำให้มีค่าพลังงานผิวที่ต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็น ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว (Treat 2) และฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้า สามารถพิมพ์ติดได้ มีความสม่ำเสมอของหมึกพิมพ์เมื่อมองด้วยตาเปล่า ในขณะที่ตัวอย่างที่มีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 8 ภาวะ มีความสม่ำเสมอของหมึกพิมพ์ต่ำ ดังภาพที่ 31-34 เนื่องจากมีบริเวณที่หมึกพิมพ์ไม่ติดจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเกาะตัวเป็นก้อนและพื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระ ไม่เรียบสม่ำเสมอ เห็นได้ชัดเมื่อปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่เข้าไปนั้นมีผลต่อการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคและกลุ่มก้อนของอนุภาคบางส่วนนั้นกระจายตัวอยู่บริเวณที่ผิวหน้าของสารเคลือบ จึงเป็นสาเหตุให้พิมพ์ไม่ติด ดังนั้นหากมีการปรับปรุงสารเคลือบให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น งานพิมพ์ที่ได้ก็จะมีความสม่ำเสมอของหมึกพิมพ์ตามไปด้วย



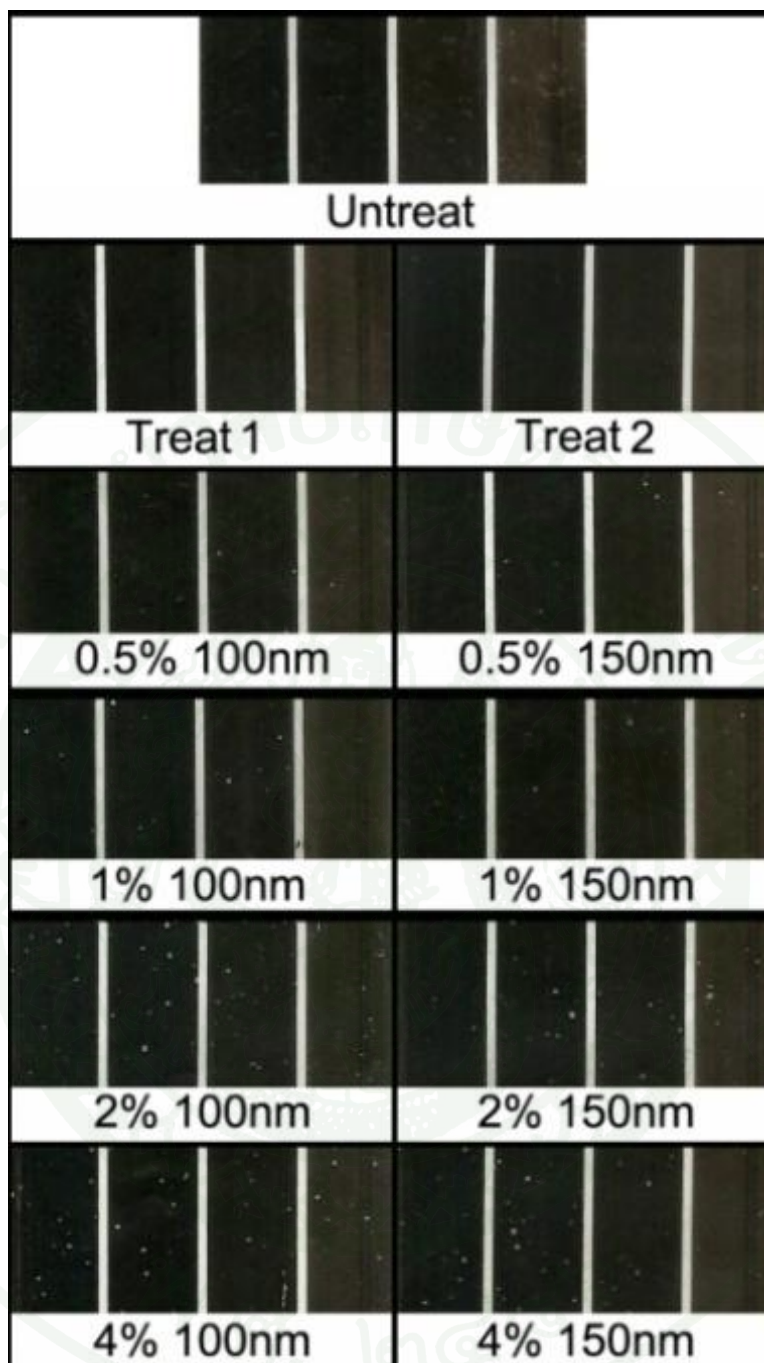
ภาพที่ 31 ลักษณะของสี Cyan บนงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 32 ลักษณะของสี Magenta บนงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ

Untreat	
Treat 1	Treat 2
0.5% 100nm	0.5% 150nm
1% 100nm	1% 150nm
2% 100nm	2% 150nm
4% 100nm	4% 150nm

ภาพที่ 33 ลักษณะของสี Yellow บนงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 34 ลักษณะของสี Black บนงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ

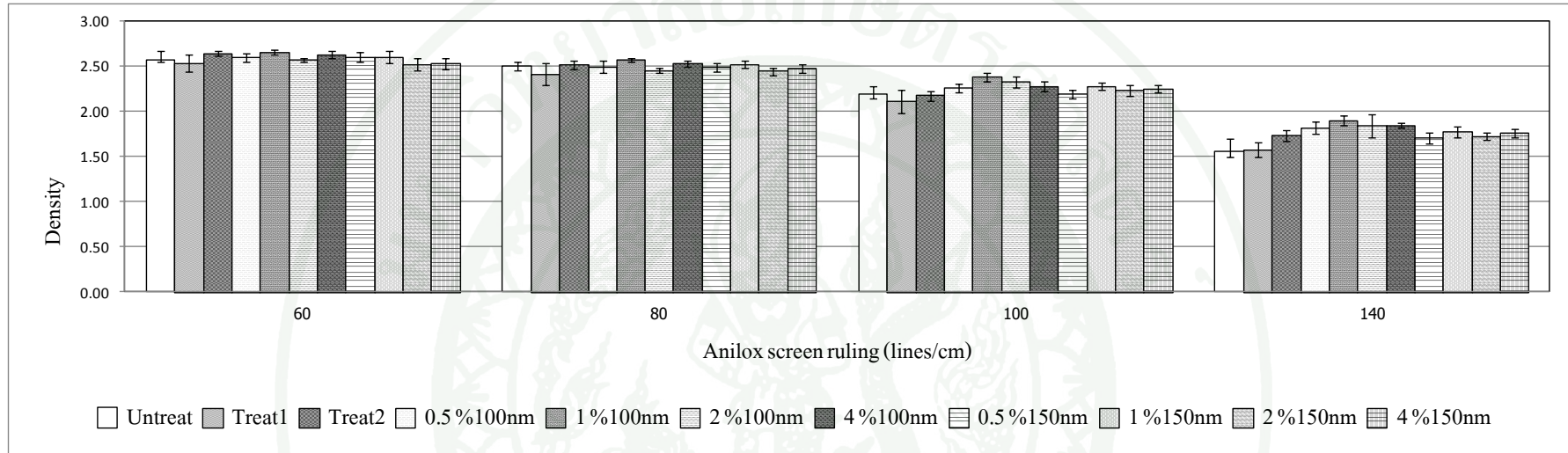
3.2 การทดสอบคุณภาพงานพิมพ์

3.2.1 ความเข้มสีของหมึกพิมพ์

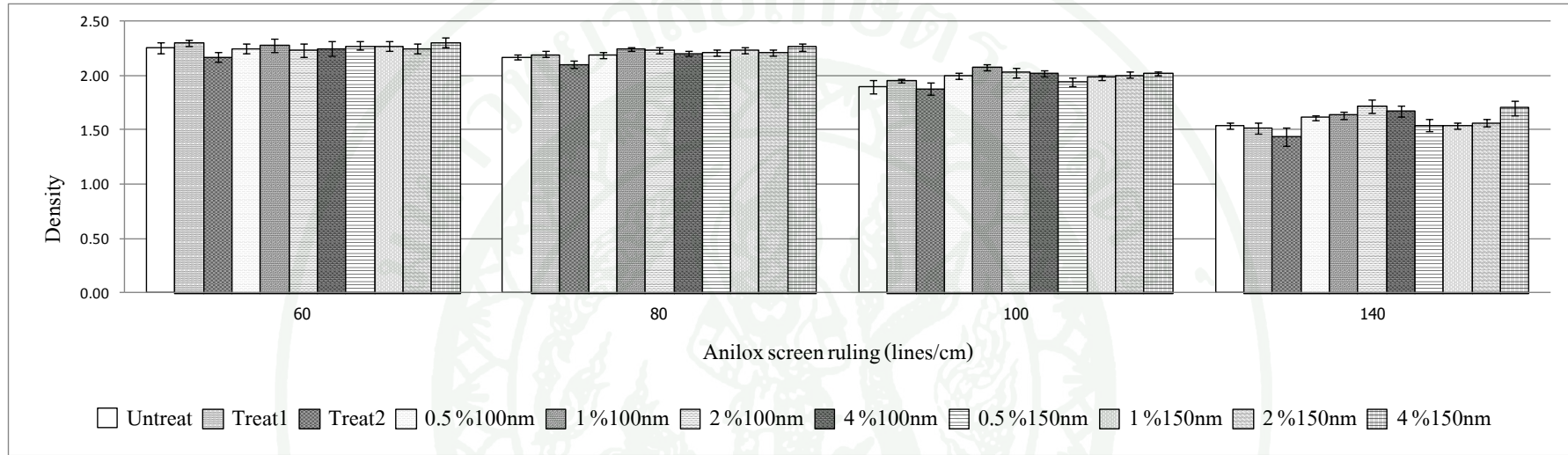
จากการพิมพ์ตัวอย่างฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำทั้ง 11 ภาวะด้วยเครื่องจำลองการพิมพ์ไอจีที สำหรับระบบเฟล็กโซกราฟีด้วยหมึกทั้ง 4 สีคือ Cyan Magenta Yellow และ Black ทดสอบโดยใช้ลูกกลิ้งแอนิสโตกซ์ที่มีความละเอียดของปริมาณหลุมหมึกแตกต่างกัน 4 ระดับคือ 60, 80, 100 และ 140 เส้นต่อเซนติเมตร (lines/cm) ที่ระดับ 60 เส้นต่อเซนติเมตร เป็นระดับที่มีปริมาณหลุมหมึกน้อยที่สุด แต่ขนาดใหญ่ที่สุด จึงทำให้สามารถรับหมึกและโอนถ่ายไปยังวัสดุที่ใช้พิมพ์ได้มากที่สุด

ผลการทดสอบความเข้มสีของหมึกพิมพ์ทั้ง 4 สี คือ Cyan Magenta Yellow และ Black มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันนั่นคือ ที่ระดับ 60 เส้นต่อเซนติเมตร มีค่าความเข้มสีมากกว่าระดับ 80, 100 และ 140 เส้นต่อเซนติเมตรตามลำดับ ดังภาพที่ 35-38 และตารางภาคผนวก 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งค่าความเข้มสีในแต่ละสีพบว่าทั้งตัวอย่าง 11 ตัวอย่าง วัดค่าได้ใกล้เคียงกันแต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสีเหลือง (Yellow) เป็นสีที่มีความสว่างมากที่สุด จึงทำให้ค่าความเข้มสีที่วัดได้มีค่าต่ำที่สุด

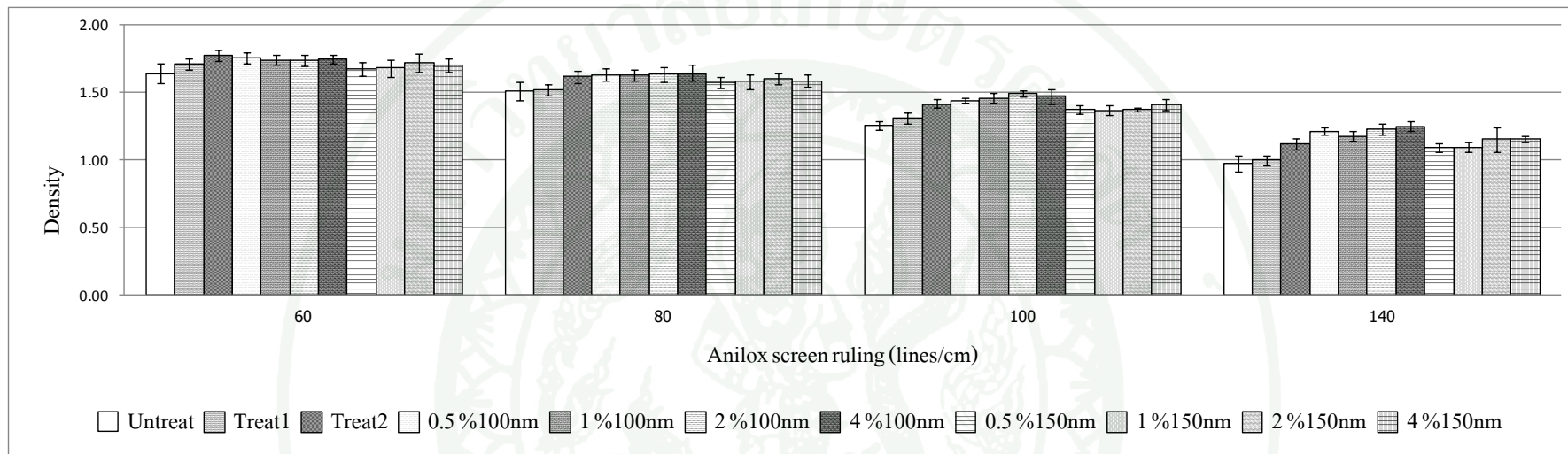
วิธีการปรับปรุงผิวหน้าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำโดยใช้สารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอีพอกซีเรซิน ยังคงสามารถทำให้หมึกพิมพ์ยึดติดบนผิวของวัสดุที่ใช้พิมพ์ได้ดี เนื่องจากผลของความเข้มสีที่วัดได้มีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกัน ความเข้มสีที่วัดจากงานพิมพ์ที่ระดับ 60 เส้นต่อเซนติเมตร มีค่าความเข้มสีมากกว่าระดับ 80, 100 และ 140 เส้นต่อเซนติเมตรตามลำดับ



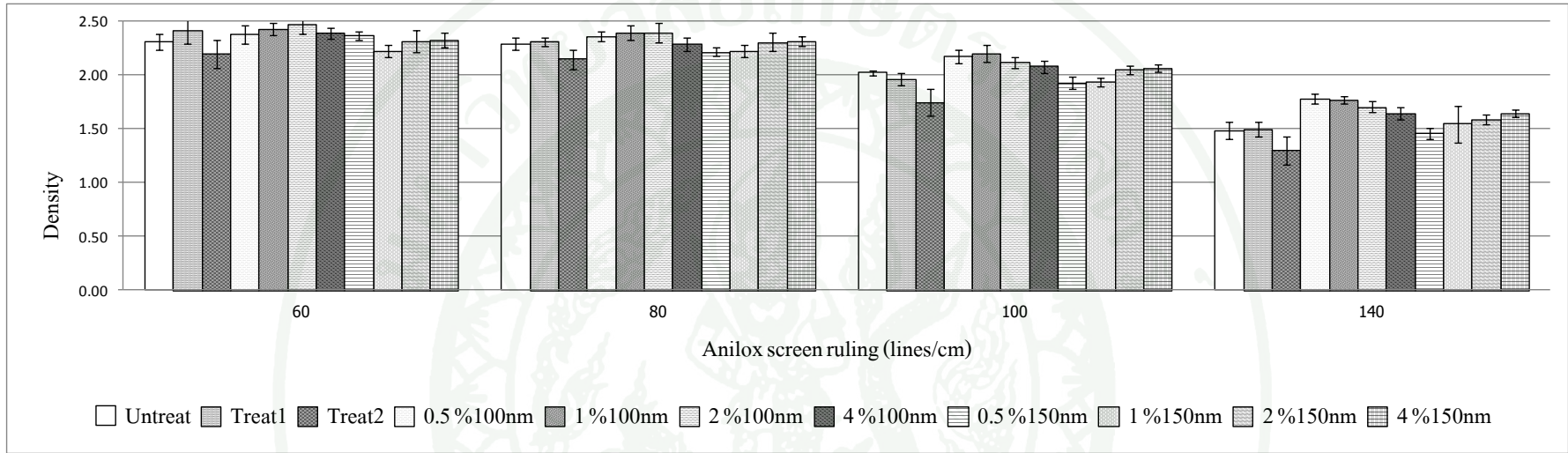
ภาพที่ 35 ความเข้มสี Cyan ของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 36 ความเข้มสี Magenta ของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



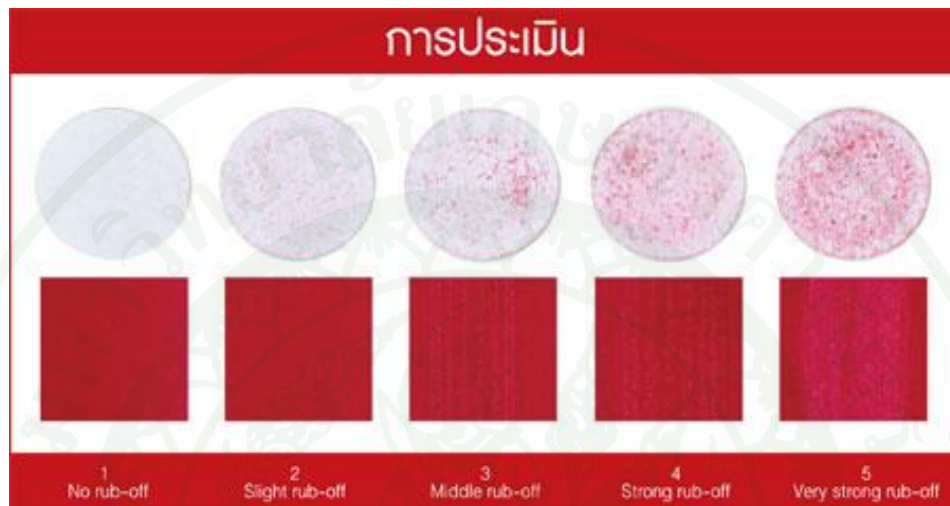
ภาพที่ 37 ความเข้มสี Yellow ของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 38 ความเข้มสี Black ของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ

3.2.2 การทนต่อการขีดถู

การทดสอบการทนต่อการขีดถูนิยมใช้ในการทดสอบงานพิมพ์บนบรรจุภัณฑ์ ซึ่งการประเมินผลการทดสอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ระดับ (พีวีซี, 2552) ดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 การประเมินผลการทดสอบการทนต่อการขีดถู

- หมายเหตุ ระดับที่ 1 ไม่เกิดการลอก (No rub-off)
 ระดับที่ 2 เกิดการลอกเล็กน้อย (Slight rub-off)
 ระดับที่ 3 เกิดการลอกปานกลาง (Middle rub-off)
 ระดับที่ 4 เกิดการลอกมาก (Strong rub-off)
 ระดับที่ 5 เกิดการลอกรุนแรง (Very strong rub-off)

ที่มา: พีวีซี (2552)

จากการทดสอบการทนต่อการขีดถูของตัวอย่างฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำทั้ง 11 ภาวะด้วยเครื่องจำลองการพิมพ์ไอจีที สำหรับระบบเฟล็กโซกราฟีด้วยหมึกทั้ง 4 สีคือ Cyan Magenta Yellow และ Black แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้าและมีพลังงานผิวต่ำ (Untreat) เกิดการหลุดลอกของหมึกพิมพ์มากที่สุด การหลุดลอกอยู่ที่ระดับ 3 เนื่องจากมีพลังงานผิวที่ต่ำ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการติดผิวฟิล์มของหมึกต่ำ ส่วนฟิล์มที่มีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 8 ตัวอย่าง มีการหลุด

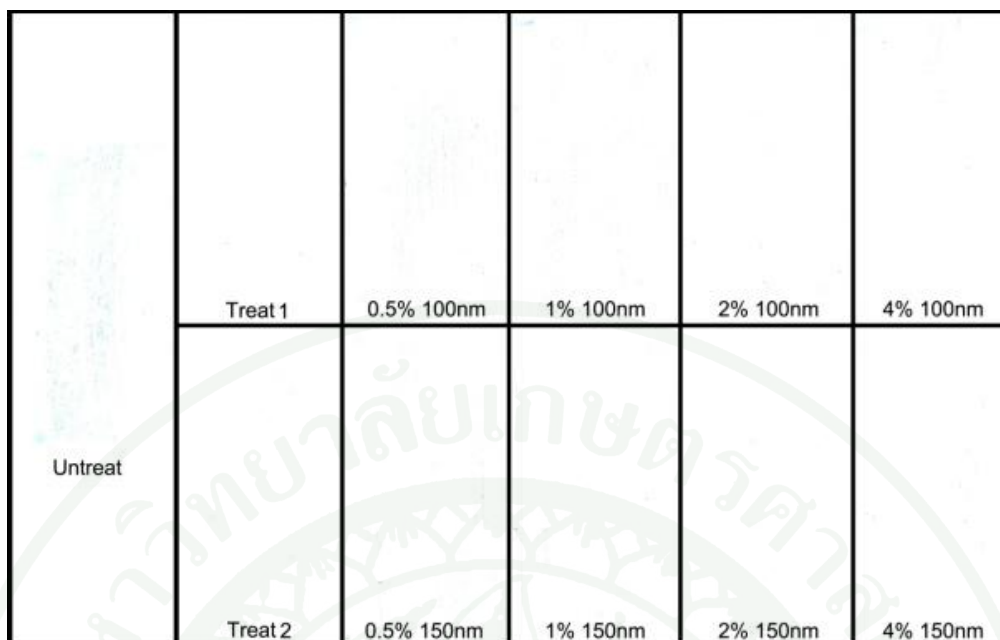
ลอกอยู่ที่ระดับ 2 และฟิล์มที่มีการปรับสภาพผิวหน้าแล้วทั้ง 2 ตัวอย่าง (Treat 1 และ Treat 2) มีการหลุดลอกอยู่ที่ระดับ 1 ดังภาพที่ 40-43 พลังงานผิวของฟิล์มมีผลต่อการหลุดลอกของหมึกพิมพ์ เนื่องจากฟิล์มที่มีพลังงานผิวสูงหมึกพิมพ์จะสามารถเปียกผิวได้ดีกว่าและเกิดการหลุดลอกจากการขัดถูน้อยกว่าฟิล์มที่มีพลังงานผิวดำ ซึ่งสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มพลังงานผิวให้กับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้ทนต่อการขัดถูได้ดีกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ยังไม่ได้มีการปรับสภาพผิวหน้า

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการทนต่อการขัดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ

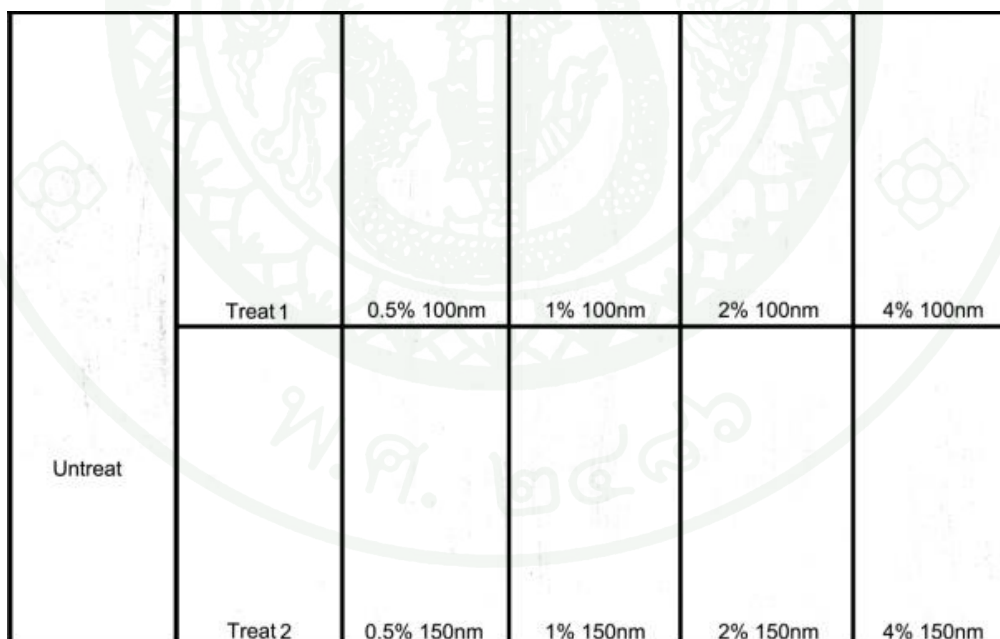
ชนิดฟิล์ม	สี	ระดับที่
ฟิล์มชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้า (Untreat)	Cyan	3
	Magenta	3
	Yellow	3
	Black	3
ฟิล์มชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว ตัวอย่างที่ 1 (Treat 1)	Cyan	1
	Magenta	1
	Yellow	1
	Black	1
ฟิล์มชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว ตัวอย่างที่ 2 (Treat 2)	Cyan	1
	Magenta	1
	Yellow	1
	Black	1
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 0.5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	Cyan	2
	Magenta	2
	Yellow	2
	Black	2
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 1% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	Cyan	2
	Magenta	2
	Yellow	2
	Black	2

ตารางที่ 5 (ต่อ)

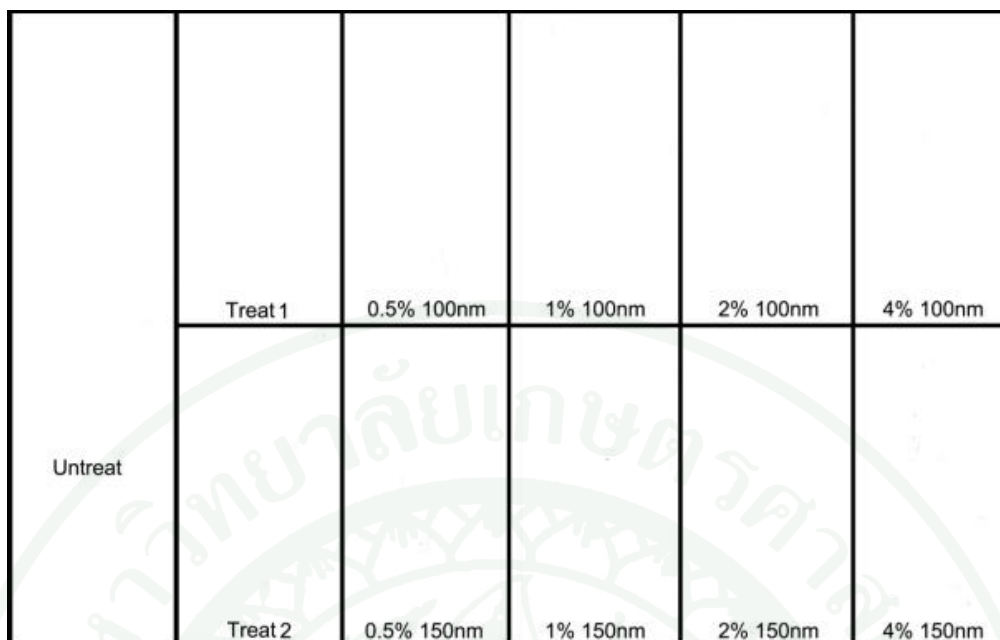
ชนิดฟิล์ม	สี	ระดับที่
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 2% โทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	Cyan	2
	Magenta	2
	Yellow	2
	Black	2
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 4% โทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	Cyan	2
	Magenta	2
	Yellow	2
	Black	2
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 0.5% โทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 nm	Cyan	2
	Magenta	2
	Yellow	2
	Black	2
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 1% โทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	Cyan	2
	Magenta	2
	Yellow	2
	Black	2
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 2% โทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	Cyan	2
	Magenta	2
	Yellow	2
	Black	2
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 4% โทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	Cyan	2
	Magenta	2
	Yellow	2
	Black	2



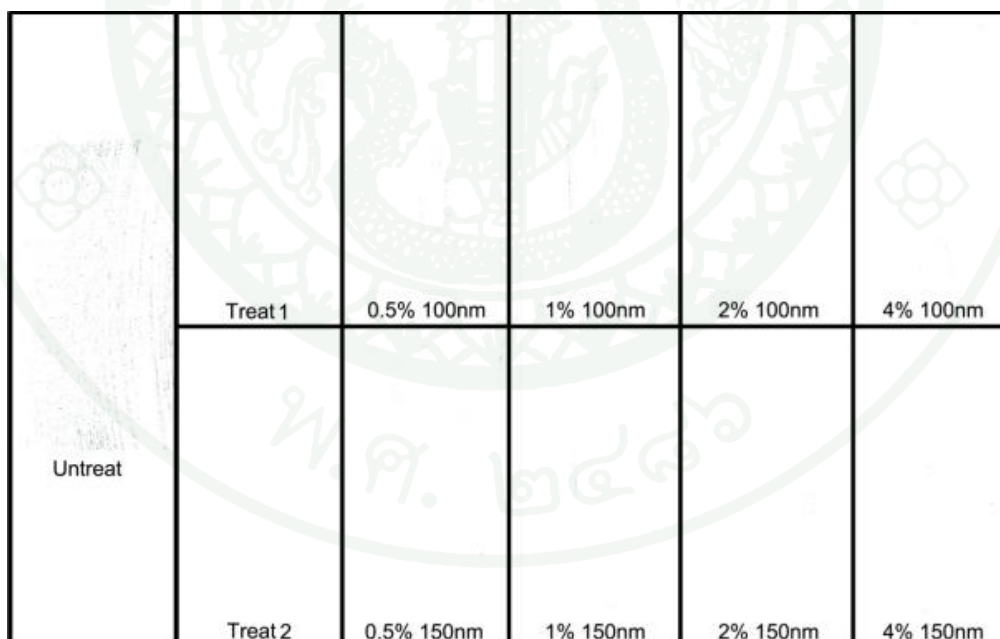
ภาพที่ 40 ลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์สี Cyan ที่ผ่านการขัดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 41 ลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์สี Magenta ที่ผ่านการขัดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 42 ลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์สี Yellow ที่ผ่านการขัดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 43 ลักษณะการหลุดลอกของหมึกพิมพ์สี Black ที่ผ่านการขัดถูของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ







3.2.3 การยึดติดของหมึกพิมพ์

การทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์ใช้ในการประเมินคุณภาพการยึดติดของหมึกพิมพ์บนวัสดุ โดยทำ cross-cut บนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบแล้วใช้องศาในการดึงเทปกาวเท่ากับ 180 องศา ซึ่งการประเมินผลการทดสอบอ้างอิงตาม ASTM D3359-09 และจำแนกผลการทดสอบการยึดติดออกเป็น 6 ระดับ ดังตารางที่ 6

ผลทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำทั้ง 11 ภาวะด้วยการพิมพ์ด้วยระบบเพล็ทโซกราฟี่ทั้ง 4 สี คือ Cyan Magenta Yellow และ Black พบว่าผลการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์บนเทปกาวดังภาพที่ 44-47

ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้วตัวอย่างที่ 2 (Treat 2) ซึ่งมีค่าพลังงานผิวสูงที่สุด 38-40 ดายน์ต่อเซนติเมตร มีการหลุดของหมึกติดอยู่บนเทปกาวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อยู่ในระดับ 4B ส่วนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้วตัวอย่างที่ 1 (Treat 1) และฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดไม่มีการปรับผิว (Untreat) มีการหลุดของหมึกติดอยู่บนเทปกาวเกือบร้อยละ 100 อยู่ในระดับ 0B เนื่องจากมีพลังงานผิวดำ ในขณะที่ฟิล์มที่มีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอพอกซีเรซินทั้ง 8 ตัวอย่าง มีการหลุดของหมึกติดอยู่บนเทปกาวเพียงเล็กน้อย อยู่ในระดับ 4B เช่นเดียวกับฟิล์มที่มีพลังงานผิวสูง แต่ความเป็นจริงแล้วเป็นฟิล์มที่มีพลังงานผิวดำ ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในสารเคลือบทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิวให้กับฟิล์มและพื้นผิวที่ไม่เรียบเนื่องจากการเกาะตัวกันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อีกทั้งเนื่องมาจากอพอกซีเรซินมีสมบัติเป็นตัวเชื่อมการยึดติดหรือกาว สามารถยึดติดกับสารช่วยในการยึดติดในหมึกพิมพ์ ทำให้หมึกพิมพ์สามารถเกาะติดอยู่บนฟิล์มเคลือบผิวด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในอพอกซีเรซินได้ดีกว่าฟิล์มที่มีพลังงานผิวดำโดยทั่วไปซึ่งมีพื้นผิวเรียบ

ตารางที่ 6 การจำแนกผลการทดสอบการขีดขีด

ระดับการขีด ขีด	ร้อยละของพื้นที่ผิวที่หลุดออก หลังการทดสอบ	ลักษณะพื้นผิวหลังการทดสอบ
5B	0	
4B	น้อยกว่าร้อยละ 5	
3B	ร้อยละ 5 - 15	
2B	ร้อยละ 15 - 35	
1B	ร้อยละ 35 - 65	
0B	มากกว่าร้อยละ 65	

หมายเหตุ ระดับ 5B หมายถึง ขอบของการตัดจะเรียบสมบูรณ์ ไม่มีช่องใดถูกถอนหลุดออก

ระดับ 4B หมายถึง เกิดการหลุดเล็กน้อยของสารเคลือบผิวหรือหมึกที่จุดตัดน้อยกว่า ร้อยละ 5 ของพื้นที่ในช่องตาข่าย

ระดับ 3B หมายถึง เกิดการหลุดของสารเคลือบผิวหรือหมึกตามขอบที่จุดตัดร้อยละ 5 ถึง 15 ของช่องตาข่าย

ระดับ 2B หมายถึง มีการถูกถอนออกตามขอบและบางส่วนของช่องสี่เหลี่ยม พื้นที่ ร้อยละ 15 ถึง 35 ของช่องตาข่าย

ระดับ 1B หมายถึง มีการถูกถอนออกตามขอบ และบริเวณเต็มช่องสี่เหลี่ยม พื้นที่ ร้อยละ 35 ถึง 65 ของช่องตาข่าย

ระดับ 0B หมายถึง มีการถูกถอนออกมากกว่าระดับ 1B พื้นที่มากกว่าร้อยละ 65

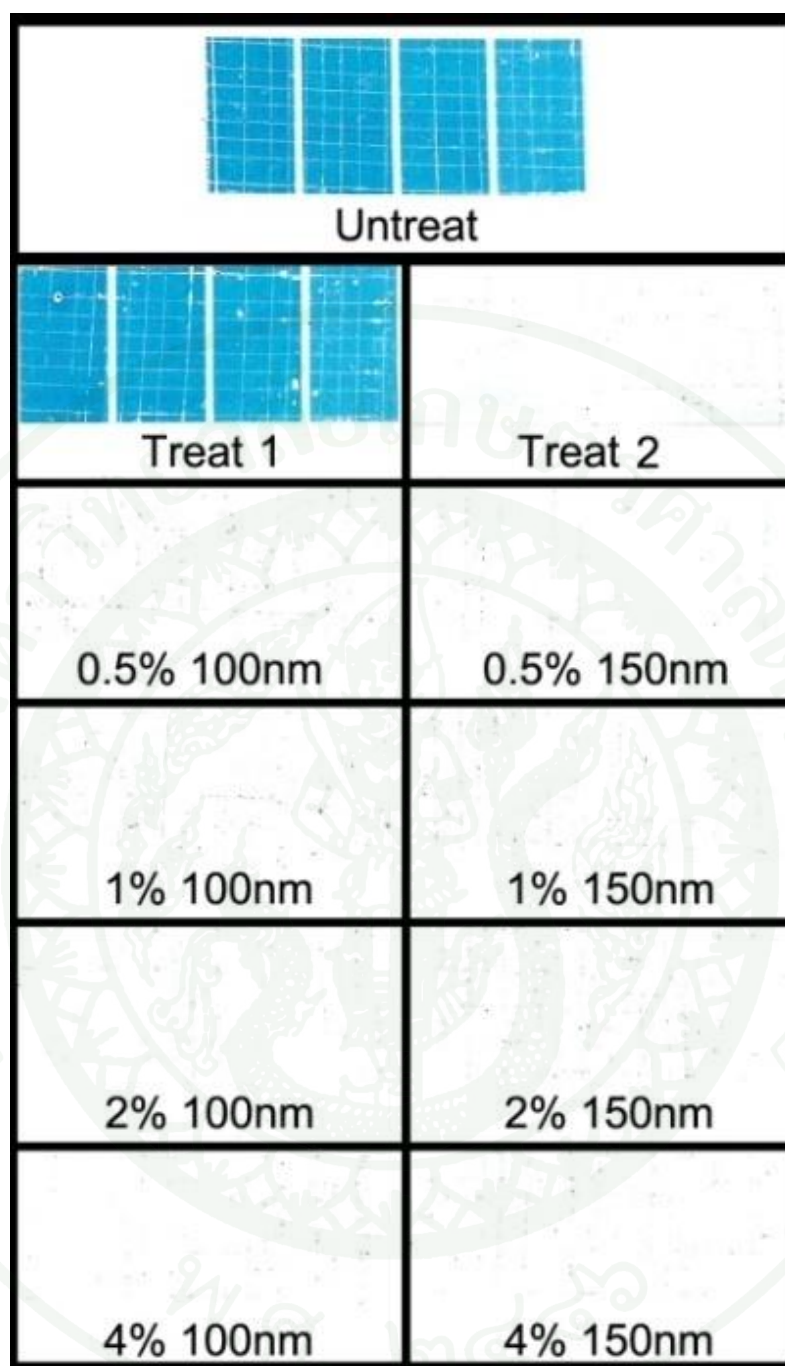
ที่มา: ASTM D3359-09

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์บนฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ

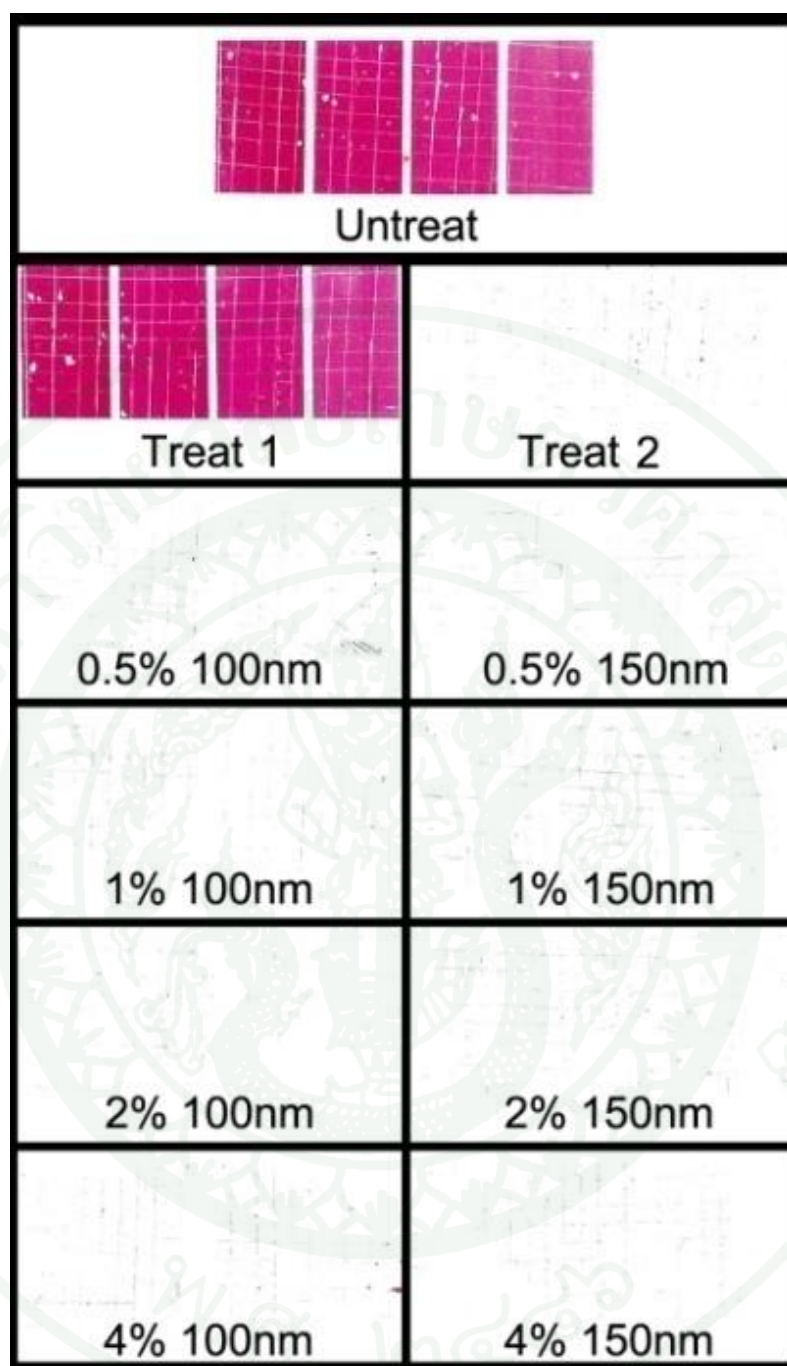
ชนิดฟิล์ม	สี	ระดับที่
ฟิล์มชนิดที่ไม่มีการปรับสภาพผิวหน้า (Untreat)	Cyan	0B
	Magenta	0B
	Yellow	0B
	Black	0B
ฟิล์มชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว ตัวอย่างที่ 1 (Treat 1)	Cyan	0B
	Magenta	0B
	Yellow	0B
	Black	0B
ฟิล์มชนิดที่มีการปรับสภาพผิวหน้าเพื่อเตรียมพิมพ์แล้ว ตัวอย่างที่ 2 (Treat 2)	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 0.5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 1% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 2% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B

ตารางที่ 7 (ต่อ)

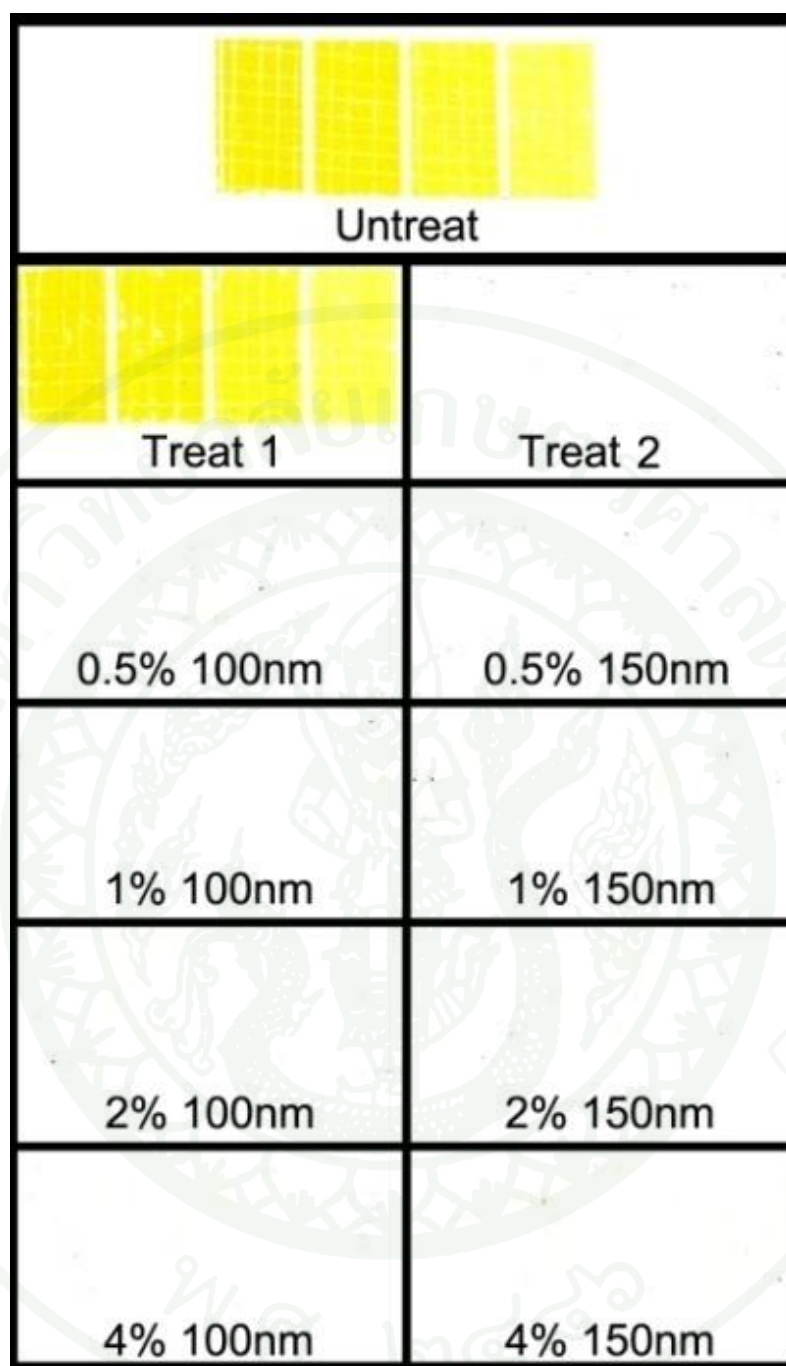
ชนิดฟิล์ม	สี	ระดับที่
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 4% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตร	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 0.5% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 nm	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 1% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 2% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B
ฟิล์มเคลือบผิวด้วย 4% ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 150 นาโนเมตร	Cyan	4B
	Magenta	4B
	Yellow	4B
	Black	4B



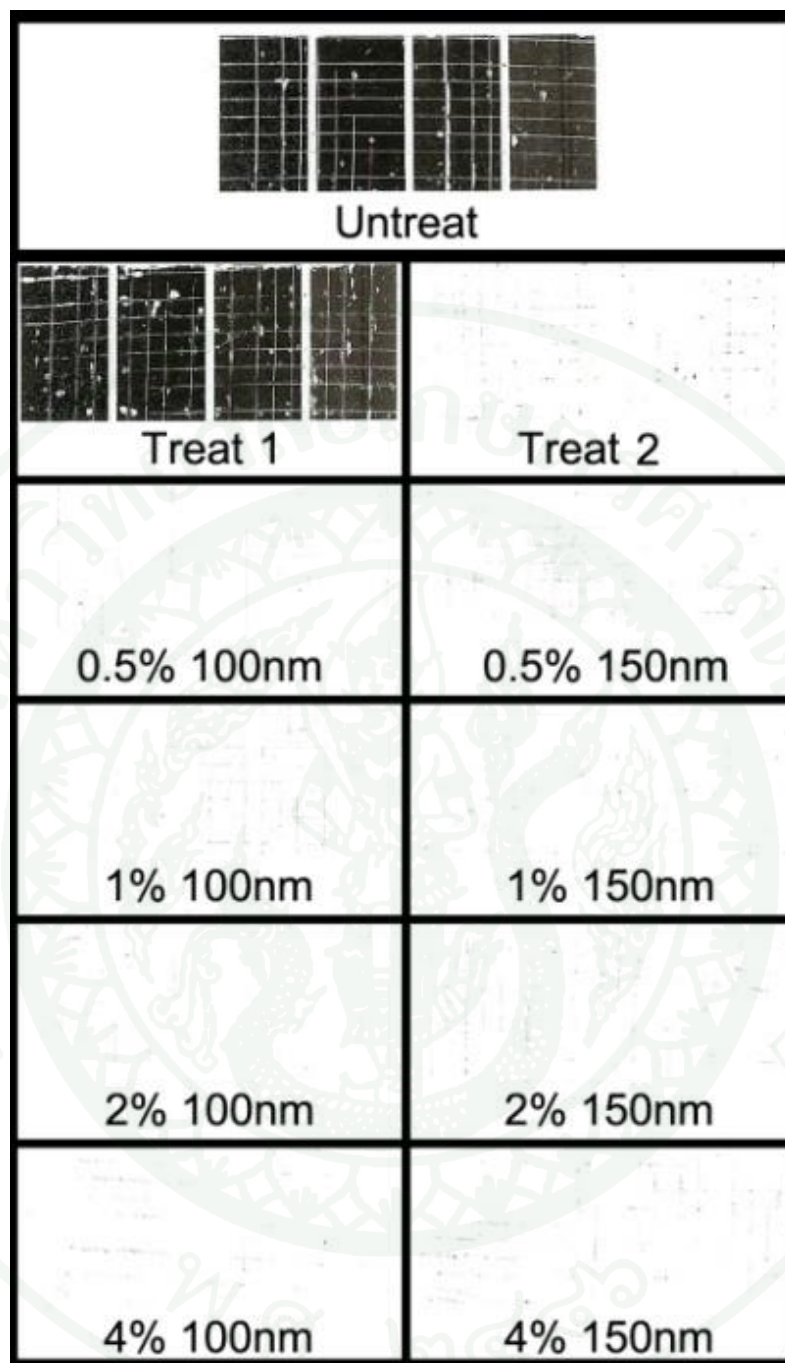
ภาพที่ 44 ผลของการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์สี Cyan บนเทปกาวของฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 45 ผลของการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์สี Magenta บนเทปขาวของฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 46 ผลของการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์สี Yellow บนเทปขาวของฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ



ภาพที่ 47 ผลของการทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์สี Black บนเทปกาวของฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำที่ภาวะต่างๆ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนและหลังการเคลือบผิวด้วยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซิน รวมถึงพิจารณาคุณภาพงานพิมพ์ พบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเลือกสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซิน เพื่อปรับสภาพฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ คือสารเคลือบที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนร้อยละ 0.5 ขนาด 100 นาโนเมตร เพื่อใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของวิธีการปรับผิวหน้าพลาสติกเพื่อเตรียมพิมพ์ ทั้งนี้สามารถสรุปประเด็นสำคัญจากผลการทดลองได้ดังนี้

1. ความหนืดของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซินมีค่าสูงขึ้นแปรผันตามปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใส่เข้าไป ที่ขนาด 100 นาโนเมตร ค่าความหนืดของสารเคลือบที่ผสมอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.5 ร้อยละ 1.0 ร้อยละ 2.0 และร้อยละ 4.0 สูงขึ้นตามลำดับ เช่นเดียวกับขนาด 150 นาโนเมตร เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ในสารเคลือบ ปริมาณอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้นจึงเป็นตัวเพิ่มค่าความหนืดของสารเคลือบให้สูงขึ้นด้วย

2. สารเคลือบผิวอิมพอกซีเรซินที่ยังไม่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าไ้ไปนั้นมีฤทธิ์เป็นด่างอ่อน ค่า pH เท่ากับ 8 ในขณะที่สารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซิน ขนาด 100 และ 150 นาโนเมตร ร้อยละ 0.5 มีฤทธิ์เป็นกลาง ค่า pH เท่ากับ 7 และสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซิน ขนาด 100 และ 150 นาโนเมตร ร้อยละ 1.0 ร้อยละ 2.0 และร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน ค่า pH เท่ากับ 6 ซึ่งทุกภาวะมีฤทธิ์การกัดกร่อนที่ต่ำ จึงเหมาะสมในการนำไปใช้งานทำภาชนะบรรจุภัณฑ์ได้ แต่เนื่องจากสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซินขนาด 100 และ 150 นาโนเมตร ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีฤทธิ์เป็นกลางจึงมีความเหมาะสมที่สุดในการเลือกไปใช้งาน

3. ปริมาณของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนที่ใส่ไปนั้น มีผลต่อการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ทำให้พื้นผิวของสารเคลือบไม่เรียบ สารเคลือบที่ปริมาณร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนัก พบอนุภาคเกาะตัวเป็นก้อนมากที่สุด รองลงมาคือร้อยละ 2.0, ร้อยละ 1.0 และร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ชนิดของโครงสร้างผลึกก็มีผลเช่นกัน คืออนุภาคไทเทเนียม

ไดออกไซด์ระดับนาโนที่ขนาด 150 นาโนเมตร มีปริมาณผลึกแบบอนาเทสมากกว่าแบบรูไทล์ ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าแบบรูไทล์ จึงสามารถจับตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ดีกว่า โดยการพิจารณาเลือกใช้สารเคลือบที่เหมาะสมในการนำมาทำสารเคลือบนั้นควรจะต้องเลือกสารเคลือบที่มีผิวเรียบเพื่อให้ได้งานพิมพ์ที่มีคุณภาพดี และสีของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซิน มีลักษณะเป็นสีเหลืองอมเขียว ซึ่งในทางการพิมพ์มีแนวโน้มในการเกิดสีเพิ่มขึ้นได้ แต่สารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซินขนาด 100 นาโนเมตรมีความขุ่นและขาวในขณะที่สารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซินขนาด 150 นาโนเมตรมีสีที่ค่อนข้างเหลืองกว่า จึงอาจทำให้เกิดสีเพิ่มขึ้นได้ชัดเจนกว่าเมื่อนำไปพิมพ์

4. ความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำพบว่ามีความต้านทานแรงดึงที่วัดได้หลังเคลือบผิวมีค่าสูงขึ้นมีค่าเท่ากับ 30.904, 30.533 และ 32.673 เมกกะปาสคาลตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่ามอดูลัสยังเท่ากับ 486.697 เมกกะปาสคาล เมื่อเคลือบด้วยสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมพอกซีเรซินขนาด 100 นาโนเมตร ปริมาณร้อยละ 0.5 ร้อยละ 1.0 และร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดูลัสยังมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1774.973 เมกกะปาสคาล นั่นคือสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิมพอกซีเรซินที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ขนาด 100 นาโนเมตร เป็นภาวะที่มีความต้านทานแรงดึงและสามารถรับแรงกระทำได้ดีที่สุด

5. พลังงานผิวฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการปรับสภาพผิวมีค่าพลังงานผิวเท่ากับ 21.15 ไลน์ต่อเซนติเมตร หลังการเคลือบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้ง 8 ภาวะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่สามารถใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของวิธีการปรับผิวหน้าพลาสติกเพื่อเตรียมพิมพ์ได้ ถึงแม้ไม่เทียบเท่ากับฟิล์มที่มีการปรับสภาพผิวเพื่อเตรียมพิมพ์ทางการค้า แต่คุณภาพพิมพ์เป็นที่ยอมรับได้ หากมีการปรับปรุงเทคนิคให้สารเคลือบผิวมีความเรียบสม่ำเสมอมากกว่านี้ จากการทดสอบการทนต่อการขัดถูฟิล์มที่เคลือบผิวมีการหลุดลอกของหมึกพิมพ์น้อยกว่าฟิล์มไม่เคลือบผิวที่มีพลังงานผิวต่ำ แต่ยังคงหลุดลอกมากกว่าฟิล์มไม่เคลือบผิวที่มีพลังงานผิวสูงกว่า แปรผันตามค่าพลังงานผิว ในขณะที่การทดสอบการยึดติดของหมึกพิมพ์ หมึกพิมพ์สามารถยึดติดฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ในอิมพอกซีเรซินทั้ง 8 ตัวอย่างได้ดีกว่าฟิล์มไม่เคลือบผิวตัวอย่างที่ 1 (Treat 1) อาจเนื่องมาจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเพิ่มพื้นที่ผิวและอิมพอกซีเรซินซึ่งทำ

หน้าที่เป็นกาวยึดติดกับสารช่วยในการยึดติดที่ผสมอยู่ในหมึกพิมพ์ ทำให้หมึกพิมพ์ยึดติดได้ดีกว่า ถึงแม้ว่ามีพลังงานผิวที่ต่ำกว่า อีกทั้งค่าพลังงานผิวของฟิล์มไม่เคลือบผิวตัวอย่างที่ 1 อาจจะมีค่าต่ำกว่าแรงดึงผิวของหมึก ทำให้หมึกมีความสามารถในการเกาะติดบนฟิล์มต่ำด้วย

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซินเพื่อใช้ปรับผิวหน้าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำให้เหมาะสมต่อการพิมพ์ด้วยระบบเพล็กโซกราฟี โดยพิจารณาคุณภาพงานพิมพ์ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเมื่อเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโน ซึ่งในขั้นตอนการทำงานวิจัยนี้ยังต้องการการพัฒนาปรับปรุงต่อไป ดังนี้

1. อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอีพอกซีเรซินมีการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่จนทำให้บริเวณพื้นผิวของสารเคลือบมีความขรุขระ ไม่เรียบสม่ำเสมอ และส่งผลต่อคุณภาพงานพิมพ์ คือหมึกไม่สามารถพิมพ์ติดบริเวณที่อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ จึงควรปรับปรุงขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนสามารถกระจายตัวกันได้ไม่เป็นกลุ่มก้อน โดยอาจใช้คลื่นอัลตราโซนิคช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคให้ดียิ่งขึ้น (Bittmann *et al.*, 2011)

2. ฟิล์มที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อวัดค่าพลังงานผิวแล้วไม่ควรเก็บไว้เป็นเวลานานก่อนนำไปพิมพ์ เนื่องจากพลังงานผิวของฟิล์มจะลดลงตามระยะเวลาที่เก็บ จึงควรวัดค่าพลังงานผิวก่อนการใช้งานจริงหรือนำไปพิมพ์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กำธร สติรกุล. 2521. หนังสือและการพิมพ์. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.

ชัชฎา กลมเดชเดชา. 2553. นาโนเทคโนโลยี. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 25 (1): 59-62.

ดวงกมล ถนอมศักดิ์ศรี และ อัญชลี ตีรังคะวิบูลย์. 2548. ผลการจัดเรียงตัวของโครงสร้างพอลิเอทิลีนต่อการปรับสภาพผิวด้วยอาร์กอนพลาสมา. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

เนตร ธรรมชัยโสภิต และ สุภัทรา จิตอมรพันธุ์. 2548. ผลของความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารลดแรงตึงผิวชนิดแคตไอออนในกระบวนการเขียนหัวโดยวิธีการเคลื่อนที่ผู้ขั้วไฟฟ้า. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พิวัช สุขณียุทธ. 2552. การทดสอบการทนต่อการขัดถู (Rub Resistance Test). วารสารการพิมพ์ไทย. 12 (81): 23-25.

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช. 2539. เอกสารการสอนชุดวิชาความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการพิมพ์โครงการสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, นนทบุรี.

วิไลวรรณ จักร์มณี. 2548. การบำบัดน้ำเสียและโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยใช้ผงไทเทเนียมในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริพงศ์ พยอมแย้ม. 2530. การพิมพ์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

สมเดช กนกมณฑาคู. 2547. **สเปกโทรสโกปีในการพิสูจน์โครงสร้างของสารอินทรีย์**. ขอนแก่นการพิมพ์, ขอนแก่น.

สุคนธ์ พานิชพันธ์. 2549. **การสังเคราะห์วัสดุขนาดต่ำกว่าไมครอนและวัสดุนาโนด้วยกระบวนการทางเคมี**. ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

สุรเชษฐ์ คุ้มมี. 2551. **การกระจายตัวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำมันซิลิโคนโดยใช้สารช่วยกระจายตัวพอลิ (เอทิลีนไกลคอล-บี-ไดเมทิลไซลอคเซน-บี-เอทิลีนไกลคอล) ไตรบลิอ็อกโพลีเมอร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรัญ หาญสืบสาย. 2545. **ระบบการพิมพ์ต่างๆ และการนำไปใช้งาน**. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรอุษา สรวารี. 2544. **สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแลกเกอร์)**. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Al-Turaif, H.A. 2010. Effect of nano TiO₂ particle size on mechanical properties of cured epoxy resin. **Progress in Organic Coatings** 69: 241-246.

American Society for Testing and Materials. 2009. **Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test**, ASTM D3359-09. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials. 2009. **Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**, ASTM D882-09. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia.

American Society for Testing and Materials. 2009. **Standard Test Method for Wetting Tension of Polyethylene and Polypropylene Films**, ASTM D2578-09. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia.

- Bauer, R.B. 1983. **Epoxy resin chemistry 2**. America Chemical Society, New York.
- Bittmann, B., F. Hauptert and A.K. Schlarb. 2011. Preparation of TiO₂/epoxy nanocomposites by ultrasonic dispersion and their structure property relationship. **Ultrasonics Sonochemistry** 18: 120-126.
- CERAM Research Ltd. 2002. **Titanium Dioxide – Titania**. Available Source: <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1179>, November 8, 2010.
- Cohen, E.D. and E.B. Gutoff. 1996. **Modern coating and drying technology**. VCH Publishers, New York.
- Gao, J. C., J. Zou, X.W. Tan and Y. Wang. 2006. Characteristics and properties of surface coated nano-TiO₂. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 16: 1252-1258.
- Gravure Association of America and Gravure Education Foundation. 1991. **Process and Technology**. Gravure Association of America, New York.
- Ozin, G.A., A.C. Arsenault and L. Cademartiri. 2009. **Nanochemistry a chemical approach to nanomaterials**. 2nd ed. The Royal Society of Chemistry, London.
- Park, S.J. and J.S. Jin. 2001. Effect of corona discharge treatment on the dyeability of low-density polyethylene film. **Journal of Colloid and Interface Science** 236: 155-160.
- Parkin, I.P. and R.G. Palgrave. 2005. Self-cleaning coatings. **Journal of Materials Chemistry** 15: 1689-1695.
- Pazzi, A. and K.L. Mittal. 1994. **Handbook of adhesive technology**. Marcel Dekker, New York.
- Petric, E.M. 2006. **Epoxy adhesive formulations**. RR Donnelley, United States of America.

- 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: 183-194.
- Sabzi, M., S. M. Mirabedini, J. Zohuriaan-Mehr and M. Atai. 2009. Surface modification of TiO₂ nano-particles with silane coupling agent and investigation of its effect on the properties of polyurethane composite coating. **Progress in Organic Coatings**, 65: 222-228.
- Smyths, J. n.d. **Mineral structure and property data TiO₂ group**. Available Source: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>, November 8, 2010.
- Technical Coating International. n.d. **Coating**. Available Source: <http://www.tciinc.com/coating.html>, November 8, 2010.
- Wilson, A.D., J.W. Nicholson and H.J. Prosser. 1990. **Waterborne coatings surface coating-3**. Elsevier science publishing, New York.
- Yaghoubi, H., N. Taghavinia and E.K. Alamdari. 2010. Self cleaning TiO₂ coating on polycarbonate: surface treatment, photocatalytic and nanomechanical properties. **Surface and Coating Technology** 204: 1562-1568.
- Ye, Q., P.Y. Liu, Z.F. Tang and L. Zhai. 2007. Hydrophilic properties of nano-TiO₂ thin films deposited by RF magnetron sputtering. **Vacuum** 81: 627-631.
- Yin, Z., L. Chunzhong, L. Xiuhong, G. Feng, J. Haibo, S. Wei, Z. Ling and H. Ying. 2007. Synthesis and optical properties of TiO₂ nanoparticles. **Materials Letters** 61: 79-83.
- You, X., J. Chen and M. Anpo. 2005. A novel deposition precipitation method for preparation of Ag-loaded titanium dioxide. **Catalysis Letters** 102(3-4): 247-250.





ตารางผนวกที่ ก1 ค่าความหนืดของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในอิพอกซีเรซิน

ตัวอย่าง	ความหนืด(cP)
0.5% 100 nm	437.33 ^a ±25.403
1% 100 nm	458.67 ^{ab} ±40.464
2% 100 nm	482.67 ^{abc} ±28.095
4% 100 nm	550.00 ^{de} ±44.227
0.5% 150 nm	485.33 ^{bc} ±14.048
1% 150 nm	517.33 ^{cd} ±2.309
2% 150 nm	532.00 ^{de} ±0.000
4% 150 nm	570.67 ^e ±4.619

หมายเหตุ a-e อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยเมื่อมีการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ตารางผนวกที่ ข1 ค่าการวัดสี CIE L*a*b* ของสารเคลือบผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนใน
อิพอกซีเรซิน

ตัวอย่าง	L*	a*	b*
Uncoat	97.44 ^f ±0.121	-0.2 ^g ±0.036	0.19 ^a ±0.070
0.5% 100 nm	94.06 ^c ±0.775	-1.59 ^d ±0.026	6.31 ^d ±0.303
1% 100 nm	96.44 ^e ±0.272	-2.17 ^c ±0.020	9.1 ^c ±0.071
2% 100 nm	96.86 ^{ef} ±0.831	-4.73 ^a ±0.122	15.06 ^g ±0.197
4% 100 nm	97.34 ^{ef} ±0.478	-2.54 ^b ±0.085	16.46 ^h ±0.085
0.5% 150 nm	95.05 ^d ±0.394	-0.35 ^f ±0.010	3.14 ^b ±0.171
1% 150 nm	92.65 ^b ±0.592	-0.43 ^f ±0.045	2.62 ^b ±0.453
2% 150 nm	93.29 ^{bc} ±0.326	0.72 ^c ±0.104	4.97 ^c ±0.360
4% 150 nm	91.33 ^a ±0.399	-1.52 ^d ±0.133	12.59 ^f ±0.976

หมายเหตุ a-h อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย
เมื่อมีการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ตารางผนวกที่ ค1 ค่าการทดสอบความแข็งแรงของฟิล์ม

ตัวอย่าง	Tensile stress (MPa)	Modulus (MPa)
Uncoat film	29.467 ^{cd} ±0.8546	486.697 ^a ±53.3953
0.5% 100 nm	30.904 ^{de} ±1.6075	1688.611 ^{ef} ±81.9598
1% 100 nm	30.533 ^d ±1.2967	1662.425 ^{ef} ±76.4278
2% 100 nm	32.673 ^c ±2.8712	1774.973 ^g ±169.9081
4% 100 nm	27.423 ^{bc} ±1.2604	1580.547 ^d ±79.6414
0.5% 150 nm	23.213 ^a ±1.0674	1453.181 ^b ±81.6122
1% 150 nm	24.73 ^{bc} ±1.9960	1484.604 ^{cd} ±63.6896
2% 150 nm	26.164 ^b ±1.6850	1476.512 ^{cd} ±51.2885
4% 150 nm	27.19 ^b ±0.6465	1591.075 ^{de} ±77.7890

หมายเหตุ a-g อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย
เมื่อมีการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ภาคผนวก ง
ค่าการทดสอบความเข้มสีของหมึกพิมพ์

ตารางผนวกที่ ๑๑ ค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์สี Cyan

ตัวอย่าง	60 lines/cm	80 lines/cm	100 lines/cm	140 lines/cm
Untreat	2.578 ^{bc} ±0.041	2.498 ^{cd} ±0.030	2.193 ^b ±0.046	1.560 ^a ±0.068
Treat1	2.537 ^{ab} ±0.053	2.414 ^a ±0.065	2.112 ^a ±0.083	1.577 ^a ±0.025
Treat2	2.647 ^e ±0.014	2.516 ^{cd} ±0.026	2.177 ^b ±0.045	1.737 ^b ±0.043
0.5% 100 nm	2.597 ^{cd} ±0.027	2.500 ^{cd} ±0.032	2.265 ^c ±0.032	1.820 ^{cd} ±0.040
1% 100 nm	2.657 ^{e d} ±0.018	2.572 ^e ±0.013	2.379 ^c ±0.033	1.905 ^c ±0.022
2% 100 nm	2.574 ^{bc} ±0.025	2.454 ^{ab} ±0.030	2.329 ^{de} ±0.059	1.843 ^{de} ±0.123
4% 100 nm	2.632 ^{de} ±0.012	2.529 ^d ±0.015	2.279 ^{cd} ±0.030	1.847 ^{de} ±0.012
0.5%150 nm	2.603 ^{cd} ±0.021	2.490 ^{bcd} ±0.040	2.193 ^b ±0.010	1.710 ^b ±0.020
1% 150 nm	2.603 ^{cd} ±0.033	2.524 ^d ±0.016	2.278 ^{cd} ±0.020	1.773 ^{bc} ±0.033
2% 150 nm	2.523 ^a ±0.042	2.447 ^{ab} ±0.022	2.231 ^{bc} ±0.052	1.728 ^b ±0.026
4% 150 nm	2.537 ^{ab} ±0.025	2.475 ^{bc} ±0.022	2.255 ^c ±0.026	1.760 ^{bc} ±0.022

หมายเหตุ a-e อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย
เมื่อมีการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ๑๒ ค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์สี Magenta

ตัวอย่าง	60 lines/cm	80 lines/cm	100 lines/cm	140 lines/cm
Untreat	2.255 ^b ±0.022	2.172 ^b ±0.012	1.896 ^a ±0.028	1.540 ^{bc} ±0.005
Treat1	2.303 ^c ±0.011	2.197 ^{cd} ±0.020	1.956 ^b ±0.011	1.519 ^b ±0.020
Treat2	2.174 ^a ±0.036	2.107 ^a ±0.020	1.881 ^a ±0.026	1.438 ^a ±0.050
0.5% 100 nm	2.250 ^b ±0.016	2.189 ^{bc} ±0.004	1.999 ^{cd} ±0.019	1.614 ^d ±0.008
1% 100 nm	2.277 ^{bc} ±0.037	2.243 ^f ±0.010	2.075 ^h ±0.012	1.637 ^d ±0.021
2% 100 nm	2.236 ^b ±0.058	2.235 ^{ef} ±0.023	2.030 ^g ±0.012	1.719 ^f ±0.019
4% 100 nm	2.253 ^b ±0.031	2.205 ^{cd} ±0.013	2.020 ^{efg} ±0.012	1.675 ^e ±0.012
0.5% 150 nm	2.275 ^{bc} ±0.018	2.214 ^{de} ±0.020	1.944 ^b ±0.015	1.544 ^{bc} ±0.019
1% 150 nm	2.274 ^{bc} ±0.011	2.232 ^{ef} ±0.020	1.986 ^c ±0.011	1.541 ^{bc} ±0.005
2% 150 nm	2.248 ^b ±0.020	2.209 ^{cd} ±0.022	2.005 ^{cde} ±0.009	1.567 ^c ±0.020
4% 150 nm	2.309 ^c ±0.028	2.265 ^g ±0.015	2.022 ^{fg} ±0.006	1.704 ^f ±0.021

หมายเหตุ a-g อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย
เมื่อมีการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 3 ค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์สี Yellow

ตัวอย่าง	60 lines/cm	80 lines/cm	100 lines/cm	140 lines/cm
Untreat	1.642 ^a ±0.037	1.509 ^a ±0.022	1.257 ^a ±0.014	0.976 ^a ±0.023
Treat1	1.711 ^{cde} ±0.016	1.519 ^a ±0.015	1.308 ^b ±0.029	0.999 ^a ±0.010
Treat2	1.777 ^h ±0.020	1.618 ^{cd} ±0.033	1.417 ^d ±0.006	1.120 ^b ±0.020
0.5% 100 nm	1.757 ^{gh} ±0.0204	1.630 ^{cd} ±0.022	1.444 ^e ±0.002	1.216 ^d ±0.012
1% 100 nm	1.742 ^{efg} ±0.016	1.632 ^d ±0.008	1.460 ^{ef} ±0.012	1.179 ^c ±0.012
2% 100 nm	1.736 ^{defg} ±0.021	1.636 ^d ±0.029	1.491 ^g ±0.011	1.231 ^{de} ±0.019
4% 100 nm	1.746 ^{fgh} ±0.016	1.644 ^d ±0.032	1.472 ^{fg} ±0.041	1.251 ^e ±0.011
0.5% 150 nm	1.673 ^b ±0.028	1.575 ^b ±0.014	1.376 ^c ±0.022	1.095 ^b ±0.023
1% 150 nm	1.682 ^{bc} ±0.036	1.583 ^b ±0.031	1.367 ^c ±0.024	1.097 ^b ±0.014
2% 150 nm	1.721 ^{def} ±0.025	1.600 ^{bc} ±0.017	1.374 ^c ±0.005	1.155 ^c ±0.055
4% 150 nm	1.703 ^{bcd} ±0.014	1.586 ^b ±0.012	1.411 ^d ±0.025	1.158 ^c ±0.012

หมายเหตุ a-h อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย
เมื่อมีการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ๓4 ค่าความเข้มสีของหมึกพิมพ์สี Black

ตัวอย่าง	60 lines/cm	80 lines/cm	100 lines/cm	140 lines/cm
Untreat	2.308 ^b ±0.053	2.292 ^c ±0.014	2.024 ^{cd} ±0.012	1.484 ^b ±0.034
Treat1	2.412 ^{cd} ±0.094	2.309 ^{cd} ±0.013	1.962 ^{bc} ±0.020	1.499 ^{bc} ±0.032
Treat2	2.199 ^a ±0.100	2.148 ^a ±0.055	1.748 ^a ±0.110	1.299 ^a ±0.086
0.5% 100 nm	2.380 ^{bc} ±0.051	2.357 ^{dc} ±0.026	2.178 ^{fg} ±0.039	1.780 ^g ±0.024
1% 100 nm	2.428 ^{cd} ±0.059	2.396 ^c ±0.070	2.199 ^g ±0.079	1.771 ^g ±0.033
2% 100 nm	2.475 ^d ±0.080	2.395 ^c ±0.064	2.118 ^{ef} ±0.041	1.704 ^f ±0.019
4% 100 nm	2.390 ^{bc} ±0.043	2.285 ^c ±0.015	2.080 ^{dc} ±0.035	1.645 ^c ±0.045
0.5% 150 nm	2.364 ^{bc} ±0.021	2.215 ^b ±0.014	1.929 ^b ±0.014	1.459 ^b ±0.020
1% 150 nm	2.225 ^a ±0.018	2.223 ^b ±0.033	1.963 ^{bc} ±0.022	1.547 ^{cd} ±0.038
2% 150 nm	2.315 ^b ±0.023	2.306 ^{cd} ±0.048	2.051 ^d ±0.018	1.586 ^d ±0.023
4% 150 nm	2.323 ^b ±0.019	2.315 ^{cd} ±0.027	2.061 ^{dc} ±0.016	1.645 ^c ±0.027

หมายเหตุ a-g อักษรที่มีความแตกต่างในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย
เมื่อมีการเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาวดวงกมล โภคะไพบุลย์สุข
เกิดวันที่ 5 เมษายน 2530
สถานที่เกิด อำเภอบางกอกน้อย จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา วท.บ. (ภาพถ่ายและการพิมพ์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตำแหน่งปัจจุบัน -
สถานที่ทำงานปัจจุบัน -
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -
ทุนการศึกษาที่ได้รับ -