

EV ๕๕๖

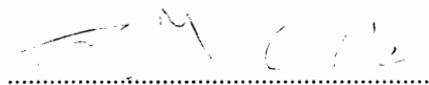
๑๖ ธ.ค. ๕๕

ตัวทำละลายทดแทนในกระบวนการชะล้างพื้นผิววัสดุ

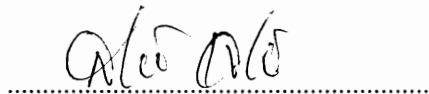
นายชวกร ลักษณะปัญญากุล วท.บ. (เคมี)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. ๒๕๕๐

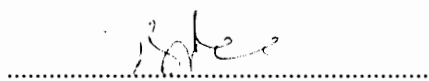
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



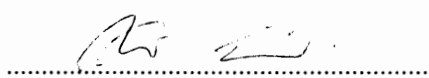
(ผศ.ดร.ธีราวุธ พงศ์ประยูร)



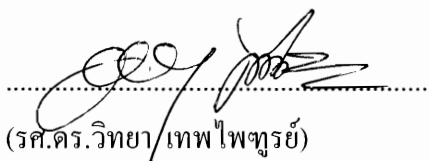
(ดร.ศิริลักษณ์ เจียรกร)



(รศ.ดร.นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์)



(รศ.ดร.สร้อยดาว วินิจนันทรณ์)



(รศ.ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

กรรมการ

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศูนย์หอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวทำละลายทดแทนในกระบวนการชะล้างพื้นผิววัสดุ
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายชวกร ลักษณะปัญญากุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สิริลักษณ์ เจียรกร รศ.ดร. นุรักษ์ กฤษดาอนุรักษ์
หลักสูตร	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
สายวิชา	เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2550

บทคัดย่อ

เมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride: MC) เป็นองค์ประกอบหลักในสารชะล้างพื้นผิวของวัสดุเคลือบสี ซึ่งปัจจุบันกำลังอยู่ในระหว่างยกเลิกการใช้งานเนื่องจากส่งผลกระทบต่อทางมลพิษอากาศในระยะยาว อนุสัญญาบาเซลในปี ค.ศ. 1989 เป็นความร่วมมือในระดับสากลเพื่อควบคุมการใช้เมทิลีนคลอไรด์ ซึ่งส่งผลกระทบต่ออากาศผลิตและอากาศการส่งออกของประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษหาสารทดแทนเมทิลีนคลอไรด์เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยการทดสอบการลอกสีแผ่นโลหะเคลือบสี polyurethane-acrylic enamel และแลคเกอร์ ด้วยตัวทำละลายทดแทน n-methylpyrrolidone (NMP) และ dimethyl sulfoxide (DMSO) จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) ตัวทำละลายทดแทน NMP และ DMSO มีอัตราการลอกสีช้ากว่า MC โดย NMP ลอกสีภายใน 90-120 นาที ขณะที่ DMSO จะใช้เวลา 180-240 นาที เมื่อเทียบกับ MC สามารถลอกสีได้ภายใน 10-15 นาที การปรับเปลี่ยนค่าความเป็นกรดด่างของตัวทำละลาย NMP และ DMSO ด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น นอกจากจะช่วยกำจัดสนิมที่ผิวโลหะแล้วลดระยะเวลาที่ใช้ในการลอกสีที่อุณหภูมิห้องได้น้อยกว่า 20 นาที เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของตัวทำละลายระหว่าง NMP และ DMSO ในสัดส่วน 40 ต่อ 60 โดยปริมาตรสามารถลอกสีได้ภายใน 11 นาที ที่อุณหภูมิ 70°C และแผ่นฟิล์มที่ลอกได้มีขนาดใหญ่ สะดวกต่อการนำไปกำจัด ตัวทำละลาย NMP และ DMSO สามารถใช้งานซ้ำได้อย่างน้อย 10 ครั้งโดยประสิทธิภาพลดลงไปเพียงเล็กน้อย แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อนำไปปนในตัวทำละลาย เนื่องจากสารเคมีทั้งสองชนิดสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารประกอบที่มีประสิทธิภาพในการลอกสีลดลง และเมื่อนำ NMP และ DMSO ที่ใช้งานแล้วมาทำการกลั่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่พบว่าภายหลังการกลั่น NMP มีประสิทธิภาพในการลอกสีได้เช่นเดียวกับ NMP ก่อนการกลั่น ขณะที่ DMSO เกิดการสลายตัวเป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษ ซึ่งไม่มีผลต่อการลอกสี ดังนั้นการนำตัว

ทำละลายทดแทนทั้งสองกลับมาใช้ซ้ำจึงเป็นวิธีที่คุ้มค่าที่สุดในการใช้งาน เมื่อพิจารณาจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่า MC มี VHR (Vapor Hazard Ratio) มากกว่า NMP และ DMSO ถึง 100 เท่า ดังนั้นการนำ NMP และ DMSO มาใช้ทดแทน MC ในการลอกสี จึงน่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในอุตสาหกรรมเคลือบสี

คำสำคัญ : การลอกสี / ไคเมทิลซัลฟอกไซด์ / เมทิลไพโรลิโดน / เมทิลลีนคลอไรด์

Thesis Title	Alternative Decoating Solvents for Surface Cleansing
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Chawagorn Laksanapanyakul
Thesis Advisors	Dr. Siriluk Chiarakorn Assoc. Prof. Dr. Nurak Kridsadanurak
Program	Master of Science
Field of Study	Environmental Technology
Department	Environmental Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2550

Abstract

Methylene Chloride (MC) is a major component used in decoating processes. At present, the use of methylene chloride has been banned due to the long-term impact of air pollution. The Basel convention launched in 1989 is the international agreement for controlling the use of methylene chloride. This commitment plays an important role in manufacturing and export sectors in Thailand. This research aims to find out the alternative solvents replacing the use of methylene chloride in order to reduce the environmental effect. The stripping test was carried out on the samples coated by polyurethane-acrylic enamel as a first primer and then covered the top surface by lacquer. Two alternative solvents used in this study were n-methylpyrrolidone (NMP) and dimethyl sulfoxide (DMSO). The results showed that the rates of stripping at room temperature (30°C) of NMP and DMSO were lower than that of MC. The stripping period was only 15 minutes for MC while it took 90-120 minutes and 180-240 minutes for NMP and DMSO, respectively. Mixing NMO or DMSO with concentrated formic acid did not only remove rust on metal surface but also reduced the stripping time to lower than 20 minutes. The solvent mixed by NMP and DMSO with the ratio of 40:60 by volume removed the paint within 11 minutes at 70°C with the large scraps which were easy to remove. Reuses of NMP and DMSO were more than 10 times but the contamination of water can reduce the stripping efficiency of NMP and DMSO. These two chemicals reacted with water then produced the compounds, which decreased the stripping efficiency. The results of

recycling of NMP and DMSO by distillation showed that the stripping efficiency of the distilled NMO was similar to that of undistilled one. While the distilled DMSO decomposed as toxic products, which did not affect the paint stripping. In comparison to distillation, reused of the alternative solvents was introduced as an economical practice. Considering of the environmental impacts, the Vapor Hazard Ratio (VHR) of MC is more than that of NMP and DMSO 100 times. Replacing of MC by NMP and DMSO is probably an interesting alternative in paint coating industries.

Keywords: Dimethyl Sulfoxide / Methylene Chloride / N-methylpyrrolidone / Paint Stripping

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.ศิริลักษณ์ เจียรกร อาจารย์ที่ปรึกษาและ รศ.ดร. นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ช่วยให้การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งกรรมการวิทยานิพนธ์ได้แก่ ผศ.ดร.ธราวุธ พงศ์ประยูร ผศ.ดร.สร้อยดาว วินิจนันทรัตน์ และ รศ.ดร. วิทยา เทพไพฑูรย์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัท อัลฟ่าเคมีคอลและเทคโนโลยี ที่เอื้อเพื่อตัวทำละลาย NMP และน้ำยาลอกสีเชิงการค้า ขอขอบคุณอาจารย์ไพรัตน์ พรหมมาและอาจารย์สุรเชษฐ์ รัตนอักษรเวช แผนกวิชาเทคโนโลยีรถยนต์ วิทยาลัยสารพัดช่างนครหลวงที่เอื้อเพื่อการเตรียมแผ่นโลหะตัวอย่างเคลือบสี โรงชุบสังกะสีบางแคที่เอื้อเพื่อการเคลือบสังกะสีบนแผ่น โลหะทั้งหมด และขอขอบคุณอาจารย์บุรินทร์ ลิ้มขาวฟ้า ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในความอนุเคราะห์เครื่องวิเคราะห์ FTIR และสารเคมีอื่นๆ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ และเพื่อนๆ คุณเบญจวรรณ มหิทธิรักษ์ คุณรุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์ สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมทุกคนที่ได้ช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาดำเนินการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกด้านมาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ซึ่งความสำเร็จของงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๙
สารบัญ	๗
รายการตาราง	๑๑
รายการรูปประกอบ	๑๒
ประมวลคำศัพท์และคำย่อ	๑๓

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎีและวารสารปริทัศน์	3
2.1 สารเคลือบผิว (Surface Coating)	3
2.2 ส่วนประกอบของสี (Paint Components)	3
2.2.1 ผงสีและเอ็กซ์เทนเดอร์ (Pigment and Extender)	4
2.2.2 สารยึด (Binder)	7
2.2.3 ตัวทำละลาย (Solvent)	10
2.2.4 สารเติมแต่ง (Additive)	12
2.3 กระบวนการเคลือบผิว	15
2.3.1 การเตรียมพื้นผิว (Surface Preparation)	15
2.3.1.1 การทำความสะอาดพื้นผิวก่อนการเคลือบสี	17
2.3.1.1.1 การทำความสะอาดทางกายภาพ	17

	หน้า
2.3.1.1.2	การทำความสะอาดโดยวิธีทางเคมี
2.3.1.2	ตัวทำละลายที่ใช้ในการลอกสีด้วยวิธี Cold Cleansing
2.3.2	การเคลือบผิว (Paint Application)
2.3.2.1	การเคลือบโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย
2.3.2.2	การเคลือบโดยมีตัวทำละลายอินทรีย์
2.3.2.3	การเคลือบโดยใช้สีผง
2.3.3	กระบวนการทำให้แห้ง
2.4	ขั้นตอนการพ่นสีในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์
2.5	วารสารปริทัศน์
3.	วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง
3.1	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
3.1.1	สารเคมี
3.1.2	แผ่นโลหะเคลือบสี
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง
3.3	ขั้นตอนการทดลอง
3.3.1	การเตรียมแผ่น โลหะเคลือบสี
3.3.1.1	ชั้นสีรองพื้นพอลิยูรีเทน
3.3.1.2	ชั้นสีทับหน้าพอลิยูรีเทน
3.3.1.3	ชั้นสีแล็กเกอร์
3.3.2	การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของตัวทำละลายแต่ละชนิดที่อุณหภูมิห้อง $30\pm2^{\circ}\text{C}$
3.3.3	การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการลอกสีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO
3.3.4	การศึกษา pH ที่เหมาะสมของตัวทำละลาย NMP และ DMSO
3.3.5	การศึกษาผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง NMP และ DMSO
3.3.6	การศึกษากลไกการลอกสีในชั้นต่างๆของตัวทำละลาย NMP และ DMSO
3.3.7	การทดสอบการนำตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
3.3.7.1	การนำกลับมาใช้ซ้ำ
3.3.7.2	การกลั่นตัวทำละลายที่ใช้แล้ว

	หน้า
3.3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวทำละลายด้วยเทคนิค FTIR	53
3.3.9 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และความเป็นพิษของตัวทำละลาย	53
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	54
4.1 ผลการลอกสีเมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 30°C	54
4.2 ผลการลอกสีเมื่อปรับเปลี่ยน pH ของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30°C	59
4.3 ผลการลอกสีเมื่อใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO และ NMP ที่อุณหภูมิ 30°C	64
4.4 ผลการลอกสีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 80°C	66
4.5 ผลการลอกสีเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-70°C	67
4.6 การศึกษากลไกการลอกสีชั้นต่างๆของตัวทำละลาย NMP และ DMSO	67
4.7 การนำกลับมาใช้ใหม่ของ NMP และ DMSO	71
4.7.1 การใช้ซ้ำของ NMP และ DMSO	71
4.7.2 การกลั่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ของ NMP และ DMSO	75
4.8 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และความเป็นพิษของ NMP และ DMSO เปรียบเทียบกับ MC	80
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	83
5.1 สรุปผลการทดลอง	83
5.1.1 การศึกษาการลอกสีด้วย NMP และ DMSO ที่สภาวะต่างๆ	83
5.1.2 การศึกษาแนวทางการใช้ซ้ำและการนำกลับมาใช้ใหม่	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารอ้างอิง	85
ภาคผนวก	
ก ขั้นตอนการพ่นสีโลหะ	89
ข ระยะเวลาที่ใช้ในการลอกสีต่างๆ	99
ประวัติผู้วิจัย	110

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตัวอย่างผงสีที่ใช้งานโดยทั่วไป	6
2.2 ตัวอย่างของสารยึคประเภทต่างๆ	8
2.3 การใช้เรซินสังเคราะห์สำหรับสภาพสิ่งแวดล้อมหรือสำหรับการเคลือบผิววัสดุต่างๆ	9
2.4 ตัวทำละลายทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมสี	11
2.5 สิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิววัสดุ	16
2.6 เทคโนโลยีการทำความสะอาดพื้นผิวประเภทต่างๆ	23
2.7 สมบัติทางกายภาพของ MC	25
2.8 สมบัติทางกายภาพของ NMP	26
2.9 สมบัติทางกายภาพของ DMSO	27
2.10 สมบัติทางกายภาพของ Benzyl Alcohol	28
2.11 กระบวนการเคลือบสีชนิดต่างๆ	35
2.12 สมบัติของ NMP เทียบกับ MC	40
2.13 กฎหมายสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับ MC และเทียบกับ NMP	41
2.14 ค่าใช้จ่ายของ NMP กับ MC ในการลอกสี	41
2.15 ผลการลอกสีโดยใช้ NMP	41
2.16 ผลการลอกสีเมื่อทำการผสม DMSO ในอัตราส่วนต่างๆ	43
4.1 เวลาที่ใช้ในการลอกสีของ NMP และ DMSO ของสีชั้นต่างๆ	69
4.2 สมบัติของ NMP และ DMSO ภายหลังการใช้ซ้ำและผ่านการกลั่น	76
4.3 ค่า VHR ของ NMP, DMSO และ MC	80
4.4 ค่า VHR ของตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO และ NMP	81
4.5 ราคาตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO และ NMP ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	81
ข.1 เวลาที่ใช้ในการลอกสีด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 30°C	100
ข.2 เวลาที่ใช้ในการลอกสีของตัวทำละลายเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง	101
ข.3 เวลาที่ใช้ในการลอกสีโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO และ NMP ที่ 30°C	102
ข.4 เวลาที่ใช้ในการลอกสีของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-80°C	103
ข.5 ผลการลอกสีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 40-70°C	105

ข.6	เวลาที่ใช้ในการลอกสีชั้นต่างๆด้วยตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30°C	107
ข.7	เวลาที่ใช้ในการลอกสีโดยการนำมาใช้ซ้ำของ NMP และ DMSO ที่ 30°C	108

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 กระบวนการเคลือบผิวโดยทั่วไป	15
2.2 ภาพถ่ายก่อนและหลังการพ่นทราย	18
2.3 กระบวนการลอกสีโดยใช้ NMP	39
2.4 แผนภาพการละลายของ Hansen ของตัวทำละลายบางชนิด	42
3.1 แผ่นโลหะที่ตัดให้ได้ขนาด 5x10 ตารางเซนติเมตรก่อนเคลือบรองพื้น	46
3.2 แผ่นโลหะหลังเคลือบชั้นรองพื้น	47
3.3 แผ่นโลหะหลังเคลือบชั้นท๊อปหน้า	47
3.4 แผ่นโลหะหลังเคลือบชั้นสีแลคเกอร์	48
3.5 แผนผังการทดลอง	48
3.6 ภาพแผ่นโลหะในตัวทำละลายขณะเริ่มการทดลอง	49
3.7 ชุดอุปกรณ์และภาพแผ่นโลหะขณะทำการทดลอง	50
4.1 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 30°C	55
4.2 ภาพขั้นตอนการลอกสี	55
4.3 แผนภาพการละลายของ Hansen	57
4.4 ภาพถ่ายพื้นผิวเหล็กในขั้นตอนต่างๆ	58
4.5 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH ของ NMP และ DMSO ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30°C	60
4.6 ภาพแผ่นโลหะหลังจากการลอกสีด้วยตัวทำละลายผสมของ NMP และกรดที่ pH ต่างๆ	60
4.7 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO เมื่อปรับสถานะด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น 26.67 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30°C	61
4.8 ภาพพื้นผิวโลหะเมื่อลอกสีด้วยกรดฟอร์มิกในตัวทำละลาย NMP	62
4.9 พื้นผิวของสีหลังจากลอกสีด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น 22.67 โมลาร์	62
4.10 ภาพพื้นผิวสีหลังจากการลอกสีด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 โมลาร์	63
4.11 ภาพถ่ายพื้นผิวโลหะหลังการลอกสีด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น	63
4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวโลหะหลังการลอกสีด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น	64
4.13 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO : NMP ที่ 30°C	65

4.14	ภาพฟิล์มที่ลอกออกเมื่อมีปริมาณของ DMSO มากกว่า 60% ในสารละลาย	65
4.15	ภาพฟิล์มที่ลอกออกเมื่อมีปริมาณของ NMP มากกว่า 40% ในสารละลาย	65
4.16	กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-80°C	66
4.17	กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีของตัวทำละลายผสมระหว่าง NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-70°C	67
4.18	ชั้นสีรองพื้นและทับหน้าหลังการลอกสีด้วย NMP	69
4.19	ชั้นสีทับหน้า+แล็กเกอร์หลังการลอกสีด้วย NMP และ DMSO	70
4.20	ชั้นสีแล็กเกอร์หลังการลอกสีด้วย NMP และ DMSO	70
4.21	ชั้นสีรองพื้น,สีรองพื้น+สีทับหน้าหลังการลอกสีด้วย DMSO	71
4.22	เวลาที่ใช้ในการลอกสีในการใช้ซ้ำของตัวทำละลาย NMP และ DMSO	72
4.23	กราฟ FTIR ของตัวทำละลาย NMP ก่อนและหลังการทดลอง	73
4.24	กราฟ FTIR ของตัวทำละลาย DMSO ก่อนและหลังการทดลอง	74
4.25	กราฟแสดงผลการใช้ซ้ำของ NMP ที่ผ่านการกลั่นเปรียบเทียบกับที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่น	75
4.26	กราฟ FTIR ของตัวทำละลาย NMP หลังการกลั่น	77
4.27	กราฟ FTIR ของตัวทำละลาย DMSO หลังการกลั่น	79
1ก.	ภาพถ่ายเครื่องปั๊มลมชนิดลูกสูบ	91
2ก.	วิธีการต่อชุดอุปกรณ์ลมทั้งหมด	91
3ก.	ภาพถ่ายอุปกรณ์ลมทั้งหมด	92
4ก.	กาพ่นสี	93
5ก.	ภาพถ่ายล้อแม็กซ์ขณะทำการลอกสีด้วยวิธีการจุ่มในตัวทำละลาย	95
6ก.	ภาพถ่ายการทำความสะอาดชิ้นงานหลังการลอกสีด้วยตัวทำละลาย	96
7ก.	ภาพถ่ายการเตรียมพื้นผิวด้วยวิธีการขัดและพ่นทราย	96
8ก.	ภาพถ่ายขั้นตอนการปรับแต่งพื้นผิวอย่างละเอียดและการเชื่อมพื้นผิว	97
9ก.	ภาพถ่ายขั้นตอนการพ่นสีรองพื้นและการปรับระดับพื้นผิว	97
10ก.	การพ่นสีทับหน้าทั้งด้านในและด้านนอก	98
11ก.	ภาพถ่ายขั้นตอนการเคลือบสีแล็กเกอร์และนำชิ้นงานไปอบ	98
12ก.	ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบสีอย่างสมบูรณ์	98

ประมวลคำศัพท์และคำย่อ

MC	=	Methylene Chloride
Com. Solvent	=	Commercial Solvent
NMP	=	N-Methyl-2-Pyrrolidone
DMSO	=	Dimethyl Sulfoxide
DBE	=	Dibasic Ester
MEA	=	Mono Ethanol Amine
DMF	=	Dimethylformamide
BenzylAlc	=	Benzyl Alcohol
PU	=	Poly Urethane
VHR	=	Vapor Hazard Ratio
cm ²	=	ตารางเซนติเมตร
min	=	นาที
LD ₅₀	=	Median lethal dose
TLV/TWA	=	Threshold Limit Value / Time Weighted Average
TCE	=	Trichloroethane

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

กระบวนการเคลือบสีในปัจจุบันมีการใช้งานกันในอุตสาหกรรมหลายประเภท แต่กระบวนการผลิตล้วนสร้างมลภาวะทั้งทางอากาศและของเสียที่มาจากการเคลือบสีและรวมถึงกระบวนการนำกลับมาเคลือบสีใหม่ ในกระบวนการเคลือบสีใหม่จำเป็นต้องผ่านการลอกชั้นสีออกจากพื้นผิววัสดุนั้นๆ ก่อนที่จะทำการเคลือบสีใหม่ลงไปบนพื้นผิว โดยทั่วไปจะใช้ตัวทำละลายที่มีสมบัติในการละลายสี ตัวทำละลายที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นมีองค์ประกอบหลักคือ เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene Chloride: MC) ซึ่งในปัจจุบันนั้นการใช้ MC ในกระบวนการผลิตในขั้นตอนใดก็ตามจะส่งผลกระทบต่อทางมลพิษทางอากาศในระยะยาว และปัจจุบัน MC กำลังอยู่ในระหว่างการยกเลิกใช้งานจากอนุสัญญาบาเซลที่ว่าด้วยการควบคุม การเคลื่อนย้ายและการกำจัดของเสียอันตรายข้ามแดน ประเทศไทยได้ลงนามให้สัตยาบันเป็นภาคีอนุสัญญาดังกล่าวตั้งแต่วันที่ 22 กุมภาพันธ์ 2541 เป็นต้นมา[1] โดยในหมวดหมู่ A ข้อที่ 3170 ได้ระบุสารเคมีที่ชื่อ Methylene Chloride หรือ Dichloro Methane ซึ่งเป็นสารที่ต้องใช้ในกระบวนการล้างสีพื้นผิวของวัสดุหลายประเภท เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า ยานพาหนะทุกชนิด เป็นต้น ในประเทศไทยมีการนำเข้าสารเคมีดังกล่าวสูงถึง 30,515 ตันต่อปี[2] สารเคมีชนิดนี้จัดเป็นสารเคมีในกลุ่ม Hazardous Air Pollutants (HAPs)(สารเคมีอันตราย ชนิดที่ 1) ตาม พรบ. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 มีสมบัติไม่ไวไฟ มีกลิ่นคล้ายเอสเทอร์ และจากข้อมูลกรมควบคุมมลพิษพบว่า MC เป็นอันตรายต่อสุขภาพโดยมีฤทธิ์ทำลายปอด ระบบประสาท มาตรฐานพรบ.คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 กำหนดค่าสูงสุดของ MC ที่สามารถรับเข้าสู่ร่างกายโดยไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายสำหรับการทำงานเฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวันไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm)[3]

ปัจจุบันการวิจัยเพื่อหาตัวทำละลายใหม่เพื่อทดแทน MC จึงเป็นวิธีที่ถูกพิจารณาควบคู่ไปกับการควบคุมและบำบัดไอระเหยของ MC จากข้อมูลงานวิจัยพบว่า ไอระเหยของ MC สามารถบำบัดได้โดยใช้ตัวดูดซับ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา[4] แม้ว่าจะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อเสียคือลงทุนสูงและผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยายังคงมีความเป็นพิษเหลืออยู่ และอีกวิธีหนึ่งคือ วิธีบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งทำได้ยากเนื่องจากอะตอมของคลอรีนมีความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลาย MC ต่ำ ดังนั้นวิธีการที่ดีที่สุดในการลดผลกระทบของ MC ต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจึงควรนำหลักการลดความเป็นพิษที่แหล่งกำเนิดมาใช้ โดยการหาตัวทำละลายที่มีความเป็นพิษน้อยลงมาใช้ในการชะล้างสีวัสดุเพื่อทดแทน MC นอกจากนี้ยังเกิดผลดีในเชิงการค้าระหว่างประเทศโดยเป็นไปตามอนุสัญญาบาเซล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาตัวทำละลายที่มีความเป็นพิษน้อยทดแทน Methylene Chloride และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลอกสี Polyurethane บนพื้นผิวโลหะ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาความสามารถของตัวทำละลาย N-Methyl Pyrrolidone (NMP), Dimethyl Sulfoxide (DMSO) ในการลอกสีบนพื้นผิวโลหะที่ผ่านกระบวนการเคลือบสีโพลียูรีเทนระบบ 2 องค์ประกอบ (2k System) ที่อุณหภูมิ 30°C ถึง 80°C, ที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน และปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ NMP ต่อ DMSO เป็น 20:80, 40:60, 50:50, 60:40 และ 80:20 โดยปริมาตร
- 1.3.2 ศึกษาการนำตัวทำละลายที่ผ่านการลอกสีแล้วกลับมาใช้ใหม่โดยการกลั่นและการใช้ซ้ำ
- 1.3.3 ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของตัวทำละลายทดแทน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพื่อลดปริมาณการใช้สารเคมีอันตรายและลดการทิ้งของเสียจากอุตสาหกรรมเคลือบผิว (Waste Minimization)
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการลดมลพิษสำหรับอุตสาหกรรมเคลือบผิวที่ใช้สีเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น

บทที่ 2 ทฤษฎีและวารสารปริทัศน์

2.1 สารเคลือบผิว (Surface Coatings)

สารเคลือบผิว (Surface Coatings) คือ สิ่งที่ใช้ในการเคลือบพื้นผิวเพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุโครงสร้างให้มีความคงทนถาวรขึ้น โดยแบ่งวัตถุประสงค์ของการเคลือบผิวออกเป็น 2 ประการ คือ [5]

- เพื่อป้องกันพื้นผิววัสดุจากมลภาวะต่างๆ สารเคลือบผิวจะช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุที่ถูกเคลือบมีความคงทนต่ออากาศ น้ำ และสารเคมีต่างๆ นอกจากนี้สารเคลือบผิวยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการขีดสีได้มากขึ้น และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น
- เพื่อตกแต่งให้แลดูสวยงาม ความสวยงามของวัสดุหลังการเคลือบผิวหน้าด้วยสารเคลือบผิว อาจจะมาจาสี (color) จากความเงา (gloss) จากลวดลายตกแต่ง (texture) หรือจากความสว่าง (lighting) หรือจากทั้งหมดรวมกัน

ในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบของสี (Paint Composition), การเตรียมพื้นผิว (Surface Preparation), กลไกและชนิดของการทำความสะอาดพื้นผิว ซึ่งมีรายละเอียดดังกล่าวในแต่ละหัวข้อดังนี้

2.2 ส่วนประกอบของสี (Paint Components)

สี เป็น ของไหลเมื่อพ่นลงบนพื้นผิวในลักษณะของชั้นบางๆ จะเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็ง องค์ประกอบของสีจะแตกต่างกันแยกตามประเภทของสีที่ใช้ งาน โดยทั่วไปสีประกอบไปด้วยตัวทำละลาย (solvent) ประมาณ 60% สารยึด (binder) หรือสื่อนำสี (vehicle) 30% ผงสี (pigment) 7-8% และสารเติมแต่ง (additives) 2-3% โดยสีที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมประกอบไปด้วยโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของผงสี นอกจากนี้สารยึดและสารเติมแต่งยังสามารถก่อให้เกิดพิษซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสี [5]

สีสามารถจำแนกออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ ดังนี้

2.2.1 พงสี (Pigment) และเอกซ์เทนเดอร์ (Extender)

หน้าที่หลักของพลงสีและเอกซ์เทนเดอร์ในกระบวนการเคลือบสีคือ ทำให้เกิดสีและการเคลือบที่ดีขึ้น โดยในบางกรณีจะทำให้เกิดฟิล์มบางๆ ขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน โดยพลงสีและเอกซ์เทนเดอร์จะอยู่ในรูปผลึก (Crystalline) กระจายอยู่ในสี สำหรับพลงสีสามารถแบ่งออกเป็น inorganic, organic, organometallic และ metallic pigment ในอดีต พลงสีที่นิยมใช้จะมีส่วนประกอบของ titanium dioxide (TiO_2) โดยความแข็งแรงของสีขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของพลงสี ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.01 ไมโครเมตร ถึง 50 ไมโครเมตร พลงสีที่มีขนาดเหมาะสมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2-0.4 ไมโครเมตร ส่วนสำคัญที่สุดของอนุภาคพลงสีคือ พื้นผิวที่ซึ่งจะมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันหรือสารยึด หากหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของพลงสีเหล่านี้เข้าร่วมตัวกันเองก็จะทำให้อนุภาคของพลงสีจับตัวกันเป็นก้อน ด้านทานการเปียกและการกระจายตัวของพลงสี ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ‘การจับตัว (flocculation)’ พลงสีจะนิยมผสมเอกซ์เทนเดอร์ราคาถูกที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับพลงสี เช่น barium sulfide, calcium carbonate, หรือ kaolin extender เพื่อช่วยในการเพิ่มปริมาตรของพลงสี และยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ ดังนี้ [5]

- 1) เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางวิทยากระแสของสี ซึ่งโดยปกติเอกซ์เทนเดอร์จะเพิ่มความหนืดของสีและในกรณีนี้จะเรียกเอกซ์เทนเดอร์ว่า ทำหน้าที่เป็นสารทำให้ข้น (thickening agent)
- 2) เพื่อลดโอกาสการเกิดการนอนกัน หรือการจับตัวกันเป็นก้อนของแข็งของพลงสีอื่น
- 3) เพื่อปรับปรุงสมบัติการไหล และความสามารถในการเคลือบสี
- 4) เพื่อลดความเงาของฟิล์ม หรือเป็นสารลดความเงา (flattening agent)
- 5) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม และบางครั้งยังช่วยเสริมแรงให้กับฟิล์ม (สำหรับเอกซ์เทนเดอร์ที่มีอนุภาคแบบเข็มหรือแผ่นบางๆ)
- 6) เพื่อปรับปรุงความทนทานของฟิล์ม โดยป้องกันไม่ให้น้ำหรือแก๊สซึมผ่านไปได้ ซึ่งกรณีนี้เอกซ์เทนเดอร์จะต้องมีอนุภาคเป็นแผ่นบางๆ

ค่าความเข้มข้นของสีในการเคลือบจะระบุในรูปของ Pigment Volume Concentration (PVC) เนื่องจาก PVC เป็นค่าที่บอกถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของพลงสีต่อปริมาตรของสารยึด ดังนั้นถ้าค่า PVC สูงหมายความว่า ปริมาตรของสารยึดน้อยเมื่อเทียบกับพลงสี หรือปริมาตรพลงสีเพิ่มและปริมาตรสารยึดลดลง

PVC มีผลต่อสมบัติที่สำคัญหลายอย่างของสี ได้แก่ ความเงา ความคงทน และความทึบแสง นอกจากนี้ PVC ยังมีผลต่อสมบัติอื่นๆของสี คือ ความอ่อนตัวไม่เปราะ แข็งยึดกับผิวหน้า ความทนทานต่อการกระทบและสภาพให้ความชื้นซึมได้ แต่โดยทั่วไปแล้วการกำหนดค่า PVC จะพิจารณาจากสมบัติ ความเงา ความคงทนและความทึบแสง โดยทั่วไปแล้วสีที่มีค่า PVC ต่ำจะอ่อนตัวกว่า เงา กว่า ทำความสะอาด (washable) ได้ง่ายกว่าและทนทานกว่าสีที่มีค่า PVC สูงๆ สำหรับสารเคลือบผิวที่มีค่า PVC ต่ำ เรียกว่า ‘สารเคลือบ (enamel)’

สีที่มีค่า PVC สูงจะมีลักษณะเหมือนเนยมากขึ้น (more buttery) และทาได้ง่ายขึ้น ผงสีสีขาวที่ใช้ผงสีปิดบัง (hiding pigment) เช่น TiO_2 จะมีความสามารถในการปิดบังผิวมากขึ้นแต่เนื่องจากสีที่มีค่า PVC สูงนี้ มีอัตราส่วนของสารยึดน้อยจึงทำให้สีดังกล่าวไม่สามารถแทรกซึม (penetrate) เข้าไปในผิวหน้าที่เป็นรูพรุนได้ดีเหมือนกับสีที่มีค่า PVC ต่ำ ดังนั้นสีที่มีค่า PVC สูงๆ จะไม่สามารถนำไปใช้เป็นสีรองพื้นสำหรับทาปูนได้

ผงสีมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เล็กมากเนื่องมาจากการมีผิวหน้าที่ไม่สม่ำเสมออันเกิดมาจากการบด ถ้าเติมสารยึดลงไปในผงสีที่แห้งจนถึงจุดๆ หนึ่ง ซึ่งช่องว่างทั้งหมดระหว่างอนุภาคของผงสีถูกอุดตันไว้เต็มเรียกจุดๆ นี้ว่า ‘Critical Pigment Volume Concentration (CPVC)’ ที่จุดๆนี้ ถ้าเติมสารยึดเข้าไปอีกสารยึดส่วนที่เติมไปนี้เรียกว่า ‘free binder’ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเป็นสารยึดส่วนเกิน (excess of binder) เพราะไม่มีความจำเป็น ดังนั้น CPVC จึงหมายถึงจุดที่มีปริมาณของสารยึดมากเพียงพอที่จะทำให้ผงสีเปียกได้อย่างสมบูรณ์และช่องว่างทั้งหมดระหว่างอนุภาคของผงสีถูกอุดไว้ทั้งหมด สำหรับสีที่มีคุณภาพดี ควรมีค่า PVC อย่างน้อยที่สุดสูงหรือต่ำกว่าค่า CPVC ประมาณ 5% ซึ่งค่า PVC จะอยู่ช่วงไหนก็ขึ้นอยู่กับสมบัติที่ต้องการ

สำหรับสีที่ใช้ในเคลือบโลหะ จะมีความทนทานสูงสุดเมื่อมีค่า PVC เท่ากับ CPVC เพราะค่า CPVC มีความสมดุลที่เหมาะสมระหว่างผงสีและสารยึด ทำให้ไม่มีช่องว่างให้ความชื้นซึมผ่านเข้าไปทำลายโลหะได้ สำหรับสีรองพื้นที่ใช้กับสีทับหน้าแบบเคลือบเงา (enamel tapcoat) ควรมีค่า PVC น้อยกว่า CPVC เมื่อไม่ให้มีผงสีมากเกินไป เพราะผงสีส่วนเกินจะไปดูดซึมตัวทำลายหรือสารยึดจากสีทับหน้าได้ อันเป็นผลทำให้ความเงาของสีทับหน้าลดลงได้

ผงสีที่ใช้ในสีสูตรต่างๆมักเป็นสารพิษซึ่งประกอบไปด้วยพลวง (Antimony) แบเรียม (Barium) แคดเมียม (Cadmium) โครเมียม (Chromium) ในรูปของสารประกอบโครเมต และตะกั่ว (Lead)

ปัจจุบันสีที่มีโลหะหนักผสมกำลังจะถูกระงับไม่ให้ใช้งาน ตัวอย่างของผงสีที่ใช้งานทั่วไปแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างผงสีที่ใช้งานโดยทั่วไป [5]

	สารอนินทรีย์	สารอินทรีย์
สารจากธรรมชาติ	Silicon Dioxide Talc Clay Calcium Carbonate Iron Oxide	Madder Lodwood
สารสังเคราะห์	Titanium Dioxide Zinc Oxide Antimony Oxide Lead Sulfate Iron Oxides Red Lead Cadmium Red Lead Silicochromate Lead Chromates Zinc Chromates Cadmium Yellow Calcium Plumbate Chromium Oxide Prussian Blue (potassium ferric ferrocyanide) Ultramarine Blue (an aluminosilicate) Aluminum Metallics Zinc Metallics Lead Metallics	Toluidine Red Arylamide Red Hansa Yellow Benzidine Yellow Pigment Green B Phthalocyanine Blue Carbon Black

2.2.2 สารยึด (Binder)

สารยึดเป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่มีมวลโมเลกุลระหว่าง 500 ถึง 30,000 กรัมต่อโมลขึ้นไป ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลสูง เช่น Cellulose Nitrate, Polymer Acrylate, Vinyl Chloride Copolymer ซึ่งมีสมบัติด้านการสร้างแผ่นฟิล์มที่มีความแข็งแรง ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ เช่น Alkyd Resin, Phenolic Resins Polyisocyanate และ Epoxy Resin สารยึดพวกนี้จะต้องเปลี่ยนสภาพทางเคมีเป็น high molecular mass cross-linked macromolecules ภายหลังการใช้งานเพื่อให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีประสิทธิภาพ [5]

การเพิ่มมวลโมเลกุลของสารยึดในเนื้อฟิล์มของพอลิเมอร์จะเป็นการเพิ่มสมบัติด้านความยืดหยุ่น ความแข็งแรง และการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นแต่เนื้อฟิล์มที่ได้จะมีความหนืดเพิ่มขึ้น แต่การนำไปงานภายใต้ความหนืดที่สูงเกินไปได้ยากดังนั้นจึงต้องลดความหนืดซึ่งทำได้โดยการระเหยตัวทำละลายออกโดยการบ่มภายหลังจากกระบวนการเคลือบ ซึ่งจะทำให้ตัวทำละลายระเหยออกสู่บรรยากาศ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงควรใช้ตัวทำละลายชนิดอื่นที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมหรือใช้สารยึดที่มีมวลโมเลกุลต่ำ

ในปัจจุบันสารยึดส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบของเรซินจำพวก alkyd หรือ epoxy resin โดยเรซินจากธรรมชาติที่ใช้กันอยู่ทั่วไปคือชันสน (rosin) ที่มีการปรับปรุงพัฒนาสมบัติทางเคมีจนได้สมบัติตามที่ต้องการ ในการสังเคราะห์เรซินแข็งจะใช้ cyclohexanone, acetophenone, หรือ aldehyde เป็นสารตั้งต้น สารยึดเรซินแข็งจะเพิ่มการเร่งแห้งและเพิ่มความแข็งแรงของพื้นผิว การเกาะติดและความมันเงาม ตัวอย่างของสารยึด ได้แก่ น้ำมันแห้งเร็ว (drying oil) เรซินธรรมชาติและเรซินสังเคราะห์ที่ใช้ในงานในสีสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของสารยึดประเภทต่างๆ [6]

น้ำมันวาร์นิช (Oleoresinous)	เรซินธรรมชาติ (Natural Resins)	เรซินสังเคราะห์ (Synthesis Resins)
Linseed Oil	Limed Rosin	Alkyd Resins
Tung Oil	Ester gum	Amino Resins
Oiticica Oil	Maleic resins	Vinyl Resins
		Acrylic Resins
		Epoxy Resins
		Polyurethane Resins
		Chlorinated Rubber
		Cellulosic Polymers
		Phenolic Resins

สารยึดที่ใช้ในปัจจุบันส่วนมากจะเป็นสารยึดที่ทำมาจากเรซินสังเคราะห์ เนื่องจากสามารถพิจารณาสมบัติของสารยึดในทั้งด้านกายภาพและเคมีเพื่อกำหนดประเภทของพื้นผิวที่ใช้งานและสภาพแวดล้อมได้ ตารางที่ 2.3 แสดงถึงสมบัติของเรซินสังเคราะห์บางชนิด จะพบว่ากรณีที่ต้องการเคลือบพื้นผิวที่เป็นโลหะโดยต้องการทนทานต่อความร้อนและทนต่อตัวทำละลายรุนแรง จะเลือกใช้สีประเภท epoxy หรือต้องการเคลือบสียรถยนต์ที่เป็นเหล็กและต้องทนต่อสภาวะแวดล้อมตลอดเวลา อีกทั้งยังต้องทนต่อน้ำและสีไม่ซีด สีที่เหมาะสมเป็นสีประเภท Polyurethane เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 การใช้เรซินสังเคราะห์สำหรับสภาพสิ่งแวดล้อมหรือสำหรับการเคลือบผิววัสดุต่างๆ [5]

สมบัติสภาพสิ่งแวดล้อมหรือ ผิววัสดุ	เรซินสังเคราะห์					
	Alkyd	Vinyl	Epoxy	Phenolic	Rubber	Polyurethane
ไม้	G	NR	G	G	NR	G
คอนกรีต	NR	VG	VG	NR	VG	G
โลหะ	VG	VG	VG	VG	G	G
ตกแต่งภายนอก						
● ชายทะเล	G	E	VG	VG	VG	VG
● เขตอุตสาหกรรม	F	E	E	VG	VG	VG
การขัดกับผิวหน้า	VG	F	E	G	G	G
ความแข็ง	G	G	VG	VG	VG	E
ความอ่อนตัวไม่เปราะ	G	E	E	G	G	VG
ความทนทานต่อการขีดสี	G	VG	VG	VG	G	E
ความคงทน	F	E	G	VG	VG	E
ความทนกรด	F	E	E	G	VG	VG
ความทนด่าง	F	E	E	VG	VG	VG
ความทนผงซักฟอก	G	P	G	G	VG	G
ความทนทานต่อความร้อน	F	F	E	VG	F	E
ความทนตัวทำละลายรุนแรง	G	E	G	E	VG	VG
ความทนน้ำ, ความทนทานต่อ การเปลี่ยนสีหรือทำให้สีซีดลง (fade resistance)	VG	E	G	G	G	F
ความทนทานต่อการเกิดเป็นฝุ่น (chalk)	G	E	F	G	G	F

*Key: E = Excellent, outstanding

VG = Very Good

G = Good or Average

F = Fair

P = Poor

NR= Not Recommend

2.2.3 ตัวทำละลาย (Solvent)

เป็นสารประกอบที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง โดยส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเคลือบจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือวงแหวน เช่น เอสเตอร์ของกรดอะซิติก ไกลคอลอีเทอร์ แอลกอฮอล์ และอีโตนบางตัว ตัวทำละลายจะละลายของแข็งและสารยึดที่หนืดมากๆ โดยจะลดความเข้ากันไม่ได้ของสี ผงสีและสารยึดในการกระจายตัวเพื่อให้มีความหนืดและความเสถียรที่เหมาะสมในการเคลือบ การใช้อากาศพ่นของเหลวในการเคลือบจะเป็นการควบคุมทิศทางที่เหมาะสมและเพิ่มความสามารถในการเคลือบให้ได้ความหนาของฟิล์มที่เท่ากัน หลังจากการเคลือบตัวทำละลายควรจะระเหยออกไปให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้เกิดฟิล์ม ในขั้นตอนการระเหยตัวทำละลาย เครื่องมือในระบบกำจัดไอระเหยเป็นสิ่งจำเป็นมากสามารถทำได้โดยการใช้เตาอบที่ติดตั้งระบบการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ซึ่งจะป้องกันตัวทำละลายระเหยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ วิธีป้องกันอื่นๆ เช่น การหาตัวทำละลายชนิดใหม่ที่มีอัตราการระเหยและมีความเป็นพิษต่ำ เทคนิคการเคลือบแบบปราศจากตัวทำละลาย เช่น สีที่มีของแข็งความหนาแน่นสูง (high-solids paint) การเคลือบโดยใช้สีที่มีตัวทำละลายน้ำ (waterborne coatings) และการเคลือบโดยใช้สีที่เป็นผง (powder coatings) ในระหว่างกระบวนการผลิตสีจะมีสารระเหยอยู่ในสื่อน้อยมากเมื่อเทียบกับกระบวนการทำให้สีแห้งด้วยการอบ [5] Clean Air Act Amendment (CAAA) ปี 1990 ระบุให้มีการลดการใช้งานสารระเหยอินทรีย์เพราะจะมีผลต่อการทำลายชั้นโอโซน โดย CAAA ได้ระบุสารบางชนิดที่ทำลายชั้นโอโซน เช่น 1,1,1-trichloroethane (TCE) [7, 8] และตัวอย่างตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดที่ใช้งานในปัจจุบันแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวทำละลายทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมสี [8]

ตัวทำละลาย	จุดวาบไฟ (°F)	ความเป็นพิษ ^a	RCRA Hazardous ^b	ความเป็นพิษในอุตสาหกรรม ^c	ความเป็นพิษในอากาศ ^d
สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเส้นตรง:	104	ไม่ได้ระบุ	O	✓	✓
Mineral Spirits					
สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวง:					
Toluene	43	5	O	O	O
Xylene	78	5	O	O	O
เอสเทอร์:					
Ethyl Acetate	24	11	O	✓	✓
Butyl Acetate	72	14	O	✓	✓
คีโตน:					
Acetone	0	9.75	O	✓	✓
Methyl Isobutyl Ketone	73	2.08	O	O	O
Methyl Ethyl Ketone	22	3.4	O	O	O
ไกลคอลอีเทอร์:					
Ethyl Glycol Monoethyl Ether	202	3	✓	✓	✓
แอลกอฮอล์:					
Ethyl Alcohol	55	6	O	✓	✓
Butyl Alcohol	<100	0.79	O	✓	✓

Key: O = No, ✓ = Yes

^aความเป็นพิษ, LD50(oral), กรัมของวัสดุมีพิษต่อกิโลกรัมน้ำหนักร่างกายมนุษย์

^bResource Conservation and Recovery Act (RCRA)

^cToxic Release Inventory (TRI) targeted by USEPA for reduction due to toxicity and large quantities released (1989)

^dUnder the Clean Air Act amendments (1990)

2.2.4 สารเติมแต่ง (Additives)

สารเติมแต่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เติมลงไปในสีเพื่อเพิ่มความสามารถต่างๆในการเคลือบของสี และเนื้อฟิล์มโดยเติมในปริมาณเล็กน้อย สารเติมแต่งของสีอาจจะมีชื่อเรียกที่หลากหลายตามความสามารถของสารเติมแต่งนั้นๆ เช่น [5]

1. สารปรับเนื้อสีให้มีความสม่ำเสมอ (Leveling Agent)

สารปรับเนื้อสีให้มีความสม่ำเสมอเป็นสารที่ช่วยให้การจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและมีพื้นผิวที่เรียบเมื่อสีแห้ง สามารถเข้ากันได้กับตัวทำละลายที่มีจุดเดือดสูงจำพวกบิวทิลเอทิลเทอร์ของสารประกอบ ethylene glycol, propylene glycol, และ cyclohexanone และ alkylated cyclohexanone หรือในบางกรณีอาจจะใช้กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นเส้นตรง (Aliphatic Hydrocarbon) หรือวงแหวน (Aromatic Hydrocarbon)

2. สารลดความหนืด (Flow agents)

สารลดความหนืดใช้ทำหน้าที่ลดความหนืดของสีระหว่างการทำให้แห้ง ประสิทธิภาพของ flow agents ขึ้นอยู่กับประเภทของสารยัดและการทำให้แห้งหรืออุณหภูมิที่สีแข็งตัว

3. สารเร่งการเกิดเนื้อฟิล์ม (Film-formation promoters)

สารเร่งการเกิดเนื้อฟิล์มเป็นสารช่วยลดอุณหภูมิพื้นผิวในขณะฟิล์มกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบจากการแพร่ ซึ่งทำให้พื้นผิวเรียบไม่มีฟองอากาศ ใช้กับสารประกอบที่มีจุดเดือดสูงของ glycol ether และ glycol ether ester

4. สารทำให้เปียก (Wetting Agents) สารช่วยในการกระจายตัว (Dispersings Agents) และ สารป้องกันการตกตะกอน (Antisetting Agents)

สารเติมแต่งในการเคลือบกลุ่มใหญ่ที่สุดส่วนใหญ่จะเป็นสารทำให้เปียก (Wetting agents) โดยเป็นสารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยลดฟองของผงสีจากสารยึดและป้องกันการเกิดการลอยตัวของอนุภาคผงสี โดยจะช่วยให้เกิดการเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ทำให้ฟิล์มเกิดความใสมันเงาสูง และในกลุ่มของสารช่วยกระจายตัวจะช่วยให้ผงสีกระจายอย่างสม่ำเสมอในสีเพื่อป้องกันการตกตะกอนของอนุภาคที่มีน้ำหนักมากของผงสี และการเปียกที่ดีจะต้องมีสมบัติคล้ายพลาสติก (pseudoplasticity) อยู่บ้าง สารป้องกันการตกตะกอน (antisetting agents) จะมีลักษณะคล้ายกับสารช่วยกระจายตัว

5. สารลดการเกิดฟอง (Antifoaming agents)

สารลดการเกิดฟองมักถูกใช้ในการป้องกันการเกิดฟองอากาศระหว่างกระบวนการผลิตสีและการนำไปใช้งาน เพื่อป้องกันฟองอากาศจากการเคลือบระหว่างทำให้แห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ เช่น fatty acid esters, metallic soaps, mineral oils, waxes, silicone oils, และ siloxanes บางครั้งใช้การรวมตัวของ emulsifier กับสาร-ประกอบ hydrophobic silicas

6. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มลงไปนสีเพื่อเพิ่มอัตราการระเหยและทำให้สีแข็งตัวเร็วขึ้น โดยมีสมบัติของสารเร่งแห้ง (drying agents) ใช้ในกรณีของการทำให้สารยึดแห้งโดยอากาศ รวมถึงเรซินบางประเภทพวก alkyd หรือ unsaturated oils เร่งการสลายตัวของ peroxide และ hydroperoxides จากกระบวนการทำให้แห้งโดยทำให้เกิด radical polymerization ของสารยึดในตำแหน่งที่กำหนด ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการเร่งการเกิด cross-linking ของสารยึดที่อุณหภูมิห้อง สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะที่เป็นกรดได้แก่ melamine resin, free acid และเกลือ ammonium ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาในเบสได้แก่ isocyanate, tertiary amines และ dibutyltin dilaurate

7. สารป้องกันการลอยตัว (Antifloating หรือ antiflooding agents)

สารป้องกันการลอยตัวป้องกันการแตกแยกของผงสีในแนวตั้งและแนวนอนจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันและสมบัติของพื้นผิวหน้า เพื่อป้องกันสีและความเงาที่ไม่สม่ำเสมอของเนื้อฟิล์ม ซึ่งจะ เป็นสาเหตุของจุดเสียที่เกิดขึ้น

8. สารลดการหดตัวของเนื้อฟิล์ม (Antiskinning agents)

สารลดการหดตัวของเนื้อฟิล์มเพิ่มลงไปในส่วนที่แห้งด้วยอากาศเพื่อป้องกันการเกิดรอยเสียที่ผิวหน้า จากการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบ โดยมีสาเหตุจากออกซิเจนในบรรยากาศ โดยเมื่อเติมสารลงไปจะทำให้เกิดการแห้งและจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและป้องกันการหดตัว สารชนิดนี้ส่วนมากเป็นสาร antioxidant พวก oximes ที่จะระเหยออกจากสารละลายระหว่างกระบวนการทำให้แห้ง

9. สารปรับสภาพให้มีความเป็นกลาง (Neutralizing agents)

สารปรับสภาพให้มีความเป็นกลางใช้ในสีน้ำ (waterborne paint) เพื่อปรับสภาพของสารยึดให้เป็น กลางและปรับเสถียรผลิตภัณฑ์ ใช้สารประเภทแอมโมเนียและ alkylated aminoalcohols โดยขึ้นอยู่กับ ประเภของสารยึดและวิธีการใช้งาน ในการทำให้แข็งสารเอมีนจะระเหยไปพร้อมกับน้ำ

10. สารเพิ่มความหนืด (Thickening agents)

สารเพิ่มความหนืดควบคุมสมบัติของการไหลของสีประเภทต่างๆ โดยแบ่งเป็น inorganic (ส่วนใหญ่ เป็น Silicates), Organometallic (Titanium และ Zirconium chelates), Naturally occurring organic (ส่วนใหญ่เป็น Cellulose ethers) และสารอินทรีย์สังเคราะห์ (Polyacrylates, Polyvinylpyrrolidone, Polyurethanes)

11. สารกันบูด (Preservatives, Biocides, Fungicides)

สารกันบูดสารที่เติมลงไปในส่วนประกอบของน้ำเป็นตัวทำลาย ใช้ในการยับยั้งหรือป้องกันการเจริญเติบโตหรือทำลายเชื้อรา และแบคทีเรีย ที่อาจจะเกิดขึ้นภายหลังการใช้งาน

12. สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitor)

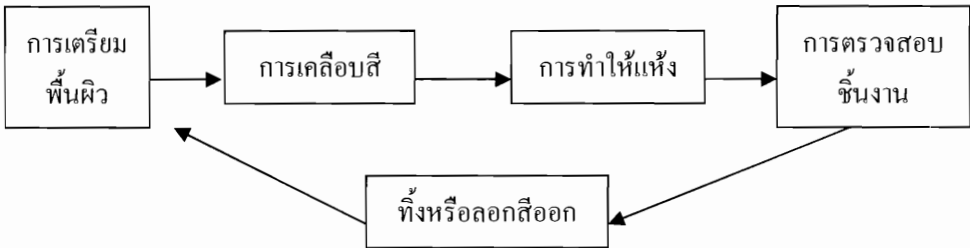
สารป้องกันการกัดกร่อนใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทนต่อการกัดกร่อน เช่น เมื่อเคลือบสีน้ำมันบนพื้นผิวที่เป็นโลหะจะทำให้เกิดสนิม โดยจะใส่เกลือที่สามารถเกิดออกซิเดชันได้พวก Chromate, Metaborates, Nitrite, และNitrates; Organic amines หรือ Sulfur-containing products; และ Organic salts (benzoates, naphthenates, octoates)

2.3 กระบวนการเคลือบผิว

การเคลือบบนพื้นผิวโลหะสามารถแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน คือ

- 1. การเตรียมพื้นผิว(Surface preparation)
- 2. การเคลือบสี (Paint application)
- 3. กระบวนการทำให้แห้ง (Drying process)

โดยกระบวนการเคลือบผิวจะมีกระบวนการตามลำดับดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการเคลือบผิวโดยทั่วไป

2.3.1 การเตรียมพื้นผิว (Surface Preparation)

ในทุกขั้นตอนของการเคลือบผิวสามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพของผิววัสดุ หากขาดการเตรียมพื้นผิวที่ดีย่อมทำให้การเคลือบผิวเป็นไปได้อย่างไม่สมบูรณ์ โดยอัตราการเคลือบผิวที่ไม่สมบูรณ์สูงถึง 80% หรือมากกว่านั้นเกิดจากการเตรียมพื้นผิวที่ไม่เหมาะสม สิ่งที่เกิดกัดผิวก่อนการเตรียมพื้นผิวโดยทั่วไปส่วนมากคือ คราบน้ำมันและสนิมต่างๆ โดยคราบน้ำมันนั้นอาจจะมาจากกระบวนการเก็บชั่วคราวหรือขนส่งสินค้า สิ่งปนเปื้อนอื่นๆ โดยทั่วไปได้แก่ เศษผง การกัดกร่อน ความร้อน สนิม และ

อื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 แต่บางกรณีที่วัสดุคืบมีสีเก่าลงเหลืออยู่จะต้องถูกลอกสีออกก่อนที่จะไปเคลือบสีใหม่ ในอดีตตัวทำละลายที่นิยมใช้คือสารในกลุ่ม Halogenated ซึ่งจัดว่าเป็นสารเคมีอันตรายและเป็นสารอินทรีย์ระเหยได้

ตารางที่ 2.5 สิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิววัสดุ [5]

น้ำมันหล่อลื่น	น้ำมันป้องกันการกัดกร่อน	ฟลักซ์ (จากกระบวนการหลอม)
Mineral oil Product Metallic Soaps Graphite Molybdenum disulfide	Petroleum sulfonate สารยับยั้ง ผลิตภัณฑ์น้ำมันธรรมชาติ	เกลืออินทรีย์
สารเคลือบเงา	รอยตำหนิ โคนกัดกร่อน	สารปนเปื้อนอื่น
น้ำมันธรรมชาติ แว็กซ์	ออกไซด์ของเหล็ก(สนิม) ขี้เกลือจากโลหะ	ขี้เถ้า Slag(จากงานกลึง)
อื่นๆ	สิ่งปนเปื้อนทั่วไป	
ร่องรอยจากนิ้วมือหรือรอยจากมือจับ ชั้นฟิล์มบางๆที่เกิดจากก๊าซ (Absorbed gas films) รอยเคลือบเก่าหรือสีที่ไม่ต้องการ ความชื้น	ฝุ่น	

นอกจากนี้การเตรียมพื้นผิวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเกาะติดผิว ป้องกันการกัดกร่อน เพิ่มความทนความร้อน สำหรับงานเคลือบผิวโดยทั่วไปจะใช้วิธีการเตรียมพื้นผิวด้วยวิธี Phosphating, Chromating และAnodizing เช่น การทำ Electrochemical Deposition ของการเคลือบออกไซด์บางครั้งอาจจะถูกนำมาใช้กับพื้นผิวอลูมิเนียม ในกระบวนการเตรียมพื้นผิวแบบ Phosphating จะใช้กรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยากับพื้นผิวโลหะเพื่อทำให้พื้นผิวโลหะเกิดการจัดเรียงตัวแบบ Microcrystalline layer ซึ่งสามารถเพิ่มการยึดติดของสีบนพื้นผิวงาน การเตรียมพื้นผิวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ การเตรียมพื้นผิวที่ไม่ได้เคลือบสีมาก่อน และการเตรียมพื้นผิวที่ผ่านการเคลือบสีมาแล้วโดยการลอกสี

2.3.1.1 การทำความสะอาดพื้นผิวก่อนการเคลือบสี

ในกระบวนการเคลือบสีเพื่อให้ได้คุณภาพดีนั้นปัจจัยหลักในการเตรียมพื้นผิวที่ดีพื้นผิวจะต้องมีความสะอาดและไม่มีสิ่งเดิมอยู่บนพื้นผิว ดังนั้นในขั้นตอนแรกของการเตรียมพื้นผิวจะเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันหรือสนิมออกจากพื้นผิว รวมถึงสิ่งเดิมที่อยู่บนพื้นผิวโลหะ โดยการทำทำความสะอาดพื้นผิวแบ่งออกเป็น การทำความสะอาดทางกายภาพ และการทำความสะอาดโดยวิธีสารเคมี

2.3.1.1.1 การทำความสะอาดทางกายภาพ (Physical Abrasive)

การทำความสะอาดพื้นผิวโดยวิธีเชิงกลคือ การใช้เครื่องมือต่างๆ ทำความสะอาดพื้นผิวโดยไม่เกิดปฏิกิริยากับพื้นผิว โดยสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว เช่น สนิม ฝุ่น เศษสีที่หลงเหลืออยู่บนพื้นผิว โดยใช้กระบวนการขัดผิวด้วยวัสดุต่างๆบนพื้นผิวเพื่อลอกพื้นผิวหน้าออกมาพร้อมกับสิ่งปนเปื้อนหรือใช้ความร้อนสูงในการเปลี่ยนสภาพของสิ่งปนเปื้อนให้มีการยึดติดผิวต่ำลง ซึ่งข้อเสียของวิธีการทำความสะอาดโดยวิธีเชิงกลคือ การสูญเสียพื้นผิวหน้าบางส่วนหรือทำความสะอาดไม่ทั่วถึงและไม่สามารถใช้กับพื้นผิวบางชนิดได้ แต่ข้อดีคือไม่มีการใช้สารเคมี ดังนั้นจึงไม่มีมลภาวะจากสารเคมี และของเสียอันตรายจากการทำความสะอาด ตัวอย่างของการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยวิธีทางเชิงกลมีหลายวิธีดังนี้

1) การทำความสะอาดพื้นผิวโดยใช้เครื่องมือพ่นอัด (Abrasive blasting techniques)

การทำความสะอาดพื้นผิวโดยใช้เครื่องมือพ่นอัดเป็นกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวโดยใช้เครื่องมือเชิงกลโดยการใช้เครื่องพ่นอัดตัวกลางไปกระทบพื้นผิววัสดุ โดยกลไกการทำความสะอาดเกิดจากการขัดถูของตัวกลางกับสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว สิ่งสกปรกต่างๆบนพื้นผิวถูกกำจัดออกจากพื้นผิวพร้อมกับตัวกลาง และตัวกลางบางชนิดที่หลุดออกมาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการทำความสะอาดบริเวณที่มีพื้นที่มาก นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังสามารถใช้ทำความสะอาดพื้นผิวที่ผ่านการเคลือบสี ตัวอย่างการทำความสะอาดพื้นผิวโดยใช้เทคนิคนี้ เช่น การล้างคราบสนิมออกจากเครื่องยนต์ การล้างสีออกจากโซ่ที่ทำเรือ การลอกสีเก่าออกจากล้อแม็กซ์รถยนต์ [9] ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 (ก) ภาพถ่ายของช่วงล่างรถยนต์ ก่อนและหลังทำการพ่นทราย

(ข) ภาพถ่ายของล้อแม็กซ์ที่จะทำการลอกสีก่อนและหลังทำการพ่นทราย

ตัวกลางที่ใช้ในการลอกสีนั้นมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่ใช้และราคาของตัวกลาง ส่วนมากเครื่องอัดตัวกลางเครื่องหนึ่งสามารถใช้งานได้หลากหลายตัวกลาง ตัวอย่างของตัวกลางมีดังนี้

- ทราย เป็นตัวกลางที่นิยมใช้ในงานหนัก เช่น สะพาน เรือ สิ่งก่อสร้าง เมื่อทำการลอกออกจะทำให้ผงสี สีรองพื้น หลุดออกมาพร้อมกับตัวกลาง และไม่สร้างมลพิษทางอากาศ
- พลาสติกชิ้นเล็กๆ เป็นตัวกลางที่ใช้ลอกสีที่มีความทนทานจากชิ้นส่วนโลหะ เช่น เครื่องบิน หรือ ยานพาหนะในการทหาร ตัวกลางพลาสติกจะมีอัตราการลอกสี 0.15 ตารางฟุตต่ออนาที เมื่อใช้ตัวกลางที่มีความแข็งเพิ่มขึ้นและใช้แรงดันมากขึ้นจะเพิ่มอัตราการลอกสีให้สูงขึ้น แต่อาจจะเป็นอันตรายกับพื้นผิววัสดุ

- แป้งสาธิต เป็นตัวกลางชนิดใหม่ที่ใช้ในการลอกสีออก เกิดขึ้นจากการนำแป้งสาธิตมาผ่านกระบวนการและตกตะกอนให้อยู่ในรูปของแข็งและนำมาทำให้แตกหัก คล้ายๆ ทราาย ซึ่งมีสมบัติที่แหลมคมมากและสามารถใช้ลอกสีออกได้ มีสมบัติในการลอกสีโดยทำลายพื้นผิววัสดุน้อยมาก ดังนั้นจึงเหมาะกับพื้นผิวเช่นพลาสติก
- น้ำแข็งแห้ง เหมาะกับการลอกสีที่มีพื้นที่ไม่มาก น้ำแข็งแห้งสามารถลอกสีออกได้และเมื่อลอกออก สิ่งที่เหลือคือ ผงสี ส่วนที่เหลือจะระเหยกกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- ตัวกลางอื่นๆ เช่น โซดาซักผ้า(sodium bicarbonate) หรือใช้น้ำแรงดันสูงเป็นต้น

2) การลอกสีด้วยการใช้กระดาษทรายหรือใช้เครื่องมือขูดลอก

การใช้กระดาษทรายในการลอกสีเป็นวิธีที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ เนื่องจากการขูดด้วยวัสดุที่แหลมคมหรือใช้กระดาษทรายลอกออก แต่วิธีนี้อาจจะทำให้พื้นผิววัสดุมีการสึกหรอและได้พื้นผิวที่ไม่เรียบสม่ำเสมอ

3) การใช้สุญญากาศ (Vacuum De-oiling)

การใช้สุญญากาศทำได้โดยใช้เตาหลอมสุญญากาศ และให้ความร้อนจนน้ำมันระเหยกกลายเป็นไอออกจากชิ้นงาน โดยเตาหลอมสุญญากาศสามารถประยุกต์ใช้งานกับชิ้นส่วนโลหะได้ และยังสามารถใช้กำจัดน้ำมันออกจากชิ้นส่วนที่ไม่เป็นโลหะได้อีกด้วย ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงแต่ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ ข้อจำกัดคือชิ้นส่วนจะต้องทนต่อแรงดันและอุณหภูมิที่สูง [10]

4) การใช้แสงเลเซอร์ (Laser Ablation)

การใช้แสงเลเซอร์นี้จะใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงให้ความร้อนอย่างทันทีโดยแสงเลเซอร์จะถูกยิงไปยังบริเวณที่ต้องการทำความสะอาด วิธีนี้ไม่ต้องใช้สารเคมีใดๆทั้งสิ้นและก่อให้เกิดสารพิษน้อยมาก นิยมใช้ในการลอกชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมาก (sub-micron) เช่น thin fluid films ออกจากสารกึ่งตัวนำ [11]

5) การทำความสะอาดโดยใช้ของไหลวิกฤติ (Supercritical Fluid Cleaning)

การทำความสะอาดโดยใช้ของไหลวิกฤติจะเป็นการใช้ของไหลที่อุณหภูมิและความดันอยู่ในช่วงวิกฤติ (critical point) เพื่อนำสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงาน คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นของไหลที่

นิยมใช้งานในวิธีนี้มากเพราะใช้งานได้หลากหลายและไม่เป็นพิษ Supercritical fluid cleaning สามารถใช้งานได้ดีกับเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ทองแดง (copper) เงิน (silver) โลหะที่มีรูพรุน (porous metals) และซิลิกา (silica) ซึ่งวิธีนี้จะไม่มีตัวทำละลายหลงเหลือหลังจากทำความสะอาด แต่ค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือสูงมาก ในปัจจุบันวิธีนี้ยังคงมีการใช้ในการทำความสะอาดชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำในการทำทำความสะอาดสูง [10]

2.3.1.1.2 การทำความสะอาดโดยวิธีทางเคมี (Chemical - Assisted Cleaning)

เป็นการใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาหรือละลายสิ่งปนเปื้อนออกจากพื้นผิววัสดุโดยไม่ทำอันตรายต่อพื้นผิววัสดุ และยังสามารถปรับสภาพทางพื้นผิวหลังจากกระบวนการทำความสะอาด เพื่อให้เหมาะกับการเคลือบผิวได้ โดยแบ่งออกเป็น

1) การเตรียมพื้นผิวโดยการใช้สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรด

การเตรียมพื้นผิวโดยการใช้สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดเตรียมได้โดยการใช้กรดทำปฏิกิริยากับสารที่อยู่บนพื้นผิวหรือปรับสภาพพื้นผิวให้มีสภาพตามที่ต้องการ สามารถใช้งานลอกรอยดำหนิและโลหะออกไซด์ กรดซัลฟิวริกใช้งานเกี่ยวกับโลหะและสังกะสี สำหรับกรดไนตริก กรดไนตริก-กรดไฮโดรฟลูออริก หรือกรดซัลฟิวริก-กรดไฮโดรฟลูออริกใช้กับโลหะประเภทอลูมิเนียม การใช้กรดฟอสฟอริกจะให้ผลดีกว่าแต่มีข้อดีคือสามารถกำจัดชั้นบางๆที่เกิดจากกระบวนการของฟอสเฟตได้ โดยจะมีการป้องกันการกัดกร่อนชั่วคราวเพื่อรองรับการเคลือบในขั้นต่อไป ในทางกลับกันกรดซัลฟิวริกจะมีความดันไอที่ต่ำกว่า ดังนั้นจะมีการสูญเสียกรดต่ำและมลภาวะทางอากาศน้อยกว่า แต่ในปัจจุบันนิยมใช้กรดไฮโดรคลอริกมากกว่าเนื่องจากมีการทำความสะอาดที่ดีกว่า บางครั้งอาจจะเติมสาร antioxidant เพื่อป้องกันการเกิดการออกซิไดซ์และเป็นการลดการละลายกรณีที่วัสดุมีสมบัติของเบส [5]

2) การขจัดคราบไขมันโดยใช้น้ำและสารซักล้าง (Aqueous Cleaning)

การใช้ aqueous cleaning เป็นการใช้นำทำละลายซึ่งประกอบไปด้วยน้ำ สารซักล้าง และสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือด่างทดแทนการใช้น้ำทำละลายโดยทั่วไป aqueous cleaning จะประกอบไปด้วยน้ำอย่างน้อย 95% วิธีการใช้น้ำเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้น้ำทำละลายและสามารถ

ประยุกต์ใช้งานในการทำความสะอาดได้หลากหลาย [10] โดย aqueous cleaning จะเป็นกลไกการทำ ความสะอาดโดยใช้การฟ่น การจุ่มหรือบางครั้งใช้ทั้งสองวิธีขึ้นอยู่กับชิ้นงาน ตัวทำละลายบางชนิด จำเพาะเจาะจงกับสิ่งปนเปื้อนและประเภทของเครื่องมือที่ใช้ การเพิ่มอุณหภูมิของตัวทำละลายจะช่วย เพิ่มประสิทธิภาพในการล้างคราบไขมัน อย่างไรก็ตามตัวทำละลายที่มีอุณหภูมิสูงจะประกอบไปด้วย สิ่งปนเปื้อนที่จะทำให้การแยกออกสามารถทำได้ยาก [12]

ข้อเสียของ aqueous cleaning คืออัตราการใช้น้ำในปริมาณมากและก่อให้เกิดน้ำเสียโดยเฉพาะกรดที่ ใช้ใน aqueous cleaning จะก่อให้เกิด hydrogen embrittlement ทำให้ความแข็งแรงของผิวโลหะลดลง เมื่อล้างเสร็จสิ้นชิ้นส่วนที่เป็นโลหะจะต้องทำให้แห้งอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันสนิมที่อาจจะเกิดขึ้น จากน้ำที่ยังหลงเหลือ

3) การขจัดคราบไขมันโดยใช้ไอระเหย (Solvent Vapor Degreasing)

การขจัดคราบไขมันโดยใช้ไอระเหยเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้ทำความสะอาดชิ้นส่วนโลหะเป็นส่วนใหญ่ซึ่ง วิธีนี้จะใช้ตัวทำละลายชนิด halogenated solvents ชิ้นส่วนจะแขวนอยู่บนถังบรรจุตัวทำละลาย โดยตัว ทำละลายจะถูกให้ความร้อนจนถึงจุดเดือดและกลายเป็นไอลอยอยู่บนชิ้นส่วนโลหะและละลายสิ่ง ปนเปื้อนออก และกลั่นไอลงในถังพร้อมกับสิ่งปนเปื้อน อย่างไรก็ตามสิ่งปนเปื้อนมักจะมี จุดเดือดที่สูงกว่าตัวทำละลาย กระบวนการทำความสะอาดจะเสร็จสิ้นเมื่อชิ้นส่วนมีอุณหภูมิเท่ากับไอ ระเหยของตัวทำละลาย และไม่สามารถกลั่นลงมาได้อีก [13]

เนื่องจากกระบวนการนี้แตกต่างจากการทำความสะอาดด้วยน้ำ ไอลของตัวทำละลายจะระเหยออกจาก ชิ้นส่วนโดยไม่ต้องทำให้แห้ง อย่างไรก็ตามตัวทำละลายจำพวกไตรคลอโรอีเทน เมื่อระเหยออกจะ กลายเป็นไอระเหยที่มีความเป็นพิษซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของ Hazardous Air Pollutants (HAPs) และสาร ทำลายชั้น โอโซน (Ozone Depleting Substances) [14]

4) การทำความสะอาดคราบไขมันด้วยตัวทำละลายที่มีสถานะของเหลว (Degreasing with Liquid Solvents) หรือการทำความสะอาดเย็น (Cold Cleaning) [15]

วิธีนี้ตัวทำละลายจะอยู่ในสถานะของเหลวมากกว่าสถานะไอ ตัวทำละลายทั่วไปที่ใช้คือ methyl isobutyl ketone (MIBK), methyl ethyl ketone (MEK), หรือ 1,1,1 trichloroethane (TCE) ข้อดีคือตัว ทำละลายสามารถใช้ทำความสะอาดชิ้นส่วนโดยการใช้ฟ่น การทาด้วยผ้า หรือจุ่มชิ้นส่วนลงในตัวทำ

ละลาย นิยมใช้ทำความสะอาดชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างซับซ้อน ประหยัดค่าใช้จ่าย ใช้พื้นที่ไม่มาก สารเคมียังสามารถกลั่นและรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ข้อจำกัดของ cold solvent cleaning อยู่ที่ยังการกำจัดไอระเหยของตัวทำละลายซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ ตัวทำละลายบางชนิดอาจจะทิ้งสิ่งตกค้างซึ่งอาจจะลดประสิทธิภาพของการยึดติดของสารเคลือบและตัวทำละลายที่มีจุดวาบไฟต่ำอาจจะลุกติดไฟ

ในการลดการปล่อยไอระเหยออกสู่สิ่งแวดล้อม กระบวนการทำความสะอาดควรจะทำในบริเวณที่เป็นระบบปิด ในกรณีที่ตัวทำละลายที่ใช้มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ และไม่ละลายในน้ำ การใช้ม่านน้ำจะช่วยทำหน้าที่เป็น vapor barrier การเติมตัวทำละลายควรเติมในปั๊มที่เป็นระบบปิด และปัญหาของตัวทำละลายที่มีความเป็นพิษสามารถลดได้เมื่อใช้ตัวทำละลายทดแทนที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือควบคุมไอระเหยที่มีพิษในระบบปิด

การทำความสะอาดคราบไขมัน (degreaser) และสนิมออกจากพื้นผิววัสดุนั้นควรเลือกวิธีที่เหมาะสมกับพื้นผิววัสดุต่างๆและพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุน เนื่องจากงานที่มีขนาดเล็กแต่การลงทุนสูงย่อมมีค่าใช้จ่ายต่อชิ้นงานสูง แต่บางครั้งชิ้นงานบางชิ้นที่มีมูลค่าสูงหรือมีต้นทุนสูงจะต้องมีระบบการทำงานที่ดีเพื่อลดอัตราการเกิดของเสียและยังลดการใช้วัตถุดิบโดยไม่จำเป็น จากตารางที่ 2.6 เป็นการสรุปการทำความสะอาดพื้นผิว ข้อดีและข้อจำกัดในการเลือกใช้กลไกทำความสะอาดชิ้นงานแต่ละประเภท

ตารางที่ 2.6 เทคโนโลยีในการทำความสะอาดพื้นผิวประเภทต่างๆ [16-20]

เทคโนโลยี	การใช้งาน	ข้อได้เปรียบในการลดของเสียที่แหล่งกำเนิด	จุดเด่น	ข้อจำกัด
Aqueous Cleaning	ใช้กับชิ้นงานและสิ่งปนเปื้อน	ลดการใช้ตัวทำละลายอันตราย	ประสิทธิภาพเพิ่มเมื่อเพิ่มความเข้มข้น	มีปริมาณน้ำเสียปริมาณมาก กรดบางชนิดอาจเกิดการกัดกร่อน
Supercritical Fluids	สามารถใช้งานได้ดีกับพื้นผิวโลหะหลาย	ไม่มีปัญหามลพิษจากสารเคมี	ไม่มีสารเคมีหลงเหลือบนชิ้นงาน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ	ค่าใช้จ่ายของเครื่องมือสูง
Vacuum De-oiling	กำจัดน้ำมันบนพื้นผิว	ไม่มีการใช้สารเคมีในการทำความสะอาด	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ	ชิ้นส่วนต้องทนทานต่อความร้อนและแรงดัน ค่าใช้จ่ายของเครื่องมือสูง
Laser Ablation	ใช้กับพื้นผิวที่เป็นโลหะและไม่เป็นโลหะ	ไม่มีการใช้สารเคมีในการทำความสะอาด	ทำความสะอาดเฉพาะจุดที่ต้องการ	ต้องทำการปรับค่าให้เหมาะสม
Abrasive Blasting	ใช้กำจัดสีและสนิมบนพื้นผิว	ไม่มีการใช้สารเคมีในการทำความสะอาด ตัวกลางไม่มีความเป็นพิษ	ทำความสะอาดได้ในบริเวณกว้าง เปลี่ยนตัวกลางได้ตามประเภทของงาน สามารถนำตัวกลางมาใช้งานใหม่ได้	ค่าใช้จ่ายของเครื่องมือสูง ตัวกลางที่มีความแข็งแรงจะทำให้พื้นผิววิบัติเสียหาย
Vapor Degreasing	ใช้กำจัดไขมันและสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว	ต้องใช้ไอระเหยที่ไม่มีพิษ	เหมาะสมกับชิ้นงานมีความซับซ้อน สามารถนำไอระเหยกลับมาใช้งานใหม่ได้	ไอระเหยมีความเป็นพิษ ค่าใช้จ่ายเครื่องมือในการกำจัดไอระเหยมีราคาสูง
Cold Cleaning	ใช้กำจัดไขมันและสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว	ต้องใช้ตัวทำละลายทดแทนที่ไม่มีพิษ หรือมีความเป็นพิษน้อยลง	เหมาะสมกับชิ้นงานขนาดเล็กที่มีจำนวนมาก สามารถนำสารเคมีบางส่วนกลับมาใช้งานใหม่ได้	ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและสิ่งแวดล้อม ค่าใช้จ่ายของตัวทำละลายทดแทนมีราคาสูง

2.3.1.2 ตัวทำละลายที่ใช้ในการลอกสีด้วยวิธี Cold Cleansing

ตัวทำละลายที่ใช้ในการลอกสีด้วยวิธี cold cleansing เป็นการใช้น้ำมันที่เป็นตัวทำละลายสีหรือโพลิเมอร์ที่เกิดจากเรซิน เนื้อสี ตัวยึด และสารเติมแต่งอื่น โดยตัวทำละลายจะต้องมีสมบัติในการละลายหรือทำลายพันธะของตัวยึดกับพื้นผิววัสดุ และจะละลายอยู่ในตัวทำละลาย โดยตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ Methylene Chloride:MC ซึ่งมีสมบัติในการละลายสีออกจากพื้นผิวได้ภายในเวลาอันสั้น แต่ในปัจจุบัน MC จัดอยู่ในประเภทสารระเหยอันตรายเช่นเดียวกับ TCE ที่ถูกระงับการใช้งานในปัจจุบัน ภายใต้อนุสัญญาบาเซล จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการปรับเปลี่ยนหาตัวทำละลายทดแทนที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าหรือมีความเป็นพิษต่ำกว่า MC ได้แก่ NMP, Dimethyl Sulfoxide:DMSO, Benzyl Alcohol, Dimethyl Formamide:DMF และ Volatile Methyl Siloxanes เป็นต้น [21]

Methylene Chloride (MC)

เมทิลีนคลอไรด์หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโครงสร้าง CH_2Cl_2 มีลักษณะใสไม่มีสี เป็นสารระเหยง่าย มีจุดเดือดต่ำ ติดไฟยาก ไม่ละลายในน้ำ MC ในอากาศสามารถอยู่ในอากาศได้นานถึง 53 ถึง 127 วัน แต่ MC บางส่วนสามารถถูกย่อยสลายให้อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยแสงแดดจากธรรมชาติได้ มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมตัวทำละลายและน้ำยาลอกสี เนื่องจากสามารถทำละลายสารอินทรีย์ได้หลายชนิด อีกทั้งยังสามารถกำจัดคราบไขมันออกได้ สามารถพบได้ในผลิตภัณฑ์กระป๋องพ่นต่างๆ เช่น ยาฆ่าแมลง สีสเปรย์กระป๋องแห้งเร็ว โดยมีค่าความเป็นพิษดังนี้ ค่า LD50 มีค่าเท่ากับ 1,600 mg/kg ค่า TLV-TWA มีค่าเท่ากับ 50 ppm [22] สมบัติอื่นๆดังตารางที่ 2.7 และเมื่อหายใจรับ MC เข้าไป 800 ppm จะทำให้มีผลทำให้มือสั่น เวียนศีรษะ หน้ามืด MC จะมีอันตรายถึงขั้นหมดสติและเสียชีวิตได้เมื่อรับเข้าสู่ร่างกายมากกว่า 8,000-20,000 ppm [23]

ตารางที่ 2.7 สมบัติทางกายภาพของ MC[22]

สมบัติทางกายภาพ	
ประเภทสารเคมี	Alkyl Halide
สูตรโครงสร้าง	CH ₂ Cl ₂
มวลโมเลกุล	84.93 g/mol
ความถ่วงจำเพาะ	1.32 (25°C)
จุดหลอมเหลว	-96.7 °C (175.7 K)
ความสามารถในการละลาย (จากแผนภาพ CGS Hansen)[30]	3.0 (H-Bonding)
	3.1 (Polar)
จุดเดือด	39.8°C @ 760 mmHg
ความดันไอ	6.83 psi @ 20°C
การละลายในน้ำ	ละลายได้น้อยมาก
จุดวาบไฟ (ในถ้วยปิด)	ไม่ติดไฟ
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟได้เอง	661°C

N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)

หรือที่รู้จักในชื่อ M-pyrol หรือ NMP, N-methylpyrrolidone มีจุดวาบไฟสูง และมีอัตราการระเหยต่ำ มีผลในการลอกสีอย่างมาก มีกลิ่นคล้ายเอมีน ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ [4] ส่วนใหญ่เป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับการละลาย cellulose ether, butadiene-acrylonitrile copolymer, polyamides, polyacrylonitrile, waxes, polyacrylates, vinyl chloride copolymer, และ epoxy resin ใช้ในอุตสาหกรรมการลอกสีเพื่อลดความหนืดของสี นอกจากนี้ NMP ยังถูกใช้ในการสกัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและใช้เป็นตัวทำละลายในการสังเคราะห์ acetylene โดยมีค่า LD 50 เท่ากับ 4,200 mg/kg [24] ค่า TLV-TWA เท่ากับ 50 ppm และปริมาณที่สามารถรับเข้าสู่ร่างกายโดยไม่มีผลกระทบต่อร่างกายได้ (NOEL, No Observable Effect Level) เท่ากับ 250 mg/kg ต่อ 1 วัน สมบัติทางกายภาพอื่นๆ ดังตารางที่ 2.8 โดยในปัจจุบัน NMP ได้มีบทบาทในการลอกสี เนื่องจากมีสมบัติในการทำละลายสีได้ดี แต่ข้อจำกัดคือ มีอัตราการลอกสีที่ช้าเมื่อเทียบกับ MC และสารเคมีมีราคาแพง อย่างไรก็ตาม

ตามสามารถนำ NMP ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการกลั่น ข้อดีของ NMP คือในปัจจุบันยังไม่จัดเป็นสารระเหยอันตรายที่มีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ แต่เนื่องจากการศึกษาค้นคว้าวิจัยยังไม่เป็นที่แพร่หลาย ดังนั้น NMP จึงยังไม่ถูกใช้งานอย่างเป็นทางการในอุตสาหกรรมการลอกสี

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางกายภาพของ NMP[24]

สมบัติทางกายภาพ	
ประเภทสารเคมี	วงแหวนเอมีน (Cyclic Amine)
สูตรโครงสร้าง	C ₅ H ₉ NO
มวลโมเลกุล	99.1 g/mol
ความถ่วงจำเพาะ	1.027 (25°C)
จุดหลอมเหลว	-24.4°C (-11.9°F)
จุดเดือด	202°C (395°F) @ 760 mmHg
ความดันไอ	<0.3 mmHg @ 20°C
อัตราการระเหย	0.03 (n-butyl acetate = 1.00)
ความสามารถในการละลาย (จากแผนภาพ CGS Hansen)[30]	3.5 (H-Bonding)
	6.0 (Polar)
	8.8 (non-Polar)
การละลายในน้ำ	ละลายได้ดีในทุกอุณหภูมิ
จุดวาบไฟ (ในถ้วยปิด)	90°C (194°F)
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟได้เอง	270°C (518°F)

Dimethyl sulfoxide (DMSO)

ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) หรือ เมทิลซัลฟอกไซด์ (Methyl Sulfoxide) เป็นตัวทำละลายใสไม่มีสี [25] ละลายได้ในน้ำและสารละลายอินทรีย์ยกเว้นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นเส้นตรง มีจุดเดือดสูง เป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับ cellulose ester, cellulose ether, poly(vinyl acetate), polyacrylates, vinyl chloride, chlorinated rubber และเรซินหลายชนิด ใช้ในอุตสาหกรรมการลอกสี การสร้างฟิล์มเพื่อเพิ่มการกระจายตัวที่ดี (Extracting agent) และใช้เป็นสารที่ใช้สังเคราะห์สารอินทรีย์

อีกหลายชนิด โดยมีค่า LD 50 เท่ากับ 17,400 mg/kg สำหรับค่า TLV-TWA ยังไม่มีการกำหนดและค่า NOELเท่ากับ 1,100 mg/kg ใน 1 วัน[26] สมบัติทางกายภาพอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 2.9 DMSO ยังเป็นตัวทำละลายที่มีสองขั้ว (dipolar aprotics solvents)โดยจัดว่าเป็นสารในกลุ่มเดียวกับ NMP, Dimethylformamide (DMF) และDimethylacetamide (DMAC) นอกจากนี้ยังสามารถรวมกับสารละลายอินทรีย์ทั่วไปเช่น แอลกอฮอล์ เอสเตอร์ คีโตน สารละลายคลอรีน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดวงแหวน ซึ่งจะเป็นทางเลือกในการผสมกับตัวทำละลายอื่นเพื่อเพิ่มความสามารถในการลอกสีประเภทต่างๆ และเช่นเดียวกับ NMP โดยสารเคมีชนิดนี้เป็นที่รู้จักในอุตสาหกรรมการลอกสีน้อยมากแต่นิยมใช้ในการสังเคราะห์สารเคมีหรือใช้ทำการทดลองอื่นๆ [27] เนื่องจากต้นทุนของทำละลาย NMP และ DMSO สูงมาก และมีอัตราการลอกสีที่ต่ำกว่า MC ดังนั้นจึงไม่มีการใช้ตัวทำละลายทั้งสองชนิดนี้ในงานลอกสีเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกายภาพของ Dimethyl Sulfoxide [28]

สมบัติทางกายภาพ	
ประเภทสารเคมี	สารประกอบซัลเฟอร์
สูตรโครงสร้าง	C ₂ H ₆ OS
มวลโมเลกุล	78.13 g/mol
ความถ่วงจำเพาะ	1.1 @ 20°C (68°F)
จุดหลอมเหลว	18°C (64°F)
จุดเดือด	189°C (372°F) @ 760 mmHg
ความดันไอ	0.55 mbar (0.46 mmHg) @ 20°C (68°F)
อัตราการระเหย	0.026 (n-butyl acetate = 1.00)
ความสามารถในการละลาย (จากแผนภาพ CGS Hansen)[30]	4.9 (H-Bonding)
	8.0 (Polar)
การละลายในน้ำ	ละลายได้ในน้ำ
จุดวาบไฟ (ในถ้วยปิด)	89°C (192°F)
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟได้เอง	300-302°C (572-575°F)

Benzyl Alcohol

เบนซิลแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายทดแทนที่สามารถใช้งานได้คล้ายกับ MC โดยสารเคมีชนิดนี้ในปัจจุบันไม่มีระบุอยู่ในสารเคมีอันตราย HAPs [29] สีที่สามารถละลายได้ด้วย Benzyl Alcohol เช่น สีรองพื้นอีพอกซีและพอลิยูรีเทนเคลือบชั้นบนสุด โดยสมบัติทางกายภาพของ Benzyl Alcohol คือ เป็นสารละลายใสไม่มีสี มีกลิ่นของสารไฮโดรคาร์บอนชนิดวงแหวน มีจุดวาบไฟ 94°C ค่า LD50 เท่ากับ 1,230 mg/kg [30] โดย Benzyl Alcohol จะสามารถผสมกับกรดฟอร์มิกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการชะล้างสีที่ดี สามารถใช้งานกับโลหะหลายชนิดยกเว้น โลหะที่มีความแข็งแรงสูงหรือแมกนีเซียม สมบัติทางกายภาพอื่นๆแสดงดัง ตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 สมบัติทางกายภาพของ Benzyl Alcohol [30]

สมบัติทางกายภาพ	
ประเภทสารเคมี	สารประกอบแอลกอฮอล์
สูตรโครงสร้าง	C ₇ H ₈ O
มวลโมเลกุล	108 g/mol
ความถ่วงจำเพาะ	1.045 @ 20°C (68°F)
จุดหลอมเหลว	-15°C
จุดเดือด	206°C @ 760 mmHg
ความดันไอ	3.7 mmHg @ 77°C
การละลายในน้ำ	ละลายได้ในน้ำ
จุดวาบไฟ (ในถ้วยปิด)	94°C (201°F)
อุณหภูมิที่สามารถติดไฟได้เอง	436°C

Dimethylformamide (DMF)

DMF มีสมบัติคล้ายกับ DMSO ไม่สามารถละลาย polyethylene, polypropylene, ureaformaldehyde resin, rubber และ polyamide [4] ใช้มากในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์และใช้ในการสังเคราะห์ acetylene โดยมีค่า LD 50 เท่ากับ 17,400 mg/kg และค่า TLV-TWA เท่ากับ 10 ppm NOEL เท่ากับ 50 mg/kg ใน 1 วัน[4] ในการลอกสีจะใช้ DMF ผสมกับตัวทำละลายอื่นเพื่อเพิ่มช่วงความสามารถในการละลายเนื้อสีให้รองรับประเภทของสีได้มากขึ้นและมีอัตราการลอกสีที่เร็วขึ้น

Volatile Methyl Siloxanes (VMS)

สารระเหย methyl siloxanes เป็นสารประกอบของ dimethyl silicones, siloxane, cyclopolydimethyl siloxane และ pentamethyl[(trimethylsilyl)oxy]cyclotrisiloxane มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ[31,32] สามารถใช้งานได้กับ Plastic และ Elastomer ข้อดีของ VMS คือ มีความสามารถในการทำความสะอาดที่ดี รองรับกับสิ่งปนเปื้อนได้หลากหลายแห้งเร็วโดยไม่หลงเหลืออยู่บนชิ้นงาน มีสมบัติการไหลที่ดี นิยมใช้อย่างมากในการล้างคราบไขมัน หรือใช้กับชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำในการทำ ความสะอาดสูงมาก และใช้ทดแทนสารทำความเย็น (Chlorofluorocarbon, CFC) ได้ และไม่มี ส่วนประกอบของสารประกอบ chlorinated แต่มีข้อจำกัดคือราคาที่สูงและติดไฟได้

2.3.2 การเคลือบผิว (Paint Application)

หลังจากการเตรียมพื้นผิว กระบวนการต่อไปคือการเคลือบสีหรือการเคลือบผิว ในปัจจุบันมีวิธีการเคลือบผิวที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการใช้งาน [4] โดยแบ่งตามเครื่องมือที่ใช้มีดังนี้

1. การเคลือบโดยการชุบเป็นการนำชิ้นส่วนโลหะจุ่มลงในถังและสีที่มากเกินพอจะถูกทิ้งออกมา
2. การเคลือบโดยลูกกลิ้ง เหมาะสำหรับชิ้นส่วนที่เป็นแผ่นเรียบโดยการวางชิ้นงานบนรางเลื่อนและวิ่งผ่านลูกกลิ้งที่มีสีติดอยู่ โดยอาจจะใช้เทคนิคประจุไฟฟ้าเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มอัตราการเกาะติดของเนื้อสีกับชิ้นงาน
3. การเคลือบแบบม่าน (Curtain coating) ทำได้โดยการวางชิ้นส่วนลงบนรางเลื่อนและวิ่งผ่านม่านสีเพื่อให้สีกระทบกับชิ้นงาน โดยสามารถเก็บสีในถังเก็บสีเพื่อใช้ปั๊มส่งสีกลับไปสร้างม่านสีต่อไป
4. การเคลือบโดยใช้ไฟฟ้า ด้วยวิธี anodic หรือ cathodic ในถังที่จะสร้างการเคลือบ aqueous emulsion อาศัยหลักทางไฟฟ้า ขั้วตรงข้ามจะวิ่งเข้าหากันซึ่งจะทำให้สีติดที่ผิวได้อย่างสม่ำเสมอเหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีความซับซ้อน

ในกระบวนการเคลือบพื้นผิวมักเคลือบเป็นลำดับต่อเนื่องกันโดยทั่วไปจะทำการเคลือบ 3 ชั้น เริ่มต้นที่เคลือบชั้นล่างสุดที่เรียกว่า subsequent coats ซึ่งประกอบไปด้วยการเคลือบรองพื้น (basecoats) และการเคลือบสีทับหน้า (topcoats) ตามลำดับและการเคลือบชั้นสุดท้ายหรือการเคลือบแลคเกอร์ (clearcoats) เพื่อสร้างความแข็งแรงในการต่อต้านสภาวะแวดล้อมต่างๆ และเพิ่มอัตราการยึดเกาะของสีให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นโดยความสำคัญของการเคลือบแบ่งแยกตามการใช้งาน และประสิทธิภาพของการเคลือบขึ้นอยู่กับวิธีการเคลือบที่เหมาะสม

นอกจากนี้สามารถจำแนกประเภทการเคลือบสีตามชนิดหรือประเภทของตัวทำละลายได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. สีที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Waterborne)
2. สีที่มีตัวทำละลายเป็นสารอินทรีย์ (Organic solvent-borne)
3. สีผงปราศจากตัวทำละลาย (Powder)

2.3.2.1 การเคลือบโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Waterborne Coating)

Waterborne หมายถึง ระบบการเคลือบที่ใช้ น้ำทดแทนตัวทำละลายซึ่งรวมถึงการเคลือบแบบ aqueous emulsion(Latex), colloidal dispersions, และ water-reducible coatings [4]

Emulsion หรือลาเท็กซ์ คือ สารเคลือบที่สร้างจากพอลิเมอร์โดยสังเคราะห์มาจากน้ำและสารประกอบของสารลดแรงตึงผิว (surfactant) จากกระบวนการ emulsion polymerization เกิดเป็นสี Emulsion ซึ่งเกิดจากการนำโมโนเมอร์ที่เป็นของเหลวและน้ำมาทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ ที่มีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายกาว สารเคลือบชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างมากและกระจายตัวอยู่ในตัวทำละลายน้ำ สีอิมัลชันผลิตโดยใช้เรซินหลากหลายชนิด โดยตัวอย่างของเรซินที่ใช้เช่น Styrene-butadiene copolymers, polyvinyl acetate, acrylics, alkyds, และ polystyrene

Water-reducible coating เป็นการเคลือบที่ใช้ น้ำเป็นตัวทำละลายทดแทนทินเนอร์ สารเคลือบจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนกว่าการเคลือบแบบ Latex โดยทั่วไปเป็นโคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่สร้างจากโมโนเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป สังเคราะห์จากตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเช่น แอลกอฮอล์และเอสเทอร์ โดยมีโมโนเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดคาร์บอกซิลิก โดยหมู่กรดจะทำการ

ปรับเบสพวกแอมโมเนียหรือเอมีนให้เป็นกลางโดยผลที่ได้คือผลิตภัณฑ์ที่ละลายได้ในน้ำ เมื่อน้ำระเหยออกไปจะเหลือฟิล์มของพอลิเมอร์ การบ่มจะช่วยให้เกิด Cross-Linking ของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการเคลือบอีกด้วย

ข้อดีของ waterborne คือ มีตัวทำละลายเป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณสีทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถลดปริมาณสารระเหยอินทรีย์ได้ วิธีการกำจัดตัวทำละลายสีอาจจะใช้วิธีผนังกำแพงน้ำ (Water-Wall) ที่อยู่ในห้องพ่นสี โดยน้ำเสียจากสีสามารถแยกไปกำจัดได้เนื่องจากมีความเป็นพิษไม่สูงมากนัก แต่หัวใจสำคัญของระบบนี้คือพื้นผิวต้องปราศจากน้ำมันโดยสิ้นเชิงและต้องใช้เวลาในการทำให้แห้งนานแต่สามารถแก้ปัญหาได้โดยการใช้เตาอบสีและล้างพื้นผิวให้สะอาดเสียก่อน

2.3.2.2 การเคลือบโดยมีตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent-borne Coating)

องค์ประกอบของสีชนิดนี้เป็นตัวทำละลายเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากสารยึดเกาะทุกประเภทสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ จึงเรียกสีชนิดนี้ว่าสี *Oil-base* ซึ่งนิยมใช้ในการเคลือบผิวงานพิเศษหรือการเคลือบผิวไม้ [5]

โดยธรรมชาติของสีชนิดนี้จะมี Volatile Organic Compounds (VOCs) เป็นส่วนประกอบหลัก การลด VOCs สามารถทำได้โดยการใช้การเคลือบแบบ High-Solid Coating แต่ข้อจำกัดคือจะต้องมีผงสีที่เป็นของแข็งอย่างน้อย 60% ขึ้นไป น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเคลือบสีชนิดนี้โดยทั่วไปไม่มีความเป็นพิษหรือติดไฟ อย่างไรก็ตามหากมีการจัดการที่ดีสามารถนำตัวทำละลายเหล่านี้กลับมาใช้งานใหม่หรืออาจจะนำไปเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา

ตัวอย่างของสีอีนาเมลที่ใช้งานในอุตสาหกรรมเคลือบโลหะในปัจจุบันเช่น สีอีพอกซี, สีอะคริลิก, สีไวนิล และพอลิยูรีเทน

(1) สีอะคริลิก (Acrylic)

คือสีที่เป็นพอลิเมอร์ของกรดอะคริลิกและอนุพันธ์ โดยสมบัติที่สำคัญคือ มีความคงทนต่อรังสีอัลตราไวโอเลต และต่อการเกิดไฮโดรลิซิส มีความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ที่กัดกร่อน ทนต่อการกระทบกระเทือนจากแรงภายนอกและความเงา ฟิล์มที่ได้จากสีชนิดนี้มีความเงางามสูง เข้ากับผง

สีได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมของการเคลือบผิวหน้าโลหะ ไม้ ผนัง เซรามิก และพลาสติก เมื่อผสมกับ สารละลายจะเรียกว่า “สีแลคเกอร์”

(2) สีอีพอกซี (Epoxy)

อีพอกซีเรซินสามารถนำมาใช้เป็นสารยึดได้ทั้งในสีรองพื้น สีชั้นล่าง และสีทับหน้า โดยทั่วไปมัก ผสมอัลคิเดเรซินลงไปด้วยเพื่อเพิ่มสมบัติความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ น้ำ และตัวทำละลายต่างๆ มีความ ทนทานต่อการขัดสี และมีสมบัติยึดกับผิวหน้าต่างๆ ได้ดี ข้อเสียของสีอีพอกซีที่ทำให้การใช้งานมี ข้อจำกัด คือ ฟิล์มที่ได้จะร่วนและเกิดการเป็นฝุ่นเมื่ออยู่ภายนอกหรือถูกแดดนานๆ ดังนั้นจึงไม่เหมาะ ที่จะใช้สีอีพอกซีสำหรับผิวหน้าที่ต้องอยู่ภายนอกหรือถูกแดดนานๆ

(3) สีไวนิล (Vinyl)

ในการนำไวนิลเรซินมาใช้ทำสี มักใส่พลาสติกไซเซอร์ เช่น ไตรครีซิลฟอสเฟตลงไปด้วย สำหรับตัวทำ ละลายที่ใช้ได้แก่ คีโตน และเอสเทอร์ นอกจากนี้อาจจะมีการเติมตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนลงไป ด้วย สีไวนิลใช้เคลือบป้องกันผิวโลหะ โลหะชนิด non-ferrous คอนกรีต และพื้นผิววัสดุอื่นๆ ที่ต้อง อยู่ภายใต้ภาวะที่เกิดการกัดกร่อนสูง

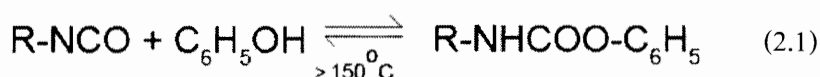
(4) สีพอลิยูรีเทน (Polyurethane)

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ $-NHCOO-$ อยู่ในโมเลกุล ได้จากปฏิกิริยาระหว่างไอโซ- หรือ โพลีไอโซไซยานต กับไอโซ-หรือโพลีไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ ในการเคลือบผิวหน้าสารเริ่มต้นตัวหนึ่งจะต้องมีหมู่ ฟังก์ชันอย่างน้อย 3 หมู่ซึ่งอาจจะเป็นไดรอลทำปฏิกิริยากับไอโซไซยานต หรืออาจจะเป็นไดรอลทำปฏิกิริยากับไตรไอโซไซยานต ซึ่งในทางปฏิบัติ มักให้มีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูงกว่า ดังนั้นพอลิยูรีเทนจึงมักเตรียมจากปฏิกิริยาระหว่างไดรอลกับไอโซไซยานต

สารประกอบไอโซไซยานตที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมการเคลือบผิวมี 2 ชนิด คือ โทลิลีน 2,4-ไดไอโซไซยานต (2,4 TDI) และโทลิลีน 2,6 ไดไอโซไซยานต (2,6 TDI) สารประกอบไอโซไซยานตว่องไวต่อปฏิกิริยามาก หมู่ไอโซไซยานตสามารถทำปฏิกิริยากับสารต่อไปนี้ คือ เอมีน น้ำหรือ ความชื้น แอลกอฮอล์ กรดคาร์บอกซิลิก และยูรีเทน เนื่องจากหมู่ไอโซไซยานตว่องไวต่อน้ำหรือ ความชื้น ดังนั้นตัวทำละลายที่ใช้เช่น เอสเทอร์ คีโตน และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะต้องปราศจาก น้ำ

สารเคลือบผิวจากพอลิยูรีเทนอาจเตรียมได้ต่างกันดังนี้

- พอลิยูรีเทนชนิด 2 ส่วน (Two-Can Urethane Systems) ได้จากปฏิกิริยาระหว่างพรีพอลิเมอร์ที่มีหมู่ไอโซไซยานาตอยู่ที่ปลายโซ่ ($\text{OCN}\cdots\text{NCO}$) กับโพลีเอสเตอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ปลายโซ่ ($\text{HO}\cdots\text{OH}$) พอลิยูรีเทนประเภทนี้ใช้ทำทากาว แต่มีจุดอ่อนคือ ทำแล้วต้องใช้งานให้หมด มิฉะนั้นถ้าเหลือจะแข็งตัว พอลิยูรีเทนชนิด 2 ส่วน มีข้อยุ่งยากตรงที่จะต้องผสม 2 ส่วนเข้าด้วยกัน และจะต้องทิ้งของผสมไว้สักระยะหนึ่งก่อนจึงจะใช้งานได้
- พอลิยูรีเทนชนิด 1 ส่วนแบบอบ (One-Can Urethane Stoving System) ปัจจุบันสามารถทำให้เป็นชนิด 1 ส่วนได้ โดยปิด (block) หมู่ไอโซไซยานาตด้วยฟีนอล ซึ่งจะเกิดเป็น ฟีนิลยูรีเทน (phenyl urethane) ที่ไม่เสถียร และจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 150°C เกิดเป็นหมู่ไอโซไซยานาตขึ้นมาใหม่ดังนี้



หมู่ไอโซไซยานาตที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับโพลีเอสเตอร์ที่ใส่รวมอยู่ด้วย และในขณะเดียวกัน ฟีนอลที่เกิดขึ้นจะระเหยไปถ้าอบของผสมที่อุณหภูมิสูงกว่า 150°C ในทางปฏิบัติใช้อุณหภูมิ $160-180^{\circ}\text{C}$

2.3.2.3 การเคลือบโดยใช้สีผง (Powder Coatings)

การเคลือบชนิดนี้สามารถลดการใช้ตัวทำละลาย โดยอาศัยหลักการพ่นผงสีที่เป็นผงละเอียดลงบนชิ้นงานและทำการบ่มที่อุณหภูมิสูง การพ่นสีสามารถทำได้โดยวิธี Electrostatic Spray, Fluidized bed, และ Flame Spray ในทุกวิธีผงสีจะถูกละลายเพื่อสร้างฟิล์มที่ต่อเนื่องกัน [4]

ผงสีเป็นพอลิเมอร์ชนิด Thermoplastic และ Thermosetting โดยพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเมื่อทำการหลอมจะเกิดเป็นฟิล์มที่ต่อเนื่อง Thermoplastic resin ที่ใช้ได้แก่ nylon, polyvinyl chloride, fluoropolymers และ polyolefins นิยมใช้มากในงานที่ต้องการแผ่นฟิล์มที่หนา ส่วนประกอบหลักสำหรับ Thermosetting ได้แก่ epoxy, polyester, polyurethane, และ acrylic resin ซึ่งจะได้แผ่นฟิล์มที่บางกว่า thermoplastic

การเคลือบชนิดนี้จัดว่าเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีปัญหาเรื่องการระเหยของสารระเหยอินทรีย์น้อยเพราะไม่ได้ใช้ตัวทำละลายในการเคลือบ ข้อดีของผงสีคือ จะต้องทำการอบสีหรือให้ความร้อนก่อนจึงจะเกิดเป็นฟิล์มเคลือบบนพื้นผิว ดังนั้นกระบวนการพ่นผงสีลงบนพื้นผิววัสดุจะเกิดผงสีส่วนเกินและตกลงสู่พื้น และผงสีเหล่านี้สามารถเก็บรวบรวมกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้สูงถึง 90-97% ซึ่งจัดว่าสามารถนำสีกลับมาใช้ใหม่ได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการเคลือบสีที่เป็นของเหลว ดังนั้นการทาสีจึงมีน้อยมาก แต่ข้อเสียของสีชนิดนี้คือพื้นผิวจะต้องสะอาดมากเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติด และข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งคือไม่เหมาะกับชิ้นงานขนาดใหญ่เพราะจะสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมากในการให้ความร้อนให้ทั่วถึง ชิ้นงานจะต้องไม่ไวต่อความร้อน ปัญหาที่พบสำหรับกระบวนการนี้คือผิวงานที่ไม่เป็นระเบียบจะทำให้การเคลือบไม่สม่ำเสมอ แต่สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้ Electrostatic Spray ในสนามไฟฟ้า

เทคโนโลยีการเคลือบสีได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วเพื่อเพิ่มคุณภาพของสินค้า และเพื่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังพัฒนาให้สามารถใช้งานได้หลากหลายในการผลิตสินค้าหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.11 โดยการเคลือบผิวชิ้นงานจะต้องพิจารณาถึงขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน การลดปริมาณชิ้นงานสามารถทำได้โดยเมื่อใช้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้สีตรงตามประเภทการใช้งาน การเคลือบสีโดยใช้ไฟฟ้าจะให้ประสิทธิภาพในการเกาะติดสูงถึง 99-99% ซึ่งเกิดของเสียจากสีต่ำกว่าการใช้การเคลือบสีแบบจุ่มหรือใช้การเคลือบแบบม่านที่มีประสิทธิภาพในการเกาะติดเพียง 75-90%

ตารางที่ 2.11 กระบวนการเคลือบสีชนิดต่างๆ [16]

กระบวนการ	คำอธิบาย	การใช้งาน
แปรงทาสี (Brush)	เป็นการเคลือบสีประเภทที่แห้งช้าและสีน้ำโดยใช้แรงงานทาสี	งานที่มีขนาดเล็กไม่ใหญ่และมีปริมาณไม่มาก
การใช้ลูกกลิ้ง (Hand Roller)	เป็นการเคลือบสีโดยใช้ลูกกลิ้งทาสีน้ำลงบนพื้นผิว	งานที่มีพื้นที่เรียบขนาดใหญ่ เช่น กำแพง
การจุ่ม (Dip Coating)	เป็นการเคลือบวัตถุโดยการใช้การจุ่มชิ้นงานลงในสี	รถ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์
การไหลผ่านสี (Flow coating)	เป็นการเคลือบสีโดยพ่นสีผ่านหัวฉีดลงบนชิ้นงาน	วัตถุชิ้นใหญ่หรือวัตถุที่มีรูปร่างซับซ้อน
การใช้ม่านสี (Curtain coating)	เป็นการเคลือบโดยชิ้นงานจะเคลื่อนที่ผ่านม่านสี	ชิ้นงานใหญ่ที่เป็นแผ่นบางเรียบ
การใช้ลูกกลิ้งเคลือบโดยตรง (Direct roller coating)	เป็นการเคลือบของชิ้นงานที่เป็นแผ่น โดยจะเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้ง	ชิ้นงานที่เป็นแผ่นโลหะบาง
การเหวี่ยง (Centrifuging)	เป็นการเคลือบโดยชิ้นงานจะบรรจุอยู่ในตระกร้าและจุ่มลงในสีและนำขึ้นมาเหวี่ยงโดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลางในการแยกเอาสีที่มากเกินไปออก	ชิ้นงานขนาดเล็กที่แตกหักง่ายเช่นเครื่องประดับ
การใช้หัวพ่นสเปรย์ (Spray Application)	วัตถุจะถูกพ่นสเปรย์ด้วยสีที่ถูกเร่งอะตอม (atomized paint), สีจะถูกอัดผ่านอากาศภายใต้แรงดัน	ชิ้นงานทางการค้าทั่วไป
การพ่นแบบไฟฟ้า (Electrodeposition)	วัตถุจะถูกแช่อยู่ในอ่างโดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการเกาะติดของสี	ชิ้นงานที่เป็นโลหะและมีการนำไฟฟ้า
การเคลือบผงสีโดยใช้สเปรย์ไฟ (Flame spraying powder coating)	สีผงจะถูกพ่นผ่านหัวฉีดที่ให้ความร้อนสูงจนละลายและพ่นติดกับชิ้นงาน	วัตถุขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถบรรจุในเตาอบได้
การเคลือบผงสีแบบพลาสมา (Plasma powder coating)	ผงสีจะถูกพ่นออกพร้อมกับก๊าซร้อนและพ่นติดบนชิ้นงาน	วัตถุขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถบรรจุในเตาอบได้

2.3.3 กระบวนการทำให้แห้ง (Drying Process)

หลังจากที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปคือการทำให้ฟิล์มที่เคลือบอยู่บนพื้นผิววัสดุติดแน่นไม่หลุดออกจากผิวหน้า ทนทานต่อสภาพแวดล้อม อาจทำได้โดยใช้แสง ความร้อน หรืออากาศ เช่น สีน้ำมันทาบ้านจะเกิดการบ่มโดยการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นฟิล์มแห้งแข็งที่มีความทนทานเพิ่มขึ้น หรือการนำสารเคลือบ (enamel) ที่ทำจากพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซตไปอบก็เป็นการทำให้แห้งได้อีกวิธีหนึ่ง [4]

โดยทั่วไป สารเคลือบผิวจะแห้งโดยกรรมวิธีต่างๆ กันได้ 2 แบบคือ

- 2.3.3.1 แห้งโดยวิธีทางฟิสิกส์ (Physical Drying) การแห้งด้วยวิธีนี้จะเกิดการระเหยของตัวทำละลาย กลายเป็นฟิล์มยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะทุติยภูมิ (secondary force) อย่างอ่อนๆ ดังนั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นยังคงละลายได้ในตัวทำละลายของมัน ตัวอย่างของสารเคลือบที่ผิวแห้งโดยกรรมวิธีทางฟิสิกส์ได้แก่ แล็กเกอร์ สีที่ทำจากยางคลอรีเนต (chlorinated rubber) เป็นต้น
- 2.3.3.2 แห้งโดยกรรมวิธีทางเคมี (Chemical Drying) ฟิล์มที่ได้จากการแห้งตัวโดยวิธีการนี้ยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะปฐมภูมิ (primary bond) จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น ฟิล์มที่ได้จะแข็งแรงและทนทานต่อตัวทำละลายการแห้งโดยวิธีเคมีอาจเกิดโดย
 - แห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารเคลือบผิวประเภทนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ขนาดของอนุของสารเคลือบผิวใหญ่ขึ้นจนรวมตัวเป็นฟิล์มแห้งแข็งตามต้องการ เช่น สีน้ำมันทาบ้านที่ผลิตจากอัลคิเดเรซิน (Alkyd resin) เป็นต้น การแห้งโดยวิธีนี้ อาจเร่งให้แห้งเร็วขึ้นโดยการใส่สารเร่งแห้ง (drier)
 - แห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมี สารเคลือบผิวประเภทนี้ส่วนใหญ่จะบรรจุในภาชนะแยกกันก่อนใช้จึงนำมาผสมกันตามอัตราส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ ซึ่งเมื่อผสมแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นฟิล์มที่แห้งแข็งหรืออาจจะเรียกกระบวนการเคลือบผิวนี้ว่าการเคลือบผิวระบบ 2k system (two packs system) ดังนั้นเมื่อผสมแล้วจึงต้องใช้ให้หมดภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ถ้าเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง เรียกสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดบ่มเย็น (cold curing coatings) ตัวอย่างเช่น ยูเรียเรซิน (urea resin) โพลียูรีเทนเรซิน (polyurethane resin) เป็นต้น แต่ถ้าการเกิดปฏิกิริยาต้องใช้อุณหภูมิสูง เรียกสารเคลือบผิวชนิดนี้ว่า สารเคลือบผิวชนิดอบ (stoving or baking coatings)

2.4 ขั้นตอนการพ่นสีในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์

หลังจากที่ได้ตัวถังรถจากการเชื่อมประกอบแล้ว ตัวถังที่เป็นโลหะนั้นจะต้องนำมาพ่นสีเพื่อความสวยงาม และเป็นการป้องกันการเกิดสนิม สำหรับกระบวนการทำสีนั้นค่อนข้างซับซ้อน ในขั้นตอนนี้จะสรุปเป็นขั้นตอนหลักๆ ได้ 6 ขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นตอนการล้างและเตรียมผิวเหล็ก

ในขั้นตอนนี้ จะนำตัวถังเข้าล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดอยู่ที่ตัวถังให้สะอาด แล้วจึงนำเข้าสู่กระบวนการเตรียมผิว โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเพิ่มคุณภาพในการยึดเกาะของสีและป้องกันสนิม

2) ขั้นตอนการชุบสีด้วยกระแสไฟฟ้า หรือ อี ดี พี (Electro Deposition Paint)

ตัวถังรถที่ผ่านการล้างและเตรียมผิวแล้วจะนำมาชุบสีด้วยกระแสไฟฟ้า เพื่อให้เนื้อสีสามารถเข้าไปเกาะติดที่ตัวถังรถได้ทุกซอกทุกมุม ในการชุบนั้นจะนำตัวถังรถทั้งคันจุ่มลงในบ่อสี แล้วจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าไปที่ตัวถังรถ กระแสไฟฟ้าจะทำหน้าที่พาเนื้อสีที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ให้เข้าไปเกาะที่ตัวถังรถในปริมาณเนื้อสีที่ใกล้เคียงกันทุกพื้นผิว หลังจากนั้นจะนำเข้าอบสีให้แห้ง โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 165°C เป็นเวลานานประมาณ 30 นาที

3) ขั้นตอนการหยอดกาว

ในขั้นตอนนี้ จะอุดแนวต่อต่างๆ ของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น โดยเฉพาะส่วนที่เป็นพื้นรถ เพื่อป้องกันน้ำที่จะรั่วเข้ามาในห้องโดยสาร ถ้าต้องนำรถไปใช้งานในขณะฝนตก กาวที่ใช้จะเป็น ประเภท พีวีซี (PVC) ซึ่งจะต้องใช้ความร้อนในการอบแห้งเช่นกัน

4) ขั้นตอนการพ่นสีพื้น

ในขั้นตอนนี้ จะนำตัวถังที่ผ่านการหยอดกาวแล้วมาพ่นสีพื้น สำหรับการพ่นสีพื้น จะเป็นการเตรียมเฉดของสีให้ใกล้เคียงกับสีจริง เพื่อความสามารถในการยึดเกาะและความเงาของสี ส่วนใหญ่ลักษณะของโทนสีพื้นจะเป็นสีอ่อน เช่น สีขาว หรือสีเทา เป็นต้น เมื่อทำการพ่นสีเสร็จแล้ว ก็จะถูกสายพานลำเลียงเข้าสู่ห้องอบสี โดยจะใช้อุณหภูมิในการอบประมาณ 155°C และใช้เวลาในการอบประมาณ 30 นาที

5) ขั้นตอนการขัดน้ำ

ในขั้นตอนนี้ จะนำตัวถังที่ผ่านการพ่นสีพื้นแล้ว มาขัดแต่งด้วยกระดาษทรายเนื้อละเอียด เพื่อให้บริเวณที่ไม่เรียบหรือมีรอยต่างๆ เรียบยิ่งขึ้น การขัดน้ำเป็นการใช้น้ำช่วยชำระล้างฝุ่นผงต่างๆ ออกมา และยังช่วยป้องกันการเกิดรอยในขณะขัดแต่งผิวด้วย

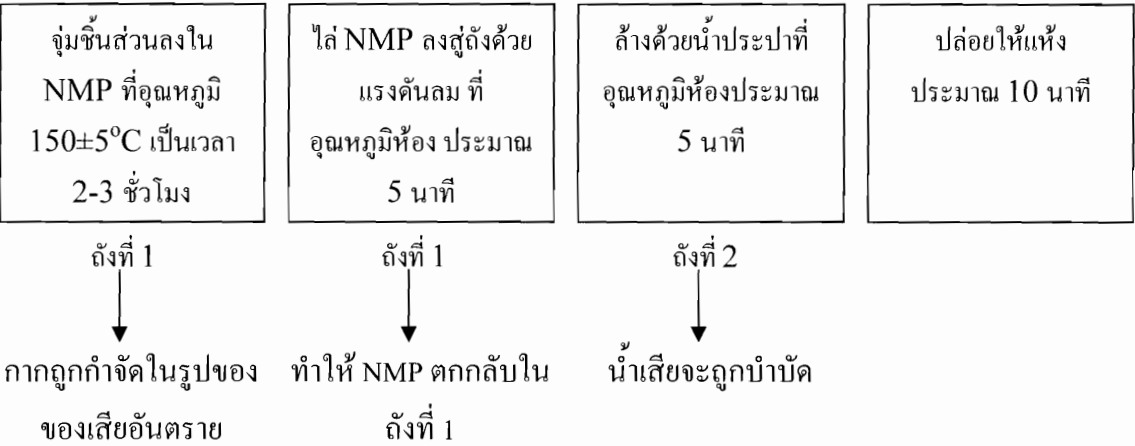
6) ขั้นตอนการพ่นสีจริง

หลังจากผ่านขั้นตอนการขัดน้ำแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการพ่นสีจริง ในขั้นตอนนี้จะมีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติ มาช่วยทำงานในการพ่นสี โดยการใช้หุ่นยนต์พ่นสี ทั้งสีพื้นและสีจริง จะทำให้การพ่นสีมีประสิทธิภาพ สม่ำเสมอ มีความเงางามและสม่ำเสมอ เพิ่มความสวยงาม และคุณภาพของสี ตัวถังรถ สีจริงหรือสีชั้นบนสุดนี้จะเป็นสีที่คงทนต่อการขีดข่วน ความร้อน แสงแดด และสารเคมี บางชนิดได้เป็นอย่างดี ตลอดจนมีความสวยงามและง่ายต่อการบำรุงรักษา อีกด้วย โดยปกติแล้ว จะมีสีอยู่ 2 ประเภทคือ สีโซลิด (Solid) ซึ่งดูเรียบด้านเหมือนสีน้ำทั่วไป และสีเมทัลลิก (Metallic) ซึ่งดูแวววาวมากกว่า และมีเคลียร์ (Clear) เคลือบทับอีกชั้นหนึ่ง

ขั้นตอนในการพ่นสีจริงนั้น สำหรับสีโซลิดจะมีเพียงชั้นเดียว ส่วนสีเมทัลลิกจะมีอยู่ 2 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 จะเป็นชั้นสี ชั้นที่ 2 จะเป็นชั้นสารเคลือบเงาในประเภทแลคเกอร์ หรือเคลียร์ หลังจากพ่นสีแล้วจะนำเข้าห้องอบสี ซึ่งจะใช้สายพานลำเลียงส่งเข้าไป และลำเลียงออกมาด้วยระยะเวลาที่เท่ากัน ทุกคัน โดยแต่ละคันใช้อุณหภูมิในการอบสีประมาณ 155 °C ในระยะเวลาประมาณ 30 นาที หลังจากผ่านกระบวนการทำสีแล้ว ตัวถังก็จะมีสีต่างๆ ที่ตรงกับความต้องการของลูกค้า แต่กระบวนการผลิตก็ยังไม่เสร็จสิ้น ยังต้องส่งตัวถังที่พ่นสีเสร็จเรียบร้อยแล้วต่อไปยังแผนกประกอบ เพื่อทำการประกอบชิ้นส่วนอื่นๆ ต่อไป

2.5 วารสารปริทัศน์

Whitfield et al. [33] ได้นำ NMP มาทำการทดลองหาประสิทธิภาพการลอกสีเปรียบเทียบกับMC โดยทำการทดลองลอกสีบนผิวเหล็กด้วยสีชนิด Plastisol ที่ผ่านการเคลือบแบบ Chemical Agent Resistance Coatings (CARC) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ และทนต่อสารเคมี โดยศึกษาสมบัติของ NMP ทั้งในด้านประสิทธิภาพในการลอกสีและค่าใช้จ่ายในการลอกสีเปรียบเทียบกับ MC กระบวนการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.3 กระบวนการลอกสีโดยใช้ NMP[33]

NMP มีความได้เปรียบในการใช้เป็นตัวทำละลายทดแทน ทั้งในด้านค่าใช้จ่ายที่ใช้ต่อเงินลงทุนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากตารางที่ 2.12 เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม MC สามารถลอกสีได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) MC มีค่าแรงดันไอสูงกว่า NMP มากประมาณ 900 เท่าซึ่งก็หมายความว่าที่สภาวะปกตินั้นการใช้ MC จะมีการระเหยเกิดขึ้นตลอดเวลาการลอกสี และเมื่อพิจารณาตารางที่ 2.13 พบว่า MC นั้นถูกจัดให้เป็นวัตถุอันตรายโดยกฎหมายสิ่งแวดล้อม The Comprehensive Environmental Response, Compensation (CERCLA), and Liability Act, The Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), และ Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA) ขณะที่ NMP นั้นถูกจัดเป็นสารเคมีเป็นพิษโดย SARA เท่านั้น

ตารางที่ 2.12 สมบัติของ NMP เทียบกับ Methylene Chloride [33]

คุณลักษณะ	NMP	Methylene Chloride
การใช้งานในอุตสาหกรรม	ใช้ในอุตสาหกรรมยาฆ่าโรค	ตัวทำละลายในการทำวามสะอาด
สมบัติด้านสีและกลิ่น	ไม่มีสี, มีกลิ่นเหม็น	ไม่มีสี, มีกลิ่นหอมคล้ายอีเทอร์
ความสามารถในการติดไฟ	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
จุดวาบไฟ	95.5°C	ไม่ติดไฟ
ความสามารถในการละลายในน้ำ	ละลายได้	ละลายได้เพียงเล็กน้อย
การเผาไหม้	เผาไหม้ได้	เผาไหม้ได้
แรงดันไอ(ที่อุณหภูมิปกติ)	0.348 mmHg, 25°C	429 mmHg,25°C
TLV-TWA ^a	50 ppm	100 ppm
อุณหภูมิที่ใช้ในการลอกสี (อุณหภูมิห้อง/เพิ่มอุณหภูมิ)	ลอกได้ทั้งอุณหภูมิห้องและเพิ่มอุณหภูมิ	ลอกได้ที่อุณหภูมิห้อง

^a Threshold Limit Value-Time Weighted Average ในส่วนของไอระเหยหรือก๊าซต่อต้านส่วนของการปนเปื้อนในอากาศต่อปริมาตรที่อุณหภูมิ 25°C และความดัน 760 mmHg

จากตารางที่ 2.14 เมื่อนำค่าใช้จ่ายของ NMP และ MC มาเปรียบเทียบกับพบว่าเงินลงทุนของ NMP มีค่าใช้จ่ายสูงถึง \$166,260 ซึ่งมาจากค่าติดตั้งระบบนำ NMP กลับมาใช้ใหม่และค่าสารเคมีที่สูงกว่า ขณะที่ MC มีค่าใช้จ่ายสารเคมีที่ต่ำกว่า เมื่อไม่มีการติดตั้งระบบนำกลับมาใช้ใหม่จึงมีค่าใช้จ่ายเพียง \$19,683 ค่าใช้จ่ายในการลอกสีต่อปีเมื่อใช้ NMP จะต่ำกว่า MC อยู่ประมาณปีละ \$6,000 ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมพบว่า NMP มีความน่าสนใจในการใช้เป็นตัวทำละลายทดแทนเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถใช้ลอกสีได้โดยที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า MC และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จากตารางที่ 2.15 พบว่า การลอกสีชิ้นส่วนของชิ้นส่วนโลหะโดยใช้ NMP เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 60 -71 °C จะมีผลต่อการลอกสีโดยที่ NMP ใช้เวลาอยู่ที่ 60-115 นาที

ตารางที่ 2.13 กฎหมายสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับ Methylene Chloride และเทียบกับ NMP [33]

Chemicals	HAP/VOC ^a	Hazardous Substance CERCLA ^b	RCRA code ^c	Toxic chemical SARA ^d
Methylene Chloride	จัดอยู่ทั้ง HAP และ VOC	1000 lbs	U080	Section 304 Title III
NMP	จัดอยู่ใน VOC เท่านั้น	ไม่มี	ไม่มี	Section 313 Title III

^aHAP = Hazardous Air Pollutants, VOC = Volatile Organic Compound

^bCERCLA = The Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act/ Product Reportable Quantity (RQ) for spill or release

^cRCRA = The Resource Conservation and Recovery Act, MC Classify as Hazardous Waste

^dSARA = Superfund Amendments and Reauthorization Act

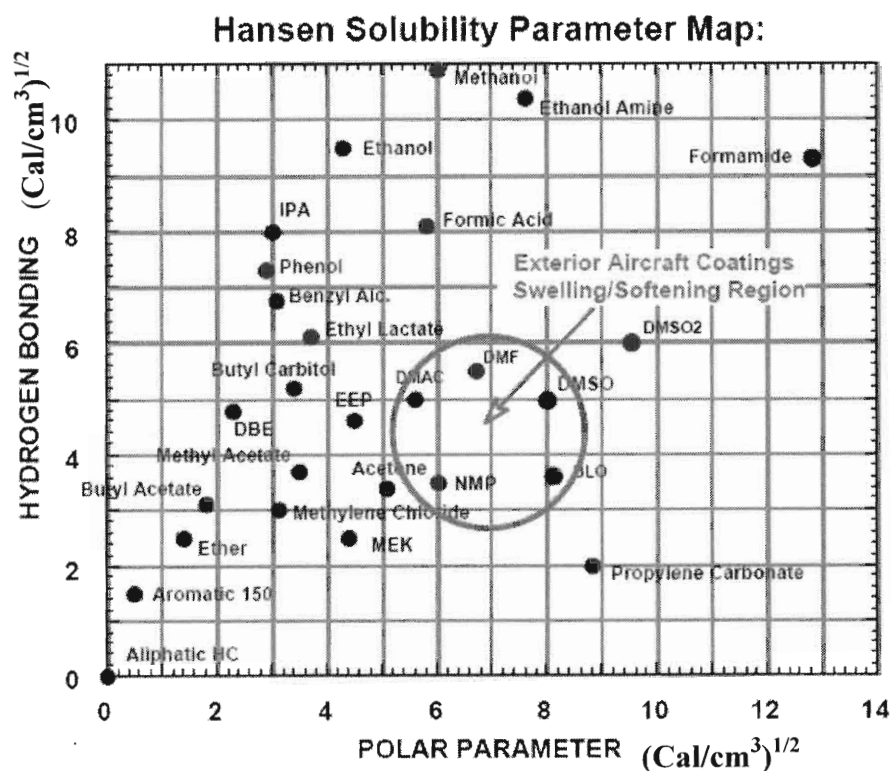
ตารางที่ 2.14 ค่าใช้จ่ายของ NMP กับ Methylene Chloride ในการลอกสี [33]

ตัวทำละลายที่ใช้ในการลอกสี	เงินลงทุน	ค่าใช้จ่ายประจำปี
Methylene Chloride Stripping	\$19,683	\$86,888
NMP Stripping	\$166,260	\$80,580

ตารางที่ 2.15 ผลการลอกสีโดยใช้ NMP [33]

ชิ้นส่วน	อุณหภูมิ °C	เวลาที่ใช้ (นาท)
Brass fitting	71	60
Brass fitting	71	70
Brass fitting	60	115
Brass fitting	60	115
Plastic-coated hook	60	115
Winshhield wiper motor	60	125
Plastic-coated bracket	60	115

Dishart et al. [34] ศึกษาเกี่ยวกับการลอกสีที่พื้นผิวภายนอกเครื่องบินโดยใช้ Dimethylsulfoxide (DMSO) โดย DMSO มีความสามารถในการละลายสารประกอบอินทรีย์หลายชนิด เป็นตัวทำละลายไม่มีกลิ่น มีจุดเดือดสูง จุดวาบไฟสูง สามารถละลายได้ดีในน้ำและตัวทำละลายส่วนใหญ่ ข้อดีของ DMSO คือมีความเป็นพิษต่ำและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ สามารถลอกผิวที่มีสมบัติ highly cross-linked polymer ได้ และได้ศึกษาการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของตัวทำละลายเพื่อเพิ่มสมบัติในการลอกสีประเภท polysulfide, water borne epoxy primer, solvent borne epoxy primer และ flexible primer ให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 2.3 แผนภาพการละลายของ Hansen แสดงสมบัติการละลายของตัวทำละลายชนิดต่างๆที่ใช้กันทั่ว โดยสามารถทำนายการละลายได้จากความมีขั้ว ซึ่งจากหลักการละลายของสารละลาย “Like-Dissolved-Like” หมายความว่า สารที่มีขั้วจะละลายได้ดีในสารที่มีขั้วเช่นกัน โดยตัวทำละลายอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว และมีบางชนิดเช่น NMP ที่เป็นสารละลายที่มีส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วจึงสามารถละลายในน้ำได้ จากการทดลองพบว่า สีประเภท Polysulfide Sealant System, Waterborne Epoxy Primer, Polyurethane Topcoat, Solventborne Epoxy Primer และ Flexible Polyurethane Primer จะมีช่วงการละลายและพันธะไฮโดรเจน อยู่ในช่วงของ n-Methyl Pyrrolidoe (NMP), Dimethylsulfoxide (DMSO), และ Dimethylformamide (DMF) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวทำละลายทั้งสามชนิดนี้เป็นองค์ประกอบหลักในตัวทำละลายทดแทน MC ได้



รูปที่ 2.3 แผนภาพการละลายของ Hansen ของตัวทำละลายบางชนิด [34]

จากตารางที่ 2.16 เมื่อทำการผสม DMSO, NMP, DMF, สารลดแรงตึงผิวและ monoethanol amine ในอัตราส่วน 32:32:32:1:2 โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถลอกสีทั้งสี่ประเภทได้ภายใน 4 ชั่วโมงและยังสามารถลอกสี Polysulfideและ Epoxy ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายออกได้ภายใน 2 ชั่วโมง และเมื่อทำการผสม DMSO, NMP, DMF และกรดฟอร์มิก ในอัตราส่วน 31:31:31:5 โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถลอกสี Polysulfide, Epoxy ที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ได้ภายใน 2 ชั่วโมงหรือน้อยกว่า ส่วนสีรองพื้น Flexible สามารถลอกได้ภายใน 4 ชั่วโมง โดยเมื่อทำการผสมสูตรอื่นเช่น DMSO, NMP, Acetone พบว่าไม่สามารถลอกสี Epoxy ที่มีตัวทำละลายอินทรีย์และสำหรับสีอื่นสามารถลอกได้ในอัตราที่ช้ากว่าปกติ

ตารางที่ 2.16 ผลการลอกสีเมื่อทำการผสม DMSO ในอัตราส่วนต่างๆ [34]

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	Polysulfide Sealant	Water Borne Epoxy Primer	Solvent Borne Epoxy Primer	Flexible Primer
DMSO:DBE ¹ :Acetone 60:30:10	✓	✓	x	✓ ✓
DMSO:DBE:Formic Acid 63:33:05	✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓
DMSO:NMP:Acetone 45:45:10	✓ ✓	✓ ✓	x	✓ ✓
DMSO:NMP:Formic Acid 48:48:05	✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓
DMSO:DMF ³ :AR-150:Surfac:MEA ² 45:35:13:1:2	✓	✓ ✓ ✓	x	x
DMSO:DMF:AR-150:Surfac:MEA 35:35:25:1:2	✓	✓ ✓ ✓	x	x
DMSO:NMP:DMF:Surfac:MEA 32:32:32:1:2	✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
DMSO:NMP:DMF:Formic Acid 31:31:31:5	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓
NH3:BnzAlc ⁴ :Surfac:MEA:Water 14:56:14:7:7.5	✓	✓ ✓	✓	x
BnzAlc:50%H ₂ O ₂ :Surfac 90:10:01	✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	x

หมายเหตุ

- ✓ ใช้เวลาในการลอกสีนานกว่า 4 ชั่วโมง
- ✓ ✓ ใช้เวลาในการลอกสีน้อยกว่า 4 ชั่วโมง
- ✓ ✓ ✓ ใช้เวลาในการลอกสีน้อยกว่า 2 ชั่วโมง
- x ไม่สามารถลอกสีได้

¹DBE = Dibasic Ester

²MEA = Monoethanol Amine

³DMF = Dimethylformamide

⁴BnzAlc = Benzyl Alcohol

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า NMP และ DMSO นั้นสามารถใช้ในการลอกสีได้จริงแต่ยังขาดการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระยะเวลาที่ใช้ในการลอกสีต่อเมื่อทำการเปลี่ยนอุณหภูมิและการนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงออกแบบการทดลองเพื่อการศึกษาถึงปัจจัยของอุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง และอัตราส่วนตัวทำละลาย NMP และ DMSO รวมถึงการนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบสีต่อไป

บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

- N-Methy-2-Pyrrolidone (NMP), Commercial Grade จากบริษัทอัลฟาเคมีคอลและเทคโน โลยี ใช้เป็นตัวทำละลายทดแทนในการลอกสี
- Dimethylsulfoxide (DMSO), GC Grade Assay 99.5% จากบริษัท Sigma-Aldrich ใช้เป็นตัวทำละลายทดแทนในการลอกสี
- Methylene Chloride (Dichloro Methane), Commercial Grade จากบริษัทอัลฟาเคมีคอลและเทคโน โลยีใช้เป็นตัวละลายในการลอกสีที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน
- น้ำยาลอกสีตัวอย่าง จากบริษัทอัลฟาเคมีคอลและเทคโน โลยี โดยใช้เป็นตัวแทนของตัวทำละลายที่มีส่วนผสมของ MC เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับ MC บริสุทธิ์
- Hydrochloric Acid Assay 37% จากบริษัท MERCK
- Sodium Hydroxide Assay 99% จากบริษัท MERCK
- Formic Acid Assay >95% จากบริษัท Sigma-Aldrich

3.1.2 แผ่นโลหะเคลือบสี

แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่ตัดให้ได้ขนาด 5x10 ตารางเซนติเมตรจำนวน 200 แผ่นที่ผ่านกระบวนการเคลือบสีพอลิยูรีเทนระบบสององค์ประกอบ ความหนาประมาณ 80 ไมครอน

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องชั่งสารความละเอียด 4 ตำแหน่ง Yamato HB220
- ชุดควบคุมอุณหภูมิ SHINKO JCS-33A พร้อม Heater ขนาด 3000 watts
- เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง inoLab pH720
- เครื่องแก้ว
- เครื่องเป่าลมร้อน (dryer)

- ตู้ปราศจากความชื้น (desiccators)
- ชุดควบคุมอุณหภูมิ
- ชุดกลั่นสารเคมี
- นาฬิกาจับเวลา
- Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) Bio-Rad FTS175
- กล้องจุลทรรศน์ Metallurgical L2003A และชุดรับภาพ moticam 1000 1.3 M กำลังขยาย 5 เท่า

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมแผ่นโลหะเคลือบสี

นำแผ่นโลหะเคลือบสังกะสีขนาดใหญ่ที่ตัดให้ได้ขนาด 5x10 ตารางเซนติเมตรและลบคมที่ขอบให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.1 มาทำการล้างคราบไขมันด้วยน้ำยาล้างคราบไขมันบริเวณชิ้นงานและทำการอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นโลหะที่เตรียมได้ ไปทำการพ่นสีรองพื้น สีทับหน้าและสีเคลือบเงาตามลำดับดังนี้



รูปที่ 3.1 แผ่นโลหะที่ตัดให้ขนาด 5x10 ตารางเซนติเมตรก่อนเคลือบรองพื้น

3.3.1.1 ขั้นตอนการพ่นสีพอลิยูรีเทน

มีอัตราส่วนผสมดังนี้ สี Dupont LE2004 Low Emission Primer Plus (Gray) : Dupont AK260: Thinner 3609S หรือ AAA อัตราส่วน 5:1:0.2 ส่วนโดยปริมาตร ใส่ลงในปืนพ่นสีพร้อมปรับแรงดันลม 2-3 บาร์ ปรับสกรูผ่านสีประมาณ 2 ½ รอบ พ่นลงบนแผ่นโลหะตามแนวนอนจนเต็มแผ่น โดยมีระยะห่างจากชิ้นงาน 15-20 เซนติเมตรและตั้งฉากกับชิ้นตัวอย่าง และพ่นจนครบ 2 รอบ ตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีจนแห้งสนิทดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผ่นโลหะหลังเคลือบชั้นรองพื้น

3.3.1.2 ชั้นสีทับหน้าโพลียูรีเทน

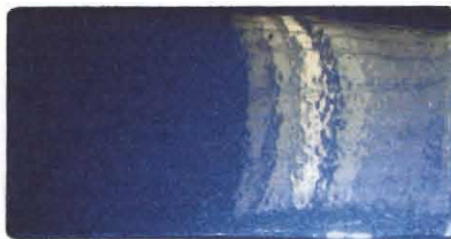
ทำการเป่าลมไล่ฝุ่นบริเวณชิ้นงานและใช้น้ำยาเช็ดคราบไขมัน ผสมสีทับหน้าโดยมีอัตราส่วนผสม ดังนี้ สี Dupont ARRK #008 รหัสสี C-6001#W605F (Polar Sea Blue) 1 ส่วน และ Thinner AAA 1 ส่วน โดยปริมาตร ใส่ในถ้วยปั่นพ่นสี พร้อมปรับแรงดันลม 2-3 บาร์ ปรับสกรูหมุนสีประมาณ 2 ½ รอบ พ่นสีในบริเวณขอบของชิ้นงานก่อนแล้วจึงพ่นบริเวณพื้นที่ด้านในจนเต็มพื้นที่พ่นจำนวน 3 รอบ โดยเทียวแรกพ่นโปรย เทียวที่ 2 พ่นกลบรอย เทียวที่ 3 พ่นเก็บเต็ม,การเก็บลาย โดยมีระยะห่างจาก ชิ้นงาน 15-20 เซนติเมตร เดินปืนพ่นสีด้วยความเร็วสม่ำเสมอ และตั้งฉากกับชิ้นงาน การพ่นทับเทียว เกยกัน 50% และตั้งทิ้งไว้ 2 ชั่วโมงจนแห้งสนิท ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผ่นโลหะหลังเคลือบชั้นทับหน้า

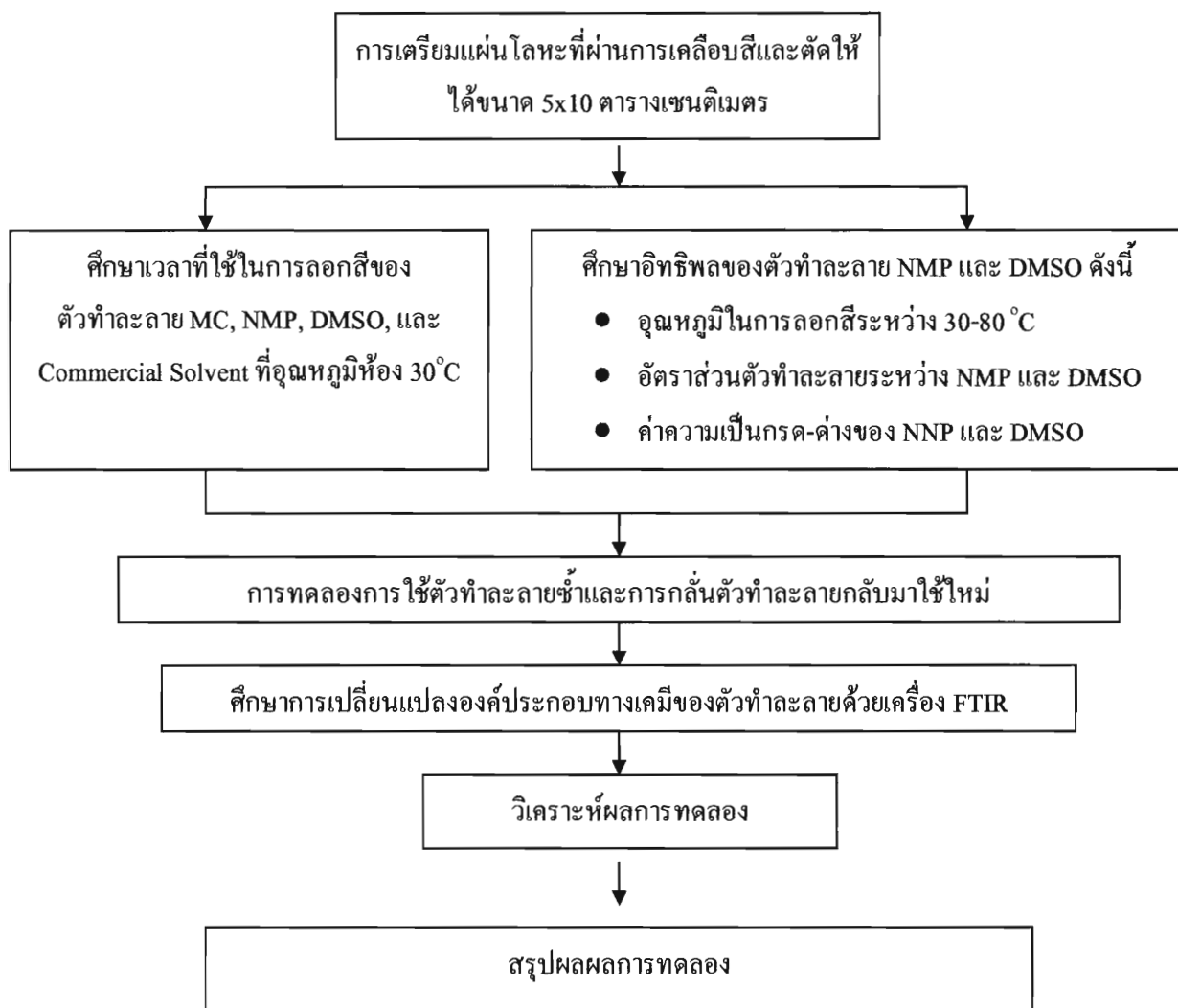
3.3.1.3 ชั้นสีแลคเกอร์

การพ่นชั้นสีแลคเกอร์สามารถทำได้โดยผสมสีอัตราส่วนผสมดังนี้ สี Dupont AX1060 3 ส่วน และสี Dupont AK260 1 ส่วน ใส่ในถ้วยปั่นพ่นสี พร้อมปรับแรงดันลม 2-3 บาร์ ปรับสกรูหมุนสีประมาณ 2 ½ รอบ พ่นสีในบริเวณขอบของชิ้นงานก่อนแล้วจึงพ่นบริเวณพื้นที่ด้านในจนเต็มพื้นที่พ่นจำนวน 3 รอบโดยมีระยะห่างจากชิ้นงาน 15-20 เซนติเมตร เดินปืนพ่นสีด้วยความเร็วสม่ำเสมอ และตั้งฉากกับ ชิ้นงาน การพ่นทับเทียวเกยกัน 50% ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงจนแห้งสนิทและนำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.4 จะปรากฏความเงาของแลคเกอร์ชั้นที่พ่นผิว



รูปที่ 3.4 แผ่นโลหะหลังเคลือบชั้นดีแลคเกอร์

เมื่อเตรียมแผ่นโลหะเคลือบสีเสร็จจึงดำเนินการทดลองตามผังการทดลอง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลอง

3.3.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของตัวทำละลายแต่ละชนิดที่อุณหภูมิห้อง $30 \pm 2^\circ\text{C}$

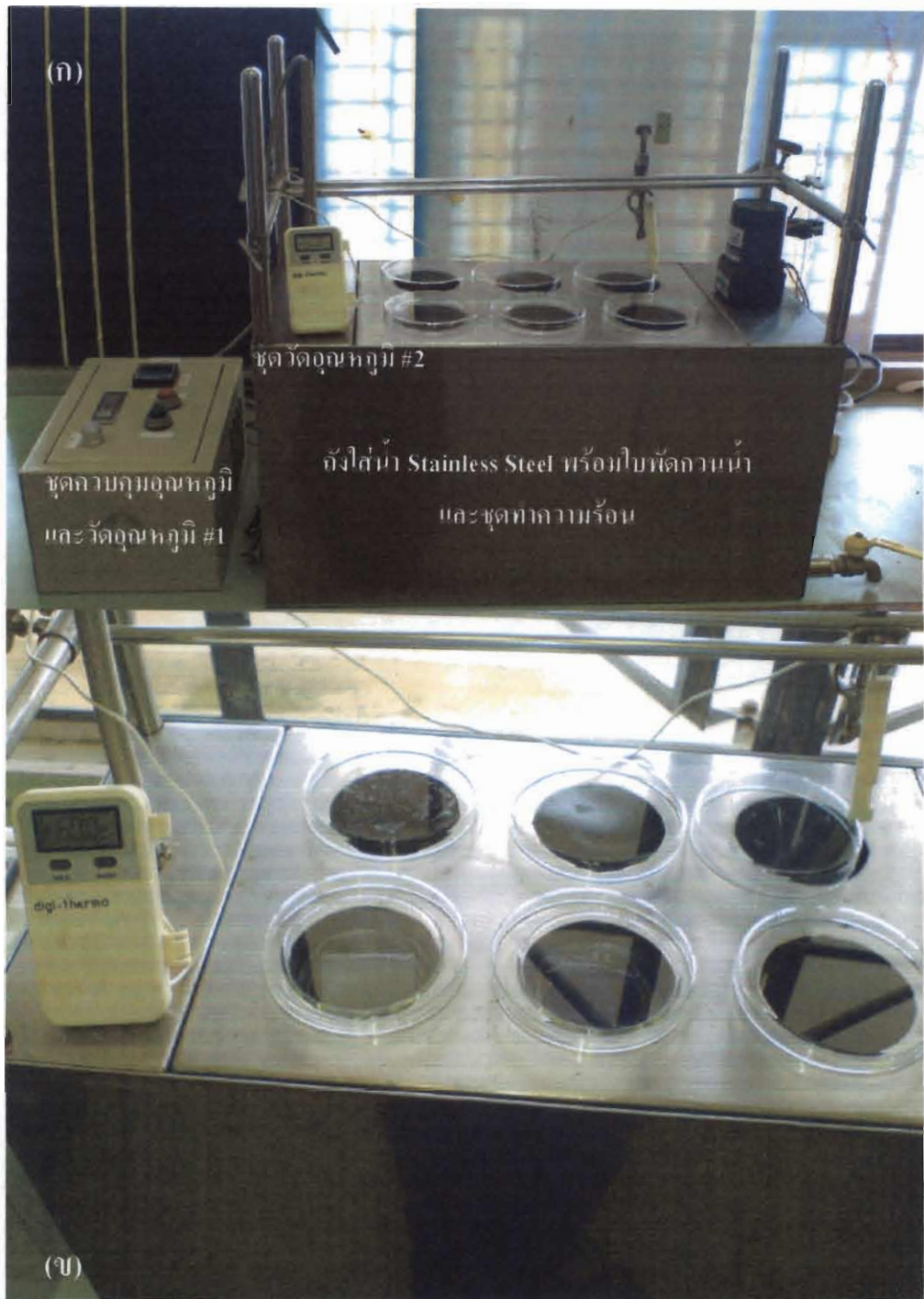
1. นำตัวทำละลาย NMP, DMSO, MC และ น้ำยาลอกสีตัวอย่างปริมาตร 400 cm^3 เทลงในบีกเกอร์ทรงสูงขนาด 400 cm^3 และนำกระจกนาฬิกาปิดทันที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิคงที่
2. นำแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบสีจุ่มลงในตัวทำละลายทุกชนิดดังรูปที่ 3.6 และเริ่มทำการจับเวลา สังเกตผลการเปลี่ยนแปลงทุก 5 นาที
3. เก็บแผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีและเก็บสารละลายแยกชนิดไว้ในส่วนของเสีย
4. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง



รูปที่ 3.6 ภาพแผ่นโลหะในตัวทำละลายขณะเริ่มทำการทดลอง

3.3.3 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการลอกสีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO

1. นำตัวทำละลาย NMP และ DMSO ปริมาตร 400 cm^3 เทลงในบีกเกอร์ทรงสูงขนาด 400 cm^3 และนำกระจกนาฬิกาปิดทันที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ในชุดควบคุมอุณหภูมิที่ $30, 40, 50, 60, 70$ และ 80°C เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ โดยจัดตามอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.7
2. นำแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบสีจุ่มลงในตัวทำละลายทุกชนิดและเริ่มทำการจับเวลา สังเกตผลการเปลี่ยนแปลงทุก 5 นาที
3. เก็บแผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีและเก็บสารละลายแยกชนิดไว้ในส่วนของเสีย
4. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง



รูปที่ 3.7 (ก) ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองทั้งหมด

(ข) ภาพแผ่นโลหะในถ้วยแต่ละลายขณะเริ่มทำการทดลอง

3.3.4 การศึกษา pH ที่เหมาะสมของตัวละลาย NMP และ DMSO

1. นำตัวทำละลาย NMP และ DMSO ปริมาตร 400 cm³ มาวัดสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ก่อนเปลี่ยน pH ของตัวทำละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 M กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 26.67 M และ NaOH เข้มข้น 5 M ให้ได้ pH 2.0, 3.5, 11.5 และ pH 13 เทลงในบีกเกอร์ทรงสูงขนาด 400 cm³ และนำกระจกนาฬิกาปิดทันที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องเพื่อปรับให้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง
2. นำแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบสีจุ่มลงในตัวทำละลายทุกชนิดและเริ่มทำการจับเวลา สังเกตผลการเปลี่ยนแปลงทุก 5 นาที
3. เก็บแผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีและเก็บสารละลายแยกชนิดไว้ในส่วนของเสีย
4. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.3.5 การศึกษาผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง NMP และ DMSO

1. นำตัวทำละลาย NMP และ DMSO ในอัตราส่วน 80:20, 60:40, 50:50, 40:60 และ 20:80 โดยปริมาตร เทลงในบีกเกอร์ทรงสูงขนาด 400 cm³ และนำกระจกนาฬิกาปิดทันที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องเพื่อปรับให้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง
2. นำแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบสีจุ่มลงในตัวทำละลายทุกชนิดและเริ่มทำการจับเวลา สังเกตผลการเปลี่ยนแปลงทุก 5 นาที
3. เก็บแผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีและเก็บสารละลายแยกชนิดไว้ในส่วนของเสีย
4. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.3.6 การศึกษากลไกการลอกสีในชั้นต่างๆของตัวทำละลาย NMP และ DMSO

1. นำตัวทำละลาย NMP และ DMSO เทในบีกเกอร์ทรงสูงขนาด 400 cm³ และนำกระจกนาฬิกาปิดทันทีตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องเพื่อปรับให้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง
2. นำแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบสีรองพื้น เคลือบสีรองพื้น+สีทับหน้า และสีทับหน้า จุ่มลงในตัวทำละลายทุกชนิดและเริ่มทำการจับเวลา สังเกตผลการเปลี่ยนแปลงทุก 5 นาที
3. เก็บแผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีและเก็บสารละลายแยกชนิดไว้ในส่วนของเสีย
4. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

3.3.7 การทดสอบการนำตัวละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

3.3.7.1 การนำกลับมาใช้ซ้ำ

1. นำตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่รวบรวมได้จากการทดลอง 3.3.2 และ 3.3.3 กรองเพื่อกำจัดชิ้นส่วนสีที่คงเหลืออยู่ออกก่อนเทลงในบีกเกอร์ทรงสูงขนาด 400 cm³ และนำกระจกนาฬิกาปิดทันที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องเพื่อปรับให้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง
2. นำแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบสีจุ่มลงในตัวทำละลายทุกชนิดและเริ่มทำการจับเวลา สังเกตการเปลี่ยนแปลง
3. เก็บแผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีและเก็บสารละลายแยกชนิดไว้ในส่วนของเสีย
4. ทำการทดลองซ้ำอีกอย่างน้อย 10 ครั้งหรือจนกว่าจะไม่สามารถลอกสีได้
5. นำตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่ผ่านการลอกสีนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี FTIR

3.3.7.2 การกลั่นตัวทำละลายที่ใช้แล้ว

1. เตรียมชุดกลั่น โดยใช้น้ำมันเป็นตัวให้ความร้อน และใช้น้ำอุณหภูมิ 10°C เพื่อผ่าน condenser ในการหล่อเย็น
2. นำเศษแก้วบรรจุในขวดก้นกลมและนำ NMP หรือ DMSO ที่รวบรวมได้จากการทดลอง 3.3.2 และ 3.3.3 บรรจุลงในขวดก้นกลม
3. กลั่น NMP โดยรองรับสารที่อุณหภูมิ 200±3°C และ DMSO ที่อุณหภูมิ 190±3°C ซึ่งเป็นจุดเดือดของตัวทำละลายแต่ละชนิด
4. เก็บตัวอย่างไว้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีด้วย FTIR
6. ทำการทดลองโดยใช้สภาวะเดียวกับ 3.3.2

3.3.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวทำละลายด้วยเทคนิค FTIR

นำตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่ไม่ผ่านการลอกสี และผ่านการลอกสีไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR และศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO ในการนำกลับมาใช้ซ้ำ รวมถึงการกลั่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

1. นำ NaCl Disc ที่ผ่านการล้างด้วยอะซิโตนและเช็ดให้แห้ง ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ (Blank)
2. หยดด้วยตัวทำละลายที่ต้องการวิเคราะห์จำนวน 3 หยดลงบนแผ่น NaCl Disc และปิดด้วย NaCl Disc อีกแผ่นหนึ่ง ตรวจสอบว่าไม่มีฟองอากาศจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR จำนวนครั้งที่สแกน 100 ครั้ง ค่าความยาวคลื่นที่วิเคราะห์ $4000-400\text{ cm}^{-1}$

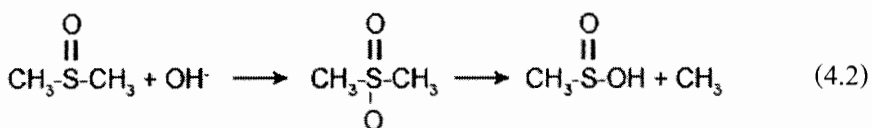
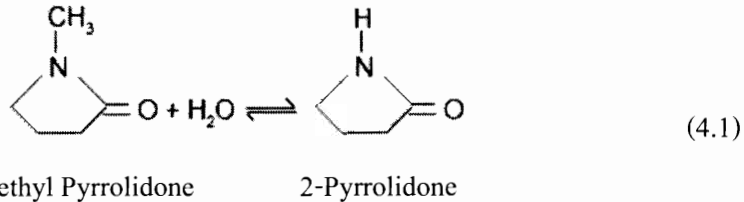
3.3.9 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และความเป็นพิษของตัวทำละลาย

เป็นการวิเคราะห์โดยนำราคาตัวทำละลายแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และทำการเปรียบเทียบค่าความเป็นพิษของตัวทำละลายที่ใช้ในการลอกสี โดยใช้ค่า Vapor Hazard Ratio ในการเปรียบเทียบความเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน

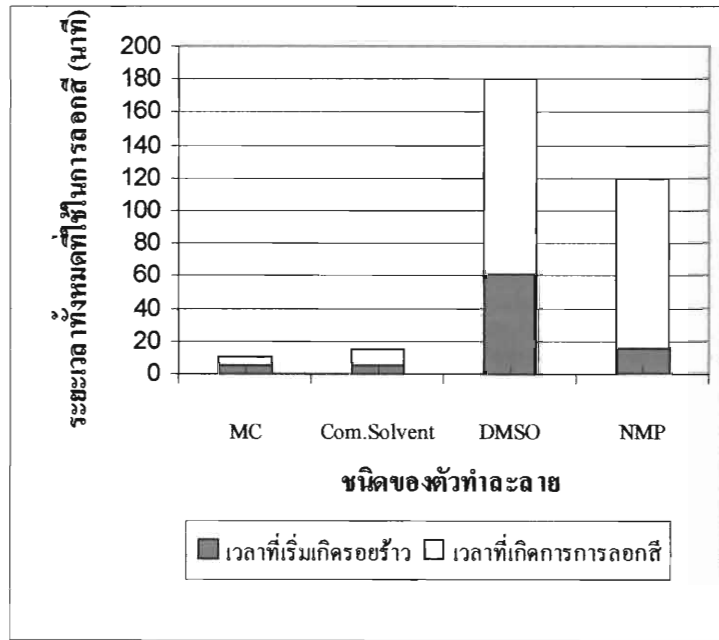
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการลอกสีเมื่อเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 30°C

จากรูปที่ 4.1 แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการลอกสีเมื่อเปลี่ยนตัวทำละลายชนิดต่างๆภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง 30°C พบว่า MC และตัวทำละลายที่มีองค์ประกอบของ MC สามารถลอกสีพอลิยูรีเทนชนิดสององค์ประกอบได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาลอกสีทั้งหมด 15 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับ NMP และ DMSO ที่มีอัตราการลอกสีที่ช้ากว่าโดยใช้เวลาในการลอกสี 120 นาทีและ 180 นาทีตามลำดับ อย่างไรก็ตาม หลังการลอกสีเสร็จสิ้นพบว่า แผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีด้วยน้ำยาลอกสีทางการค้าจะถูกกำจัดคราบสนิมออกจนหมดแต่เมื่อนำแผ่นโลหะขึ้นจากตัวทำละลายตัวอย่างจะพบคราบสนิมที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอออนของเหล็กและออกซิเจนปรากฏขึ้นบนพื้นผิวเหล็ก ขณะที่แผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีด้วย NMP และ DMSO ผิวของโลหะจะถูกเคลือบด้วยตัวทำละลายจึงสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ชั่วคราว เมื่อล้างตัวทำละลายเหล่านี้ออกด้วยน้ำประปา NMP สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดังสมการ 4.1 [35] และ DMSO สามารถรวมตัวกับน้ำดังสมการ 4.2 [36]

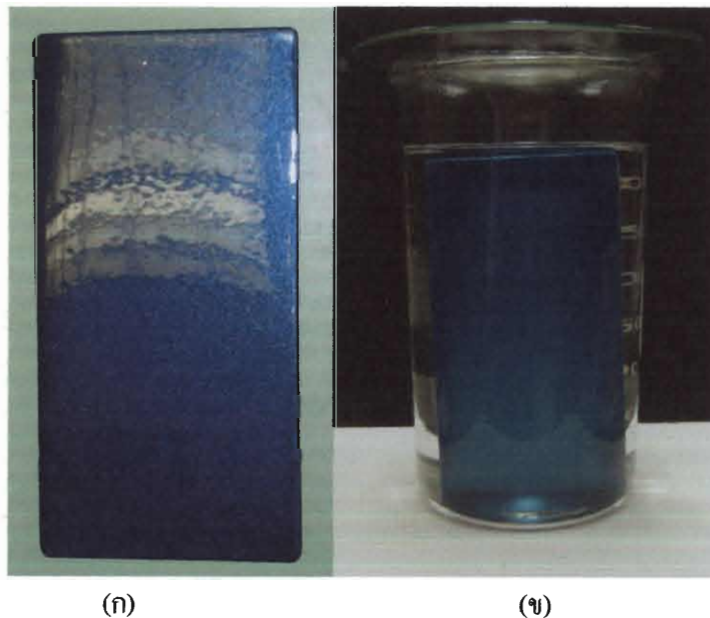


จากการทดลองเมื่อผสม NMP และน้ำในอัตราส่วน 50:50 พบว่าไม่สามารถลอกสีได้ เนื่องจาก NMP ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารประกอบ 2-Pyrrolidone ซึ่งไม่มีผลต่อการลอกสี เช่นเดียวกับ DMSO หลังจากทำปฏิกิริยากับน้ำจะไม่สามารถลอกสี เนื่องจากน้ำจะไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบที่ไม่มีผลต่อสี ดังนั้นปฏิกิริยาการลอกสีของ NMP และ DMSO จะถูกยับยั้งเมื่อนำไปอยู่ในตัวทำละลาย



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 30°C

รูปที่ 4.2 แสดงขั้นตอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการลอกสีโดยภาพ (ก) แสดงชิ้นงานก่อนการทดลอง ภาพ (ข) เป็นการจุ่มแผ่นโลหะเคลือบสีในตัวทำละลาย เมื่อเวลาผ่านไปบริเวณขอบของแผ่นโลหะจะเกิดรอยร้าวของสี ดังภาพ (ค) และเมื่อสีการลอกสีเสร็จสิ้นจะเกิดฟิล์มของสีที่ลอกออกดังภาพ (ง)



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการลอกสี (ก) ก่อนการทดลอง

(ข) เริ่มต้นการทดลอง (ค) เริ่มมีรอยร้าวของสีที่ขอบโลหะ (ง) ลอกสีเสร็จสิ้น



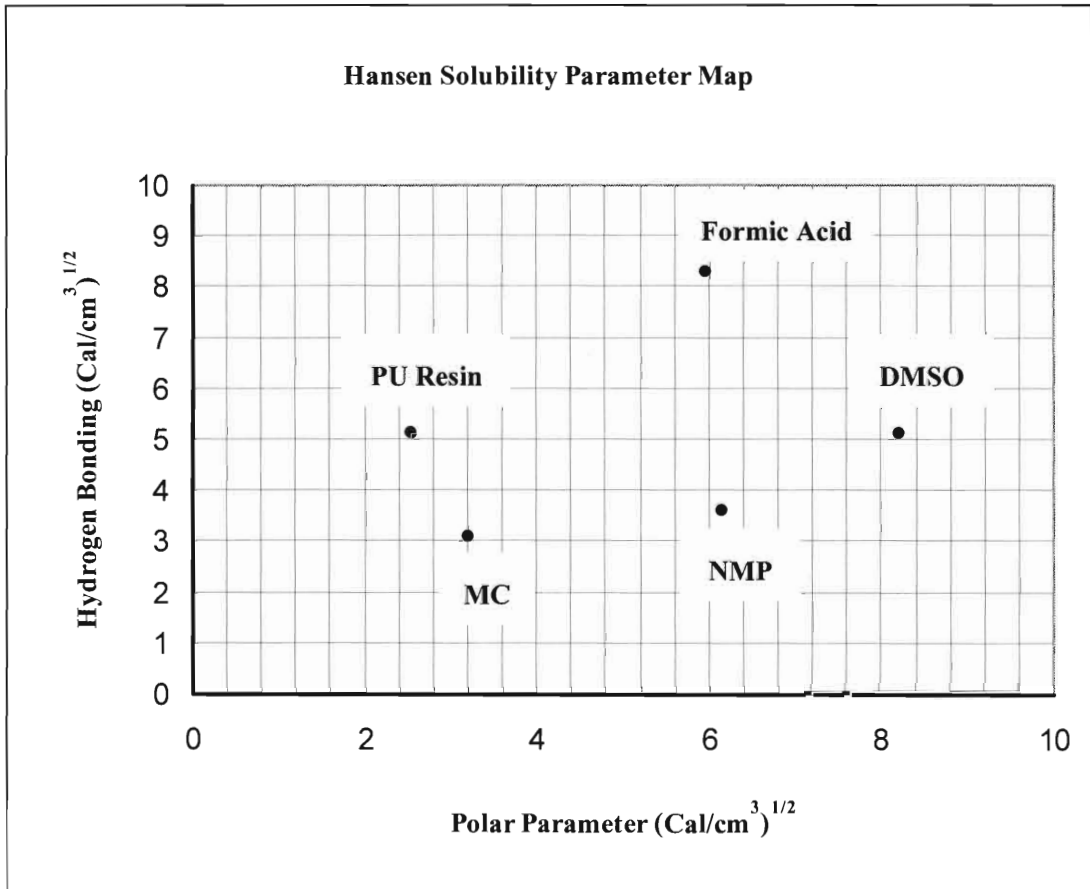
(ค)

(ง)

รูปที่ 4.2 (ต่อ) ขั้นตอนการลอกสี (ก) ก่อนการทดลอง

(ข) เริ่มต้นการทดลอง (ค) เริ่มมีรอยร้าวของสีที่ขอบโลหะ (ง) ลอกสีเสร็จสิ้น

และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 พบว่า สาเหตุที่ MC มีการตอบสนองที่ดีต่อการลอกสี เนื่องจาก MC มีค่าการละลายของควมมีขั้วอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับ PU Resin ส่วน NMP และ DMSO นั้นมีค่าการละลายที่แตกต่างจาก PU Resin ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับ MC และเมื่อค่าการละลายมีความแตกต่างกันมากจะส่งผลทำให้ใช้เวลาในการลอกสีนานขึ้น

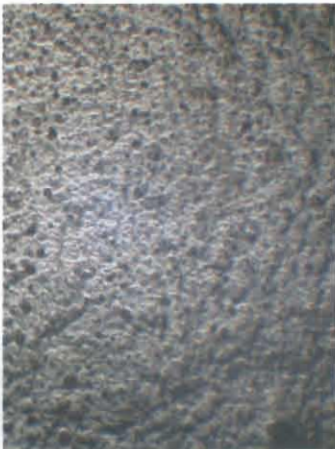


รูปที่ 4.3 แผนภาพการละลายของ Hansen [37]

จากรูปที่ 4.3 เมื่อนำแผ่นโลหะก่อนและหลังทำการเคลือบสีไปทำการถ่ายภาพด้วยเครื่อง optical microscope พบว่าแผ่นโลหะก่อนทำการเคลือบสีจะมีลักษณะขรุขระซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพื้นผิวเหล็ก แต่เมื่อนำชิ้นรองพื้นมาเคลือบทับจะทำให้ลักษณะขรุขระหายไปและมีความเรียบสม่ำเสมอมากขึ้นทำให้การยึดเกาะของสีชั้นต่อไปมีประสิทธิภาพที่ดี เมื่อมีการเคลือบชั้นสีทับหน้าและสีแลคเกอร์พบว่าลักษณะรอยขรุขระจะเปลี่ยนไปและเห็นเป็นรอยขรุขระของสีทับหน้าชัดเจนมากกว่าสีแลคเกอร์เนื่องจากสีแลคเกอร์มีความเงาสามารถสะท้อนแสงได้จึงทำให้ภาพที่ออกมามีลักษณะเรียบ แต่เมื่อนำโลหะที่ผ่านการลอกสีด้วยตัวทำละลาย NMP และ DMSO มาตรวจสอบพื้นผิวโลหะพบว่าพื้นผิวมีความคล้ายคลึงกับแผ่นโลหะก่อนการเคลือบสีซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวทำละลายไม่ได้ทำปฏิกิริยาใดๆกับพื้นผิวโลหะ แต่เมื่อนำแผ่นโลหะที่ผ่านการล้างด้วยน้ำประปาและทิ้งไว้ประมาณ 1 เดือนพบว่า แผ่นโลหะมีสนิมเกาะอยู่และเมื่อนำแผ่นโลหะที่มีสนิมมาตรวจสอบพื้นผิวพบว่าพื้นผิวเหล็กนั้นได้เปลี่ยนแปลงไปจนเห็นได้ชัด เนื่องจากพื้นผิวโลหะจะทำปฏิกิริยากับออกไซด์เกิดเป็นคราบสนิมจับตัวบนพื้นผิวโลหะทำให้แสงที่กระทบสนิมและสะท้อนกลับมาน้อยลงจึงไม่สังเกตเห็นความขรุขระของเหล็ก



พื้นผิวแผ่นเหล็ก



หลังเคลือบชั้นรองพื้น



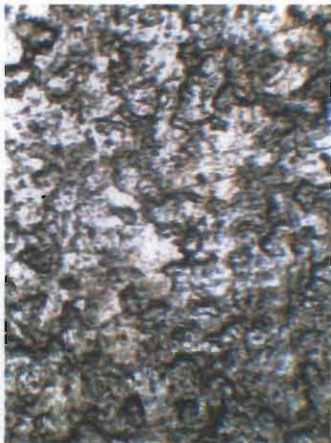
สีทับหน้า



เคลือบสีแลคเกอร์เท่านั้น



หลังเคลือบครบทั้งสามชั้น



หลังการลอกสีด้วย NMP

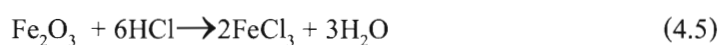
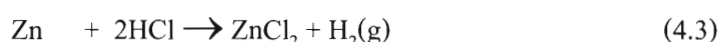


สนิมบนแผ่นเหล็ก

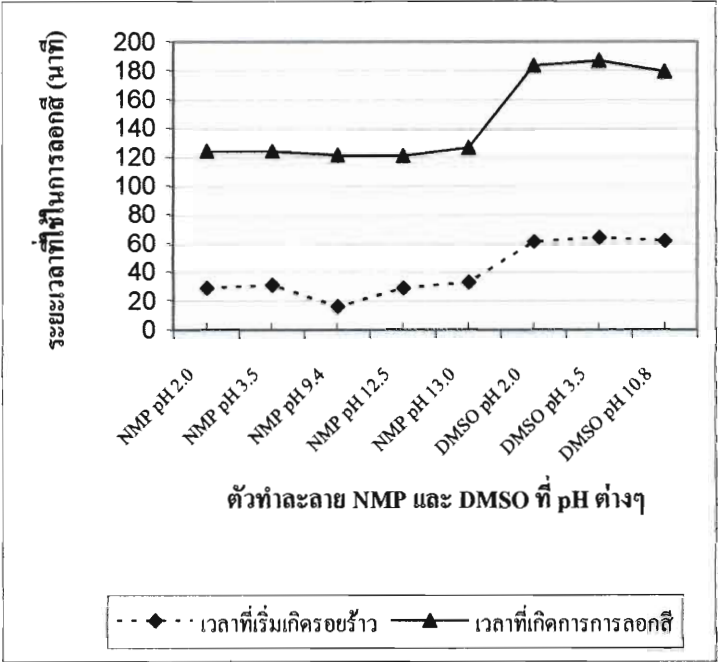
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายพื้นผิวเหล็กในขั้นตอนต่างๆ

4.2 ผลการลอกสีเมื่อปรับเปลี่ยน pH ของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30°C

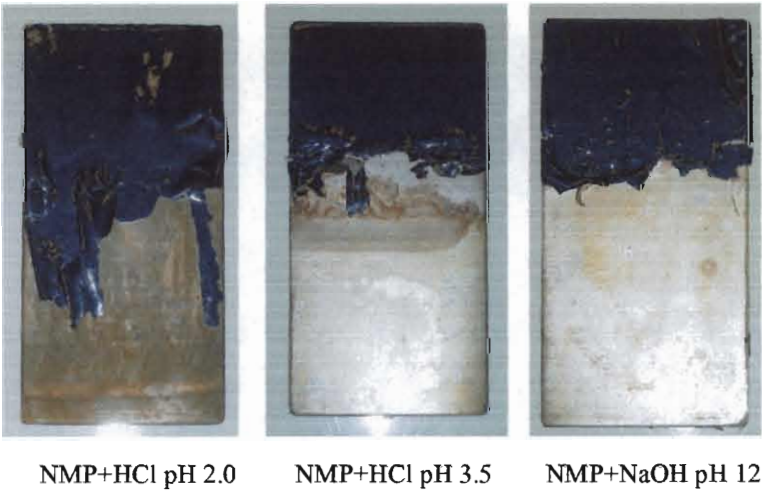
จากรูปที่ 4.5 พบว่า การเปลี่ยนค่าความเป็นกรดค่า (pH) ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ มีผลน้อยมากต่อการลอกสีด้วย NMP และ DMSO ทุกสภาวะจะใช้เวลาในการลอกสีใกล้เคียงกันประมาณ 120 นาที สำหรับ NMP และ 180 นาที สำหรับ DMSO แต่การลอกสีภายใต้สภาวะที่เป็นกรดจะช่วยให้แผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีถูกกำจัดสนิมไปในระหว่างการลอกสีโดยกรดจะทำปฏิกิริยากับสังกะสี (Zn) ที่เคลือบอยู่บนผิวหน้าของแผ่นโลหะเกิดเป็น $ZnCl_2$ และก๊าซไฮโดรเจน(H_2) ดังสมการที่ 4.3 หลังจากนั้นไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ในตัวทำละลายที่มีสภาพเป็นกรดจะไปทำปฏิกิริยาสนิมเหล็กในรูปของออกไซด์ของโลหะเกิดเป็นเกลือเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_2$ และ $FeCl_3$) และน้ำดังสมการ 4.4 , 4.5 และ 4.6 [38]



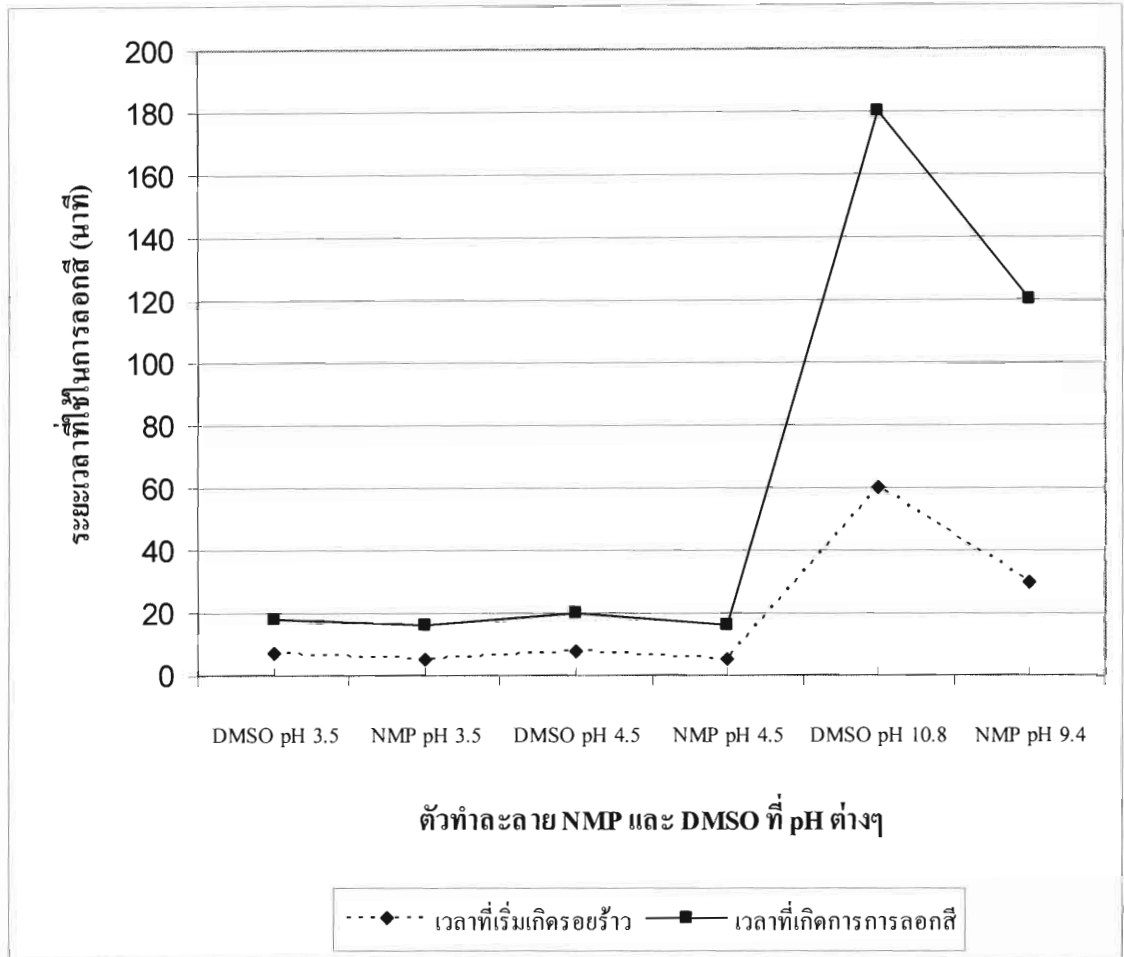
เมื่อนำแผ่นโลหะที่ผ่านการลอกสีขึ้นจากตัวทำละลายและล้างด้วยน้ำประปาพบว่าแผ่นเหล็กจะมีคราบออกไซด์ของโลหะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไอออนอิสระของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ ดังสมการที่ 4.7 และจากรูปที่ 4.6 พบว่ากรดไฮโดรคลอริกที่มี pH 2.0 จะเกิดการกัดกร่อนและสนิมทำปฏิกิริยากับพื้นผิวภายหลังจากที่นำแผ่นเหล็กขึ้นจากผิวสารละลายเนื่องจากกรดมีค่า pH ที่มากจึงทำการกัดกร่อนสังกะสีที่อยู่บนแผ่นเหล็กจนหมดทำให้พื้นผิวเหล็กไม่มีการปกป้องการเกิดสนิมดังนั้นสนิมจะเกิดขึ้นภายหลังจากการนำแผ่นโลหะขึ้นจากผิวสารละลายทันทีและที่มีสีเข้มเนื่องจากพื้นผิวเหล็กส่วนใหญ่ทำปฏิกิริยากับกรด ส่วนแผ่นโลหะหลังลอกสีด้วยกรดไฮโดรคลอริก pH 3.5 พบว่าเกิดการกัดกร่อนพื้นผิวน้อยลงแต่จะเกิดคราบสนิมบริเวณด้านบนของแผ่นโลหะทั้งนี้เกิดจากบริเวณด้านบนที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างอากาศและกรดเกิดเป็นคราบสนิมบริเวณ ส่วนแผ่นเหล็กภายหลังจากการลอกสีโดยใช้ DMSO pH 12.5 พบว่า พื้นผิวเหล็กมีเพียงร่องรอยของคราบสนิมที่เกิดจากไอออนอิสระเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวเนื่องจากการทำปฏิกิริยาหลังจากนำแผ่นเหล็กขึ้นจากตัวทำละลาย ถ้าเป็นการใช้สารละลายกรดหรือเบสที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบจะลดประสิทธิภาพของตัวทำละลายลง ดังนั้นจึงนำกรดฟอร์มิกเข้มข้น 26.67 โมลาร์มาผสมกับตัวทำละลาย NMP และ DMSO เพื่อศึกษาผลของการลอกสีในสภาวะกรดและปราศจากน้ำ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการทดลองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH ของ NMP และ DMSO ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 °C (pH ปกติของ NMP เท่ากับ 9.4 และ DMSO เท่ากับ 10.8)



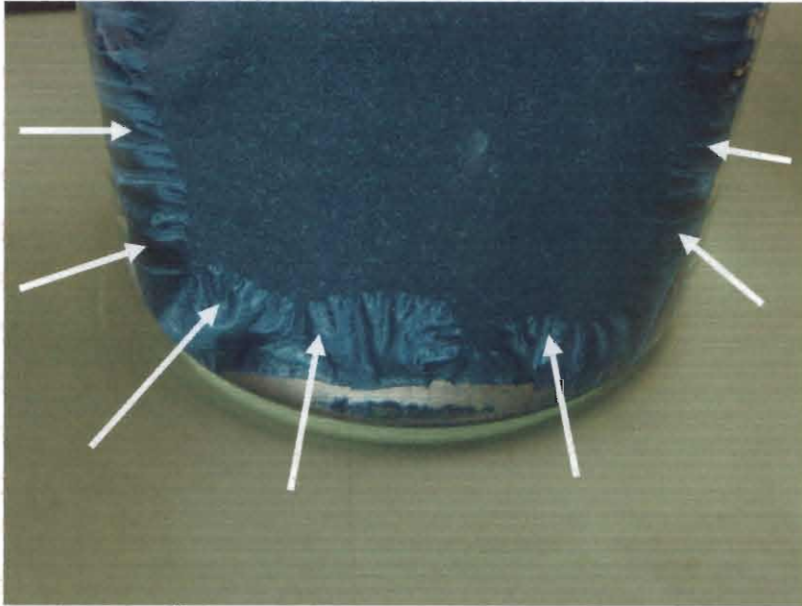
รูปที่ 4.6 ภาพแผ่นโลหะหลังจากการลอกสีด้วยตัวทำละลายผสมของ NMP และกรดที่ pH ต่างๆ



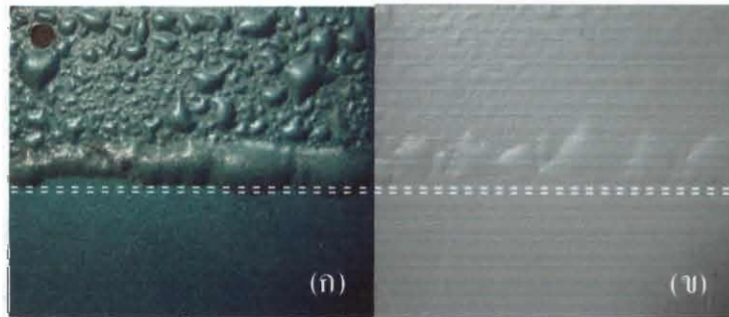
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO เมื่อปรับสถานะด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น 26.67 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30°C

จากรูปที่ 4.7 เมื่อทำการปรับ pH ของ NMP และ DMSO ด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น พบว่าเวลาที่ใช้ในการลอกสีลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากกรดฟอร์มิกที่อยู่ในตัวทำละลายจะทำลายพันธะระหว่างสีรองพื้นและพื้นผิวโลหะ ขณะที่ตัวทำละลายจะเข้าทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของเนื้อสีทำให้แผ่นฟิล์มเกิดการอ่อนตัวซึ่งทำให้กรดฟอร์มิกสามารถเข้าไปถึงพื้นผิวโลหะอย่างรวดเร็วและทำให้เนื้อฟิล์มหลุดออกเป็นแผ่นดังรูปที่ 4.8 เมื่อนำกรดฟอร์มิกเข้มข้นเพียงอย่างเดียวทดสอบการลอกสีบนแผ่นโลหะพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง สีที่เคลือบอยู่บนแผ่นโลหะเกิดฟองอากาศขึ้นจากภายใน ดังรูปที่ 4.9 แต่ยังคงไม่สามารถเกิดการลอกสีได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากกรดฟอร์มิกสามารถทำลายพันธะระหว่างชั้นรองพื้นกับพื้นผิวเหล็ก แต่ไม่สามารถทำลายพันธะออกได้ทั้งหมดเนื่องจากแผ่นฟิล์มไม่สามารถเกิดการขยายตัวได้ทำให้การแทรกซึมของกรดผ่านชั้นสีเป็นไปได้ยาก และเมื่อนำกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 โมลาร์ เพียงอย่างเดียวมาทดสอบการลอกสีบนพื้นผิวเช่นเดียวกับกรดฟอร์มิกโดยใช้แผ่นโลหะเคลือบสีแยกชั้นเพื่อศึกษาความแตกต่าง พบว่ากรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นสามารถทำให้ชั้นสีรองพื้นและ สีทับหน้าเกิดการพองออกภายในระยะเวลาน้อยกว่า 3 ชั่วโมง และ

แผ่นที่เคลือบสียครบทุกชั้นสามารถลอกสีได้หลังจากเวลาผ่าน 8 ชั่วโมง แม้ว่าการผสมกรดฟอร์มิกลงในตัวทำละลายจะช่วยลดระยะเวลาในการลอกสี แต่พื้นผิวของโลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างรวดเร็วทำให้พื้นผิวขรุขระไม่เรียบดังรูปที่ 4.10 ซึ่งอาจจะทำให้เกิดปัญหาในการพ่นสีครั้งต่อไปหรือจะทำให้ชิ้นงานขาดความคงทนแข็งแรง ไม่เหมาะกับการนำมาใช้งาน



รูปที่ 4.8 ภาพพื้นผิวโลหะเมื่อลอกสีด้วยกรดฟอร์มิกในตัวทำละลาย NMP

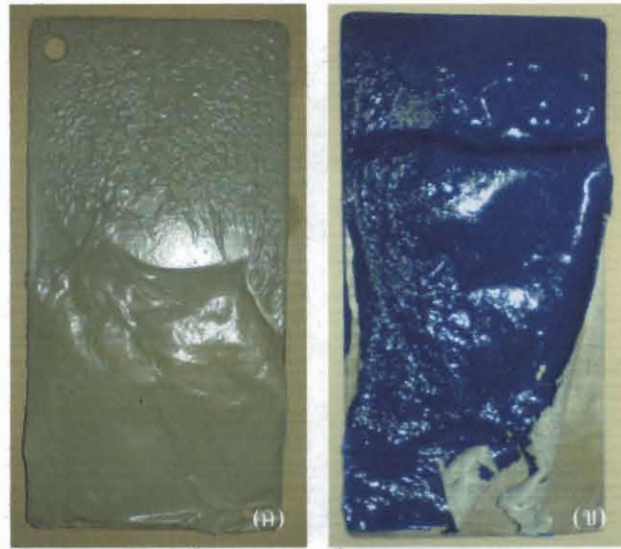


พื้นผิวที่ผ่านการลอกสี

พื้นผิวก่อนการลอกสี

รูปที่ 4.9 พื้นผิวของ (ก) สียรองพื้น+สีทับหน้า+สีแลคเกอร์

(ข) สียรองพื้น หลังการลอกสีด้วยกรดฟอร์มิกเข้มข้น 22.67 โมลาร์

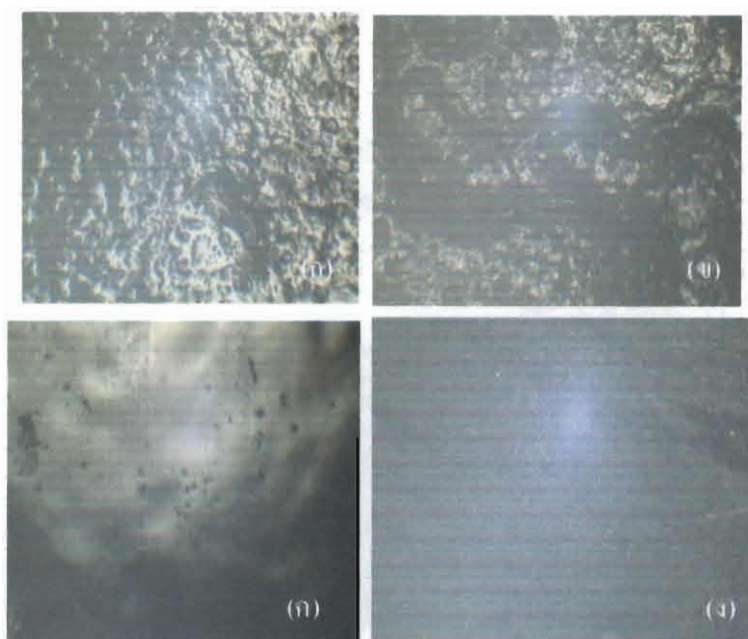


รูปที่ 4.10 ภาพแสดงพื้นผิว (ก) สีรองพื้น (ข) สีรองพื้น+ทับหน้า+แลคเกอร์หลังจากลอกสีด้วย กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 โมลาร์เป็นเวลา 1 วัน

เมื่อนำแผ่นโลหะหลังการลอกสีด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 22.67 โมลาร์ ถ่ายด้วยเครื่อง optical microscope ดังรูปที่ 4.11 พบว่าพื้นผิวของสีทุกชั้นยังคงคล้ายกับก่อนการลอกสีแค่จะเห็นการพองที่เกิดจากการขยายตัวของสีเนื่องจากกรดฟอสฟอริกมีความสามารถในการเข้าไปขยายพันธะของสีได้แต่ยังคงมีอัตราการขยายตัวของพันธะที่น้อยกว่าตัวทำละลาย และจากรูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวโลหะหลังการลอกสีด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37 โมลาร์ พบว่าความเป็นคลื่นมากกว่าการใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นและภาพถ่ายพื้นผิวโลหะหลังการลอกสีพบว่าความขรุขระของเหล็กหายไปเนื่องจากพื้นผิวเหล็กได้ทำปฏิกิริยากับกรดเกิดเป็นการกัดกร่อนพื้นผิวทำให้พื้นผิวเหล็กมีความราบเรียบมาก ดังนั้นการนำไปใช้งานจึงไม่เหมาะสมเนื่องจากพื้นผิวไม่เหมาะกับการยึดเกาะของสีหรือเกาะได้ไม่ดี ดังนั้นการจะนำไปใช้งานจะต้องไปทำการปรับพื้นผิวใหม่ก่อนการเคลือบสี



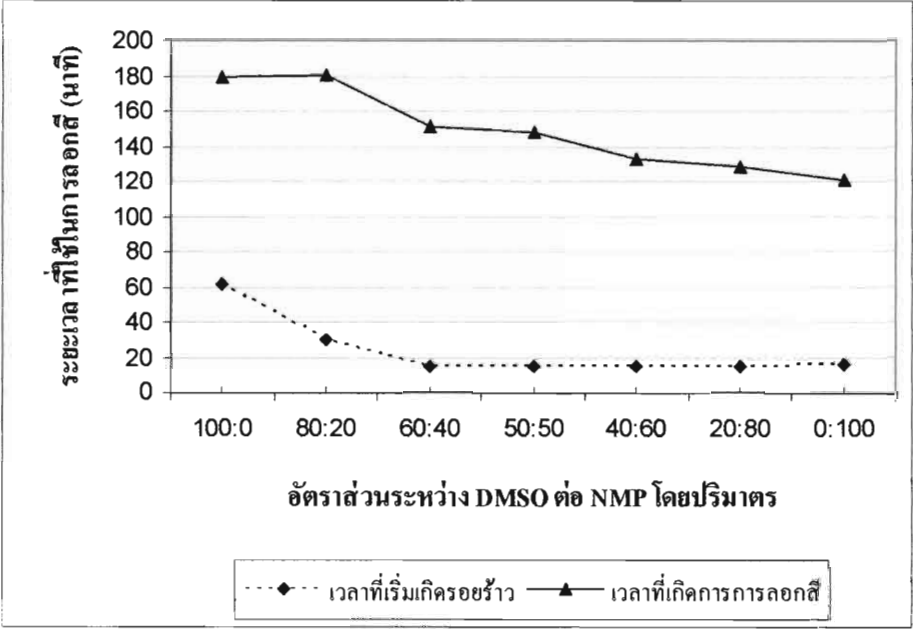
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายพื้นผิวโลหะหลังการลอกสีด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้นชั้นต่างๆ
(ก) สีรองพื้น (ข) สีรองพื้น+สีทับหน้า (ค) สีรองพื้น+สีทับหน้า+แลคเกอร์



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายพื้นผิวโลหะหลังการลอกสีด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นต่าง
(ก) สีรองพื้น (ข) สีรองพื้น+สีทับหน้า (ค) สีรองพื้น+สีทับหน้า+แลคเกอร์
(ง) พื้นผิวเหล็กหลังการลอกสี

4.3 ผลการลอกสีเมื่อใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO และ NMP ที่อุณหภูมิ 30°C

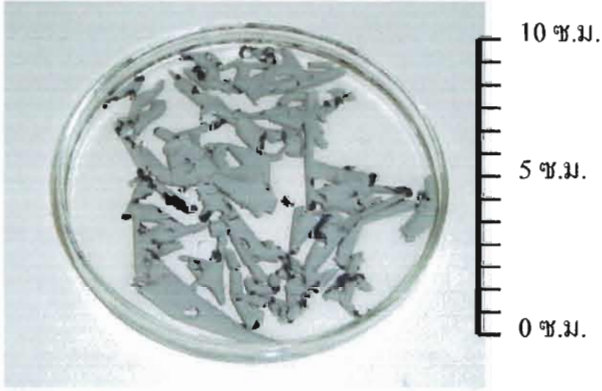
จากรูปที่ 4.13 พบว่า เวลาที่ใช้ในการลอกสีลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ NMP ให้สูงขึ้น เมื่อมีปริมาณของ DMSO มากกว่า 60% ขึ้นไปจะส่งผลให้ลักษณะเนื้อฟิล์มเกิดการขยายตัวและหลุดออกจากแผ่นโลหะ โดยที่ยังคงสภาพเป็นแผ่นฟิล์มที่มีขนาดประมาณประมาณ 5x10 ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ 4.14 แต่ในทางกลับกันเมื่อมีปริมาณ NMP ในปริมาณที่สูงกว่า 40% ขึ้นไป นอกจากจะทำให้ระยะเวลาในการเกิดรอยร้าวบนแผ่นฟิล์มลดลงแล้วยังทำให้ชิ้นส่วนของเนื้อฟิล์มเกิดการขยายตัวและ NMP จะเข้าไปทำลายพันธะบางส่วนของเนื้อฟิล์มทำให้เกิดการฉีกขาดออกเป็นชิ้นส่วนเล็กๆขนาดประมาณ 2x3 ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ 4.15 โดยเมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้และขนาดของชิ้นส่วนเนื้อฟิล์มที่สะดวกต่อการกำจัดพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของ DMSO ต่อ NMP คือ 60:40 โดยปริมาตร ซึ่งใช้ระยะเวลาในการลอกสีประมาณ 150 นาที ทั้งนี้เนื่องจาก NMP มีปริมาณที่มากพอที่จะไปทำให้แรงในการยึดเกาะของสีบนแผ่นโลหะลดลงและมี DMSO ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้แผ่นฟิล์มที่ลอกออกมีขนาดใหญ่ซึ่งสะดวกต่อการนำไปกำจัดหลุดออกมาเป็นแผ่นฟิล์มขนาดใหญ่ซึ่งสะดวกต่อการนำไปกำจัด



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกฟิล์มโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO:NMP ที่ 30°C



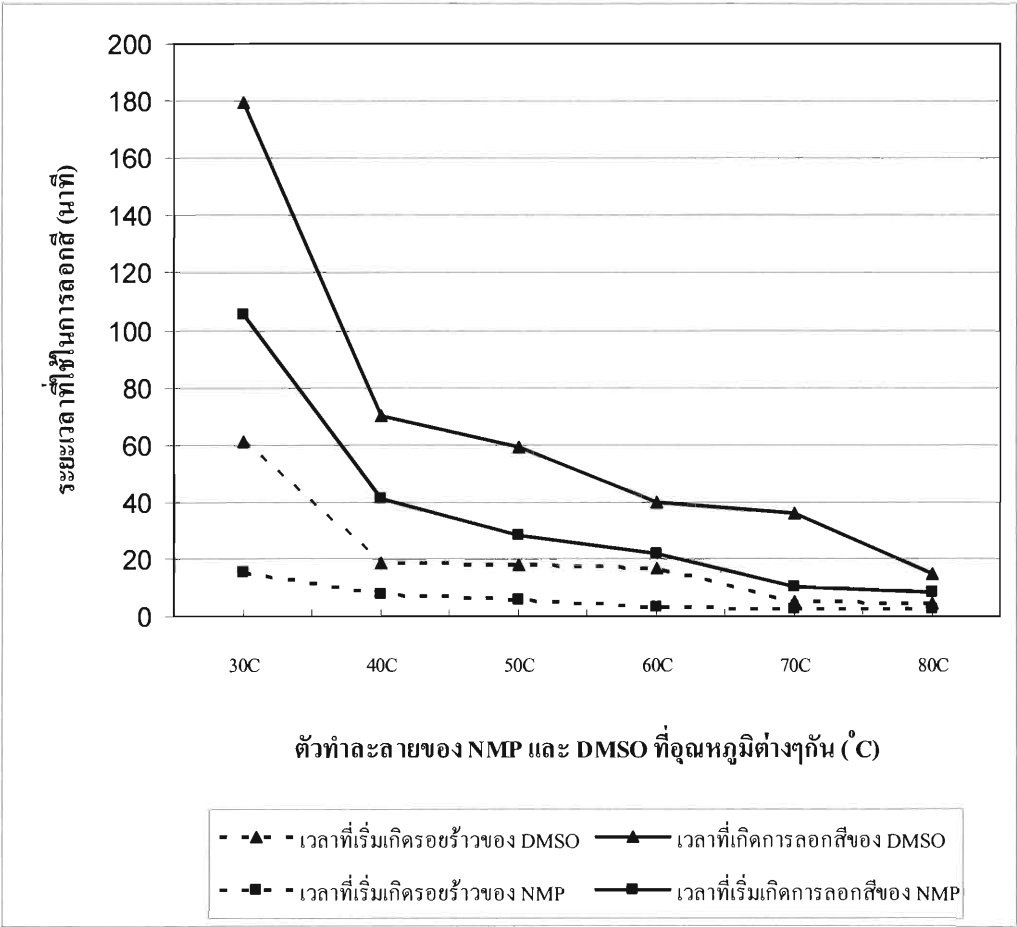
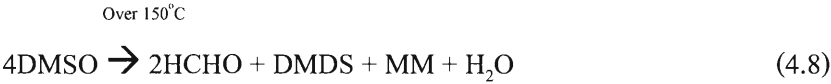
รูปที่ 4.14 ภาพฟิล์มที่ลอกออกเมื่อมีปริมาณของ DMSO มากกว่า 60% ในสารละลาย



รูปที่ 4.15 ภาพฟิล์มที่ลอกออกเมื่อมีปริมาณของ NMP มากกว่า 40% ในสารละลาย

4.4 ผลการลอกสีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 80°C

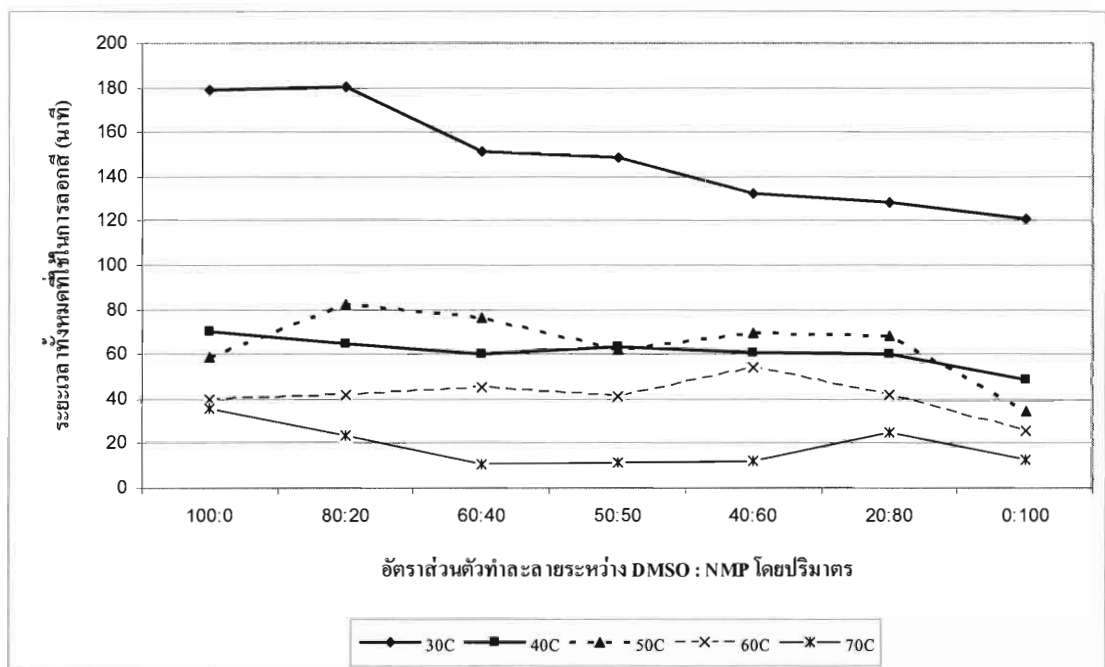
จากรูปที่ 4.16 พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิสามารถลดระยะเวลาในการลอกสีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO จากเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง 30°C NMP และ DMSO ใช้เวลาในการลอกสี 120 และ 180 นาทีตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็น 80°C จะใช้เวลาในการลอกสีลดลงเหลือ 10 และ 15 นาทีตามลำดับซึ่งใกล้เคียงกับการลอกสีด้วย MC ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานจลน์ที่สูงขึ้นทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายมีพลังงานมากพอที่จะไปทำลายพันธะระหว่างพื้นผิวโลหะและสีชั้นรองพื้นรวมทั้งพันธะระหว่างโมเลกุลของสีทำให้กลไกการลอกสีเกิดได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เวลาในการลอกสีลดลงแต่อัตราการระเหยของตัวทำละลายจะสูงขึ้น โดยเฉพาะตัวทำละลาย DMSO จะสลายตัวเกิดที่อุณหภูมิ 150°C เป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษสูงขึ้น [39] และไม่มีผลต่อการลอกสี ดังสมการ 4.8



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-80°C

4.5 ผลการลอกสีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-70°C

รูปที่ 4.17 แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการลอกสีของตัวทำละลายผสมระหว่าง NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-70°C โดยพบว่าระยะเวลาลอกสีลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ สภาวะที่สามารถลอกสีได้เร็วที่สุดภายใน 11 นาทีคือที่อุณหภูมิ 70°C และอัตราส่วน DMSO:NMP เป็น 60:40 โดยที่เนื้อฟิล์มที่ลอกออกมีลักษณะคล้ายกับการลอกสีด้วย DMSO เนื้อฟิล์มมีขนาดใหญ่ทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บ แม้ว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อการลดระยะเวลาลอกสีแต่ไม่ควรเกินอุณหภูมิการสลายตัวของตัวทำละลายนั้นๆ [39]



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการลอกสีของตัวทำละลายผสมระหว่าง NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-70°C

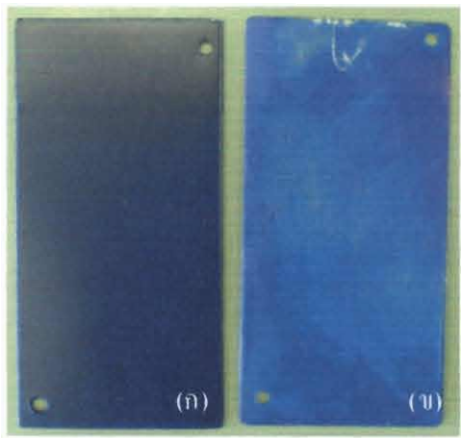
4.6 การศึกษากลไกการลอกสีชั้นต่างๆของตัวทำละลาย NMP และ DMSO

จากตารางที่ 4.1 พบว่า NMP นั้นมีผลกระทบต่อสีชั้นแลกเกอร์และสีทับหน้า ส่วนสีรองพื้นมีกระทบน้อยมาก โดยพบว่าเวลาที่ใช้ในการลอกสีในชั้นสีทับหน้าและสีแลกเกอร์ใช้เวลาในการลอกสีเพียง 15 นาที ส่วนสีรองพื้นยังคงติดแน่นอยู่บนแผ่นเหล็กโดยไม่มีการเปื้อนขูดหรือหลุดลอกออก ส่วน DMSO นั้นสามารถลอกสีออกได้ทุกชั้นรวมถึงสีรองพื้นแต่เวลาที่ใช้ในการลอกสีรองพื้นเพียงอย่างเดียวและสีรองพื้น+สีทับหน้านั้นใช้เวลามากกว่าการลอกสีครบทั้งสามชั้น ส่วนการลอกสีแลกเกอร์และสีทับหน้า+แลกเกอร์นั้นใช้เวลาใกล้เคียงกับ NMP แต่ลักษณะฟิล์มหลังการลอกสีแตกต่างกัน เมื่อพิจารณา

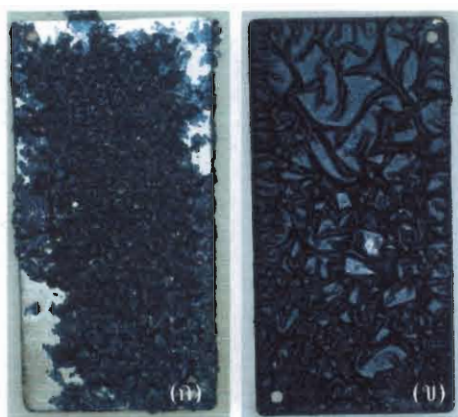
จากรูปที่ 4.18 พบว่า NMP นั้นไม่สามารถลอกสีรองพื้นออกได้เลยแต่ NMP สามารถละลายสีทับหน้า ซึ่งมีสีน้ำเงินให้ออกมาอยู่ในสารละลายได้ทำให้สีที่เกาะอยู่บนแผ่นโลหะมีลักษณะจางลง แต่เมื่อพิจารณาการลอกสีสีทับหน้า+แลคเกอร์โดยใช้ NMP พบว่า NMP สามารถทำให้สีเกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วและเกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็กดังรูปที่ 4.19 (ก) ส่วนการลอกสีแลคเกอร์ด้วย NMP จะทำให้สีแลคเกอร์เกิดการอ่อนตัวละลายออกมาเล็กน้อยและเกิดการอ่อนตัวคล้ายวุ้นและลอกออกเป็นชิ้นเล็กดังรูปที่ 4.20 (ก) คาดว่าสีทับหน้าเกิดพันธะที่แข็งแรงขึ้นกับสีแลคเกอร์ เมื่อชั้นแลคเกอร์เกิดการลอกตัวจึงทำให้สีทับหน้าหลุดออกมาพร้อมกัน แต่เมื่อไม่มีแลคเกอร์จะสามารถละลายสีทับหน้าออกมาได้แต่ชั้นสีรองพื้นยังคงอยู่

ตารางที่ 4.1 เวลาที่ใช้ในการลอกสีของ NMP และ DMSO ของสีชั้นต่างๆ

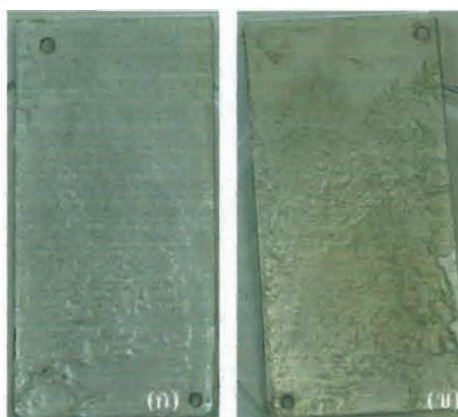
ชั้นสี	สีรองพื้น		สีรองพื้น+ทับหน้า	
ตัวทำละลาย	NMP	DMSO	NMP	DMSO
เวลาที่ใช้ (นาท)	ไม่เกิดการลอกสี	220	ไม่เกิดการลอกสี	250
ลักษณะฟิล์ม	ชั้นรองพื้นไม่มี การเปลี่ยนแปลง	ชั้นรองพื้นหลุด ออกเป็นแผ่นฟิล์ม ขนาดใหญ่	สีทับหน้าละลาย อยู่ในตัวทำละลาย แต่ชั้นรองพื้นไม่ เปลี่ยนแปลง	สีทับหน้าละลาย อยู่ในตัวทำละลาย และชั้นรองพื้น หลุดออกเป็น แผ่นฟิล์มขนาด ใหญ่
ชั้นสี	สีแลคเกอร์เท่านั้น		สีทับหน้า+สีแลคเกอร์	
ตัวทำละลาย	NMP	DMSO	NMP	DMSO
เวลาที่ใช้ (นาท)	15	17	15	17
ลักษณะฟิล์ม	มีลักษณะเป็นรอย แตกย่อยขนาดเล็ก ทัวทั้งแผ่นแต่ไม่ หลุดออกจากแผ่น โลหะ	มีลักษณะเป็นรอย แตกย่อยขนาดเล็ก ทัวทั้งแผ่นแต่ไม่ หลุดออกจากแผ่น โลหะ	มีลักษณะเป็นรอย แตกย่อยขนาดเล็ก ทัวทั้งแผ่นแต่ไม่ หลุดออกจากแผ่น โลหะ	มีลักษณะเป็นรอย แตกย่อยขนาดเล็ก ทัวทั้งแผ่นแต่ไม่ หลุดออกจากแผ่น โลหะ



รูปที่ 4.18 ชั้นสีรองพื้นและสีทับหน้า (ก) ก่อนการลอกสี (ข) หลังการลอกสีด้วย NMP

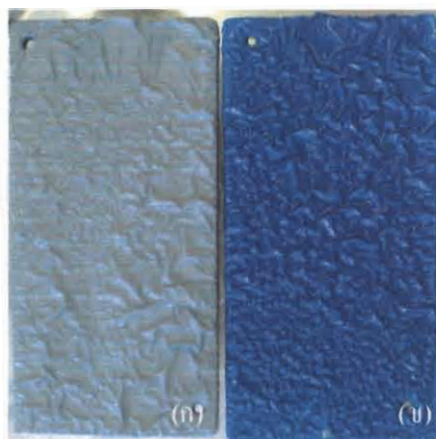


รูปที่ 4.19 รูปของชั้นสีทับหน้า+แลคเกอร์หลังการลอกสีด้วย (ก) NMP (ข) DMSO



รูปที่ 4.20 รูปของชั้นแลคเกอร์เพียงอย่างเดียวหลังการลอกสีด้วย (ก) NMP (ข) DMSO

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19 (ข) ซึ่งเป็นการลอกสีโดยใช้สีรองพื้นและสีทับหน้าโดยใช้ DMSO พบว่า DMSO นั้นจะไปทำให้ชั้นสีแลคเกอร์เกิดการขยายตัวและพองออกเป็นแผ่นใหญ่แตกต่างจากการลอกสีของ NMP เมื่อทำการทดสอบลอกสีแลคเกอร์ด้วย DMSO พบว่าลักษณะสีที่ลอกออกคล้ายกับ NMP ดังรูป 4.20 (ข) แต่เวลาที่ใช้ในการลอกสีนานกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อนำ DMSO มาทำการลอกสีรองพื้น ดังรูปที่ 4.21 (ก) และสีรองพื้น + สีทับหน้าดังรูปที่ 4.21 (ข) คาดว่า DMSO นั้นสามารถทำให้โมเลกุลของสีรองพื้นเกิดการขยายตัวออกพร้อมกับการขยายตัวของชั้นแลคเกอร์ ซึ่งสนับสนุนให้การลอกสีของทั้งสามชั้นเร็วยิ่งขึ้น และลักษณะฟิล์มมีขนาดใหญ่กว่าการลอกด้วย NMP



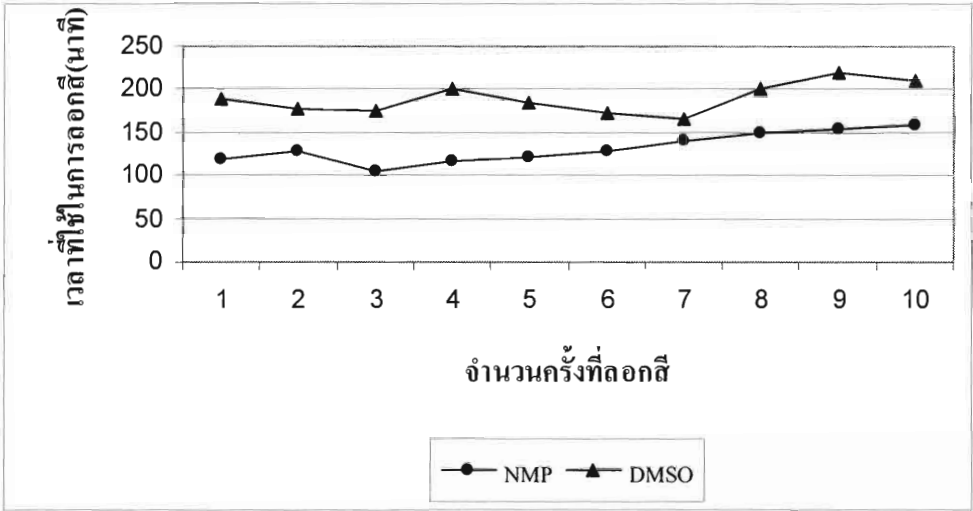
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายแผ่นเคลือบสีภายหลังการลอกสีด้วย DMSO
(ก) สีรองพื้น (ข) สีทับหน้า+สีรองพื้น

4.7 การนำกลับมาใช้ใหม่ของ NMP และ DMSO

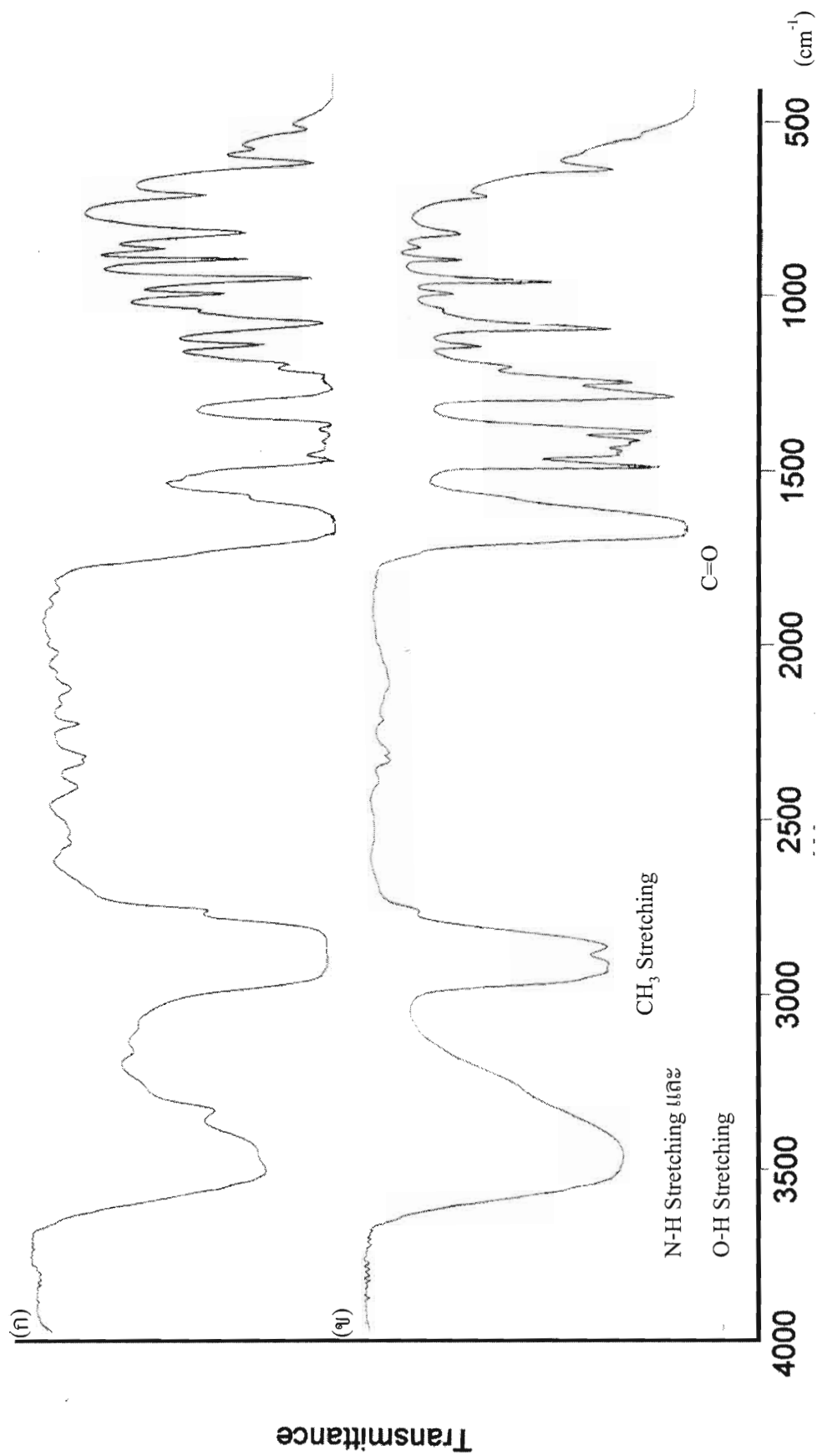
4.7.1 การใช้ซ้ำของ NMP และ DMSO

รูปที่ 4.22 พบว่าการใช้ซ้ำของตัวทำละลาย NMP และ DMSO สามารถทำได้แต่เวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อผ่านการใช้งานไปจนถึงครั้งที่ 10 เมื่อนำตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่ผ่านการลอกสีแล้วไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR ดังรูปที่ 4.23 และ 4.24 เมื่อพิจารณารูปที่ 4.23 พบว่าที่ความยาวคลื่นในช่วง $3400-3500\text{ cm}^{-1}$ อาจจะเป็นหมู่ของ N-H Stretching หรือหมู่ของ O-H Stretching หลังการลอกสี 10 ครั้ง พบว่าความเข้มของกราฟที่ $3400-3500\text{ cm}^{-1}$ เพิ่มขึ้น เนื่องจากปรากฏหมู่ N-H มากขึ้น และหมู่ฟังก์ชันที่ $2800-2900\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ของ CH_3 Stretching นั้นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 4.1 [36] โดยจะเกิดขึ้นเนื่องจาก NMP สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นในบรรยากาศและเสื่อมสภาพลงตามจำนวนครั้งที่ใช้งาน เช่นเดียวกับ DMSO เมื่อพิจารณารูปที่ 4.24 เมื่อ DMSO ที่ผ่านการใช้ซ้ำ 10 ครั้งจะพบหมู่ฟังก์ชันที่ $3400-3500\text{ cm}^{-1}$ มีค่าสูงขึ้นมาก ขณะที่หมู่ CH_3 Stretching ที่ $2900-3000\text{ cm}^{-1}$ มีค่าลดลง เนื่องจาก DMSO นั้นสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีหมู่ O-H เพิ่มขึ้นและหมู่ CH_3 ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 4.2 [35] ทำให้ประสิทธิภาพของ DMSO จะลดลงเมื่อมีการใช้งานมากขึ้นคาดว่าจะเกิดจากการทำ

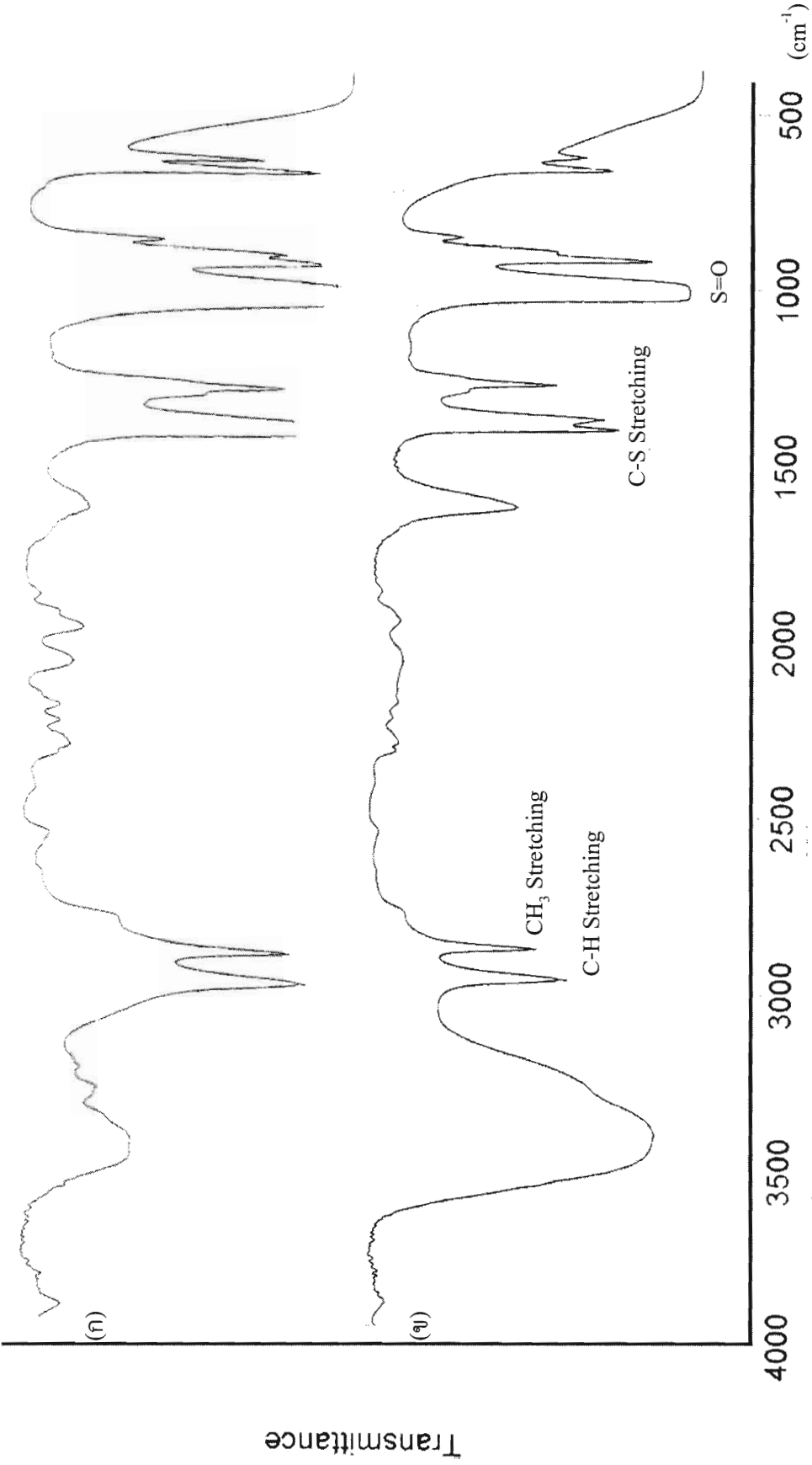
ปฏิกิริยากับความชื้นในบรรยากาศเนื่องจากปริมาณสารหลังการใช้งานเพิ่มมากขึ้นหลังจากการใช้งานอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.22 เวลาที่ใช้ในการลอกสีในการใช้ซ้ำของตัวทำละลาย NMP และ DMSO



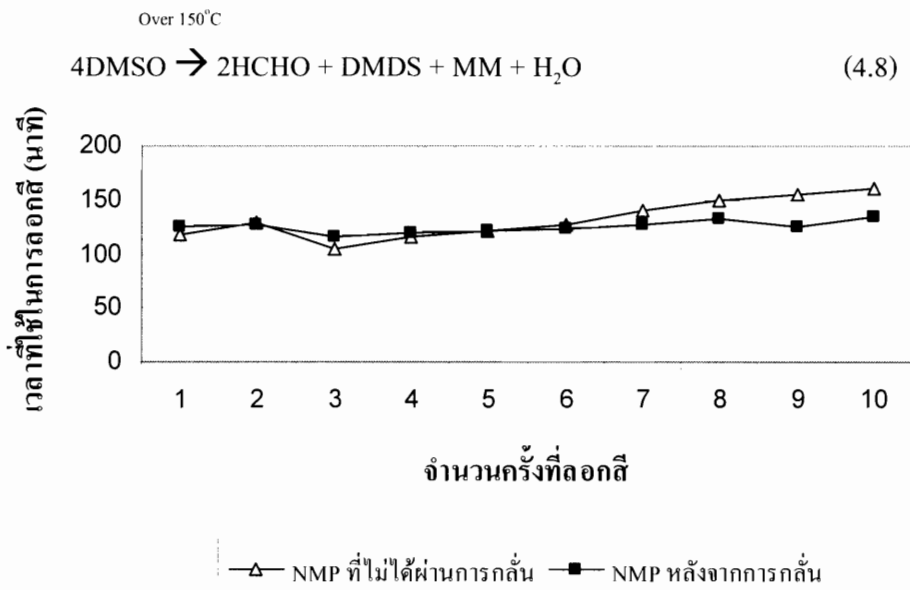
รูปที่ 4.23 กราฟ FTIR ของตัวทำละลาย NMP (ก) ก่อนทำการทดลอง (ข) หลังจากผ่านการกลั่นแล้ว 10 ครั้ง



รูปที่ 4.24 กราฟ FTIR ของตัวทำละลาย DMSO (ก) ก่อนทำการทดลอง (ข) หลังจากการลอกสีแล้ว 10 ครั้ง

4.7.2 การกลั่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ของ NMP และ DMSO

เมื่อนำตัว NMP และ DMSO ไปกลั่นที่อุณหภูมิ $200 \pm 2^\circ\text{C}$ และ $190 \pm 2^\circ\text{C}$ ซึ่งเป็นจุดเดือดของตัวทำละลายตามลำดับ พบว่าภายหลังการกลั่น DMSO มีลักษณะเป็นสารละลายใสไม่มีสี มีกลิ่นเหม็นคล้ายแก๊สซุนด์ม ส่วน NMP มีลักษณะคล้ายน้ำมันใสสีเหลืองอ่อนมีกลิ่นเหม็นคล้ายกับตัวทำละลาย NMP บริสุทธิ์ และเมื่อทำการทดสอบการลอกสีพบว่า NMP ที่ผ่านการกลั่นจะใช้เวลาในการลอกสีใกล้เคียงกับ NMP ที่ไม่ผ่านการลอกสีดังรูปที่ 4.26 แต่ DMSO ภายหลังการกลั่นแล้วไม่สามารถลอกสีออกจากแผ่นโลหะได้ ทั้งนี้เนื่องจาก DMSO เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่ 4 ชนิดได้แก่ formaldehyde, dimethyl disulfide, methyl mercaptan และน้ำดังสมการ 4.8 [39]



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลการใช้ซ้ำของ NMP ที่ผ่านการกลั่นเปรียบเทียบกับ NMP ที่ยังไม่ได้ผ่านการกลั่น

สารที่เกิดกลั่นคล้ายแก๊สซุนด์มคือ methyl mercaptan ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นทั้ง 4 ชนิดไม่มีผลต่อการลอกสี ดังนั้น DMSO จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีกลั่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากความร้อนจะทำให้ DMSO เกิดการสลายตัว ขณะที่ NMP สามารถใช้เทคนิคการกลั่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่การนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการกลั่นยังเป็นวิธีที่ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนและสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก วิธีที่เหมาะสมในการใช้ตัวทำละลาย NMP และ DMSO อย่างคุ้มค่า คือการนำตัวทำละลายที่ผ่านการลอกสีแล้วกลับมาใช้ซ้ำ แต่มีข้อจำกัดคือตัวทำละลายจะต้องปราศจากน้ำ เพราะทั้ง NMP และ

DMSO สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของตัวทำละลายเสื่อมลง

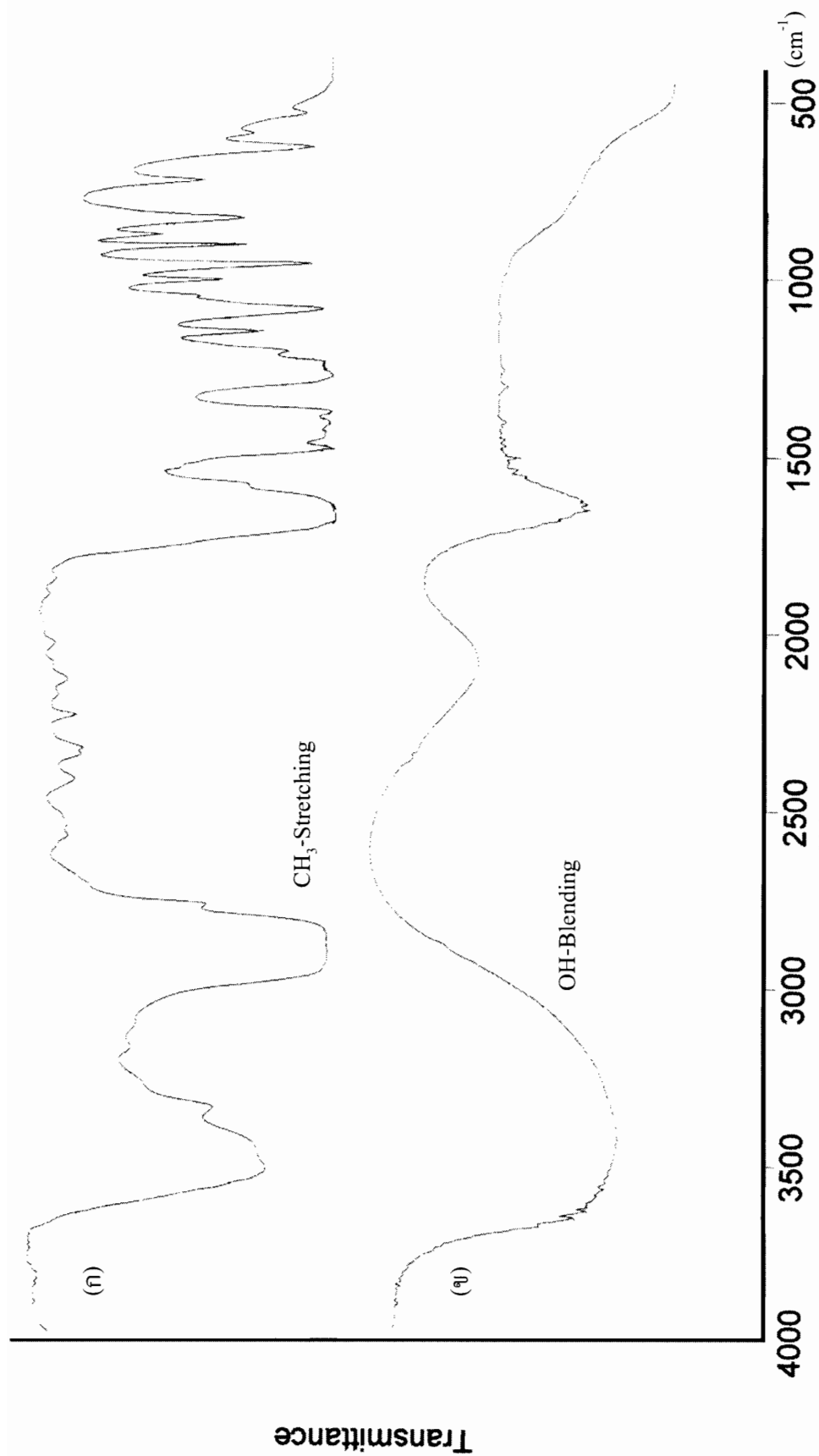
เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงสมบัติทางกายภาพของ NMP และ DMSO ภายหลังจากใช้ซ้ำและการกลั่น ภายหลังจากใช้ซ้ำทั้ง NMP และ DMSO จะมีสีเข้มขึ้นจากเดิม ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของตัวทำละลายซึ่งยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย FTIR ภายหลังจากการกลั่น แม้ว่า NMP มีสมบัติทางกายภาพเหมือนกับ NMP ที่ผ่านการใช้ซ้ำแต่กราฟ FTIR ดังรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี โดยพบว่าพีคที่ความยาวคลื่น 3000-3500 cm^{-1} ของหมู่ OH นั้นมีปริมาณมากและหมู่ CH_3 -Stretching ที่หายไป เนื่องจากปฏิกิริยากับน้ำที่คาดว่า จะมาจากการกลั่นภายใต้สภาวะที่มีความชื้นในบรรยากาศสูงทำให้อิอน้ำสามารถรวมตัวกับ NMP และเกิดปฏิกิริยากลายเป็น Pyrrolidone

ตารางที่ 4.2 สมบัติของ NMP และ DMSO ภายหลังจากใช้ซ้ำและผ่านการกลั่น

	การใช้ซ้ำ		การกลั่น	
	NMP	DMSO	NMP	DMSO
สีของตัวทำละลายก่อนใช้งาน	ใสสีเหลืองอ่อน	ใสไม่มีสี	ใสสีเหลืองอ่อน	ใสไม่มีสี
สีของตัวทำละลายหลังการลอกครั้งที่ 1	ใสสีเหลืองอ่อน	ใสไม่มีสี	ใสสีเหลืองอ่อน	ใสไม่มีสี
สีของตัวทำละลายหลังการลอกครั้งที่ 10	ใสสีน้ำตาลเข้ม	ใสสีเหลือง	ใสสีน้ำตาลเข้ม	*
กลิ่นของตัวทำละลาย				
ก่อนทำการทดลอง	กลิ่นเหม็นคาว	ไม่มีกลิ่น	กลิ่นเหม็นคาว	ไม่มีกลิ่น
หลังทำการทดลอง	กลิ่นเหม็นคาว	ไม่มีกลิ่น	กลิ่นเหม็นคาว	กลิ่นฉุนและเหม็น

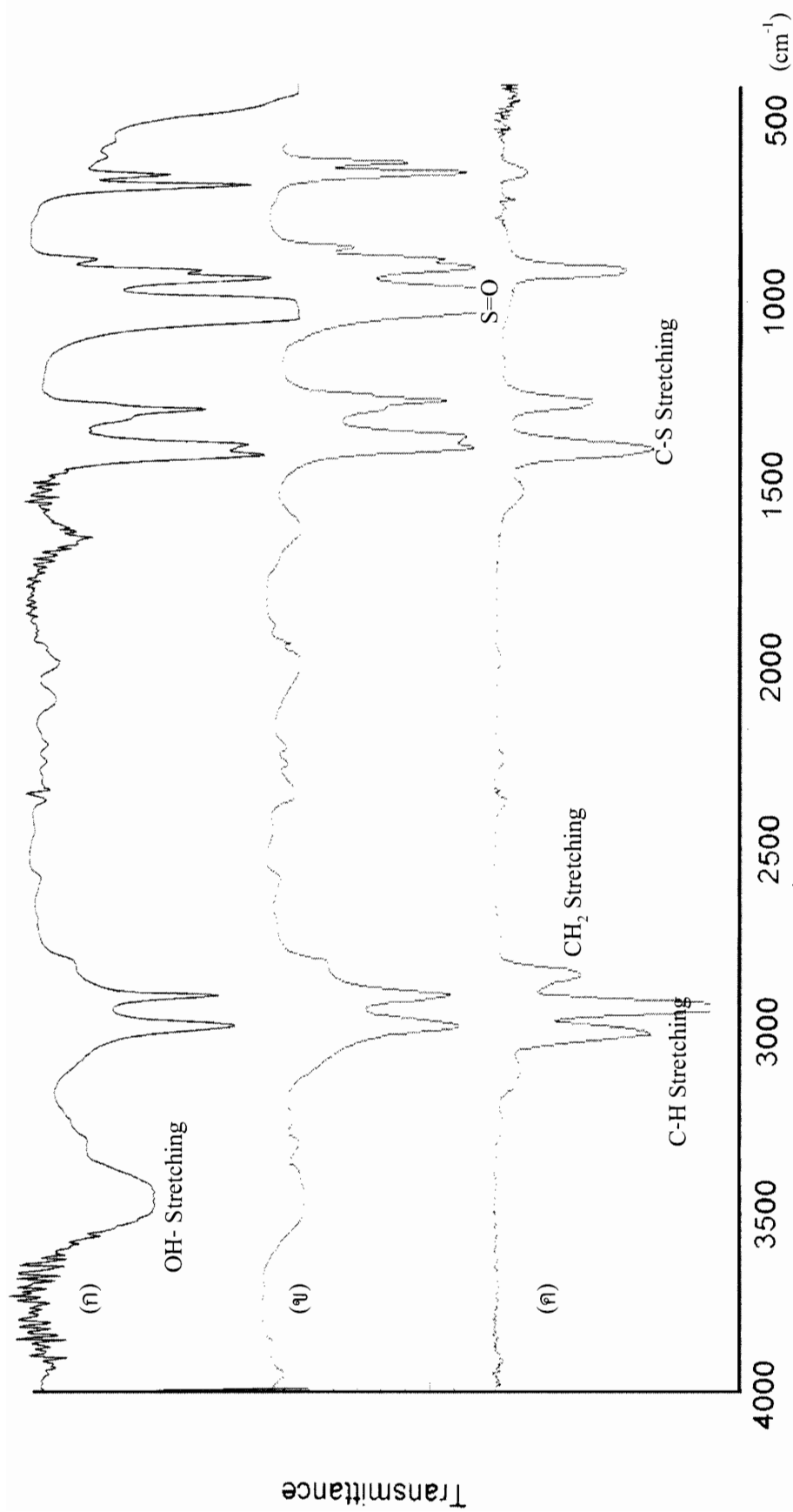
*เนื่องจาก DMSO หลังการกลั่นไม่มีผลต่อการลอกสีดังนั้นจึงไม่มีผลของการลอกสีครั้งที่ 10

จากรูปที่ 4.26 เมื่อพิจารณาสมบัติทางเคมีของ NMP โดยใช้เครื่อง FTIR พบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักของ NMP ที่ 3300-3400 cm^{-1} มีความกว้างมากทำให้ยากต่อการจำแนกหมู่ฟังก์ชันของ N-H Stretching รวมถึง CH_3 Stretching ด้วย แต่ยังคงเห็นหมู่ฟังก์ชันที่ 1680 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ของ C=O โดยที่สาเหตุที่สามารถใช้ลอกสีได้ใกล้เคียง NMP ก่อนการกลั่นนั้นคาดว่าจะเป็เพราะหมู่ฟังก์ชันหลักของ NMP ยังคงอยู่ครบ แต่ถูกบดบังจากหมู่ O-H ซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนของน้ำเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 4.26 กราฟ FTIR ของ (ก) ตัวทำละลาย NMP ก่อนการใช้งาน (ข) ตัวทำละลาย NMP หลังการกลั่น

จากตารางที่ 4.2 พบว่าสมบัติทางกายภาพของ DMSO หลังการกลั่นนั้นมีสีที่คงเดิมแต่มีกลิ่นฉุนและเหม็น เมื่อตรวจสอบสมบัติทางเคมีจากการวิเคราะห์โดยใช้ FTIR พบว่ากราฟมีลักษณะคล้าย DMSO ก่อนการกลั่นแต่พีกที่ปรากฏนั้นมีลักษณะแหลมยาวและชัดเจนเมื่อนำกราฟของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวจากสมการที่ 4.8 ประกอบไปด้วย Formaldehyde (HCHO), DMDS ($\text{C}_2\text{H}_6\text{S}_2$), MM (CH_4S) และ น้ำ (H_2O) โดยพบพีกที่ระบุได้ว่าน่าจะมาจากกราฟของ DMSD พีกของ HCHO และ H_2O ดังรูปที่ 4.27 มารวมกัน เมื่อนำตัวทำละลาย DMSO ที่กลั่นได้มาทำการทดลองลอกสีพบว่า DMSO หลังการกลั่นไม่มีความสามารถในการลอกสี



รูปที่ 4.27 กราฟ FTIR ของ (ก) ตัวทำละลาย DMSO หลังการกลั่น (ข) DMSO บริสุทธิ์ (ค) DMSO บริสุทธิ์ [40]

4.8 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์และความเป็นพิษของ NMP และ DMSO เปรียบเทียบกับ MC

จากตารางที่ 4.3 เนื่องจาก NMP และ DMSO ไม่มีค่า TLV-TWA ดังนั้นในการเมื่อเปรียบเทียบค่า Exposure Limit (TLV-TWA) ของ MC กับ NMP และ DMSO จะใช้ค่า Workplace Environmental Exposure Limit (WEEL) ในการเปรียบเทียบ ทั้งนี้เนื่องจากทั้ง NMP และ DMSO ยังไม่ถูกจัดเป็นสารอันตรายต่อสุขภาพเมื่อเทียบกับ MC โดยจากค่า TLV-TWA ของ MC อยู่ที่ 50 ppm ส่วน NMP และ DMSO นั้นมีค่า WEEL เท่ากับ 10 ppm ซึ่งถ้าดูจากค่า TLV-TWA ของ MC จะมีค่ามากซึ่งแสดงถึงปริมาณหรือความเข้มข้นที่ผู้ทำงานได้รับสารโดยไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพนั้นมีค่ามาก ส่วน NMP และ DMSO นั้นเมื่อพิจารณาถึงความเป็อันตรายต่อร่างกายเมื่อได้รับเข้าไปพบว่า มีความเป็นอันตรายสูงกว่า MC อย่างไรก็ตาม MC ก็ยังมีอันตรายสูงกว่า NMP และ DMSO เนื่องจาก ค่า Vapor Pressure ของ MC สูงกว่า NMP และ DMSO และเมื่อนำ Vapor Pressure มาคำนวณหาค่าความเข้มข้นของไออิมตัวที่ 20°C หรือ Saturation Concentration ซึ่งมีหน่วยเป็น ppm มาหาค่า Vapor Hazard Ratio(VHR) โดยใช้สูตร ตามสมการที่ 4.9

VHR = Saturation Concentration (ppm)/ Exposure Limit (ppm) (4.9)

ตารางที่ 4.3 ค่า VHR ของ NMP, DMSO และ MC [41]

Solvent	Exposure Limit (ppm)	Vapor Preesure (mmHg)***	Saturation Conc (ppm)	VHR
NMP*	10	0.3	394	39
DMSO**	10	0.6	789	79
MC	50	350	460,526	9,210

* ใช้ค่า Workplace Environmental Exposure Limit:WEEL แทน

* *ใช้ค่า Dupont AEL Exposure Limit เนื่องจากไม่มีการกำหนดค่า TLV-TWA

*** ความดันไอที่ 20°C 760 mmHg

โดยที่ความเข้มข้นของไออิมตัวคำนวณจาก (Vapor Pressure, mmHg) / 760) x 10⁶ เมื่อพิจารณาค่า VHR ของ NMP และ DMSO พบว่า มีค่าน้อยกว่า MC อยู่ประมาณ 236 และ 116 เท่า ตามลำดับ ค่า VHR ของตัวทำละลายผสมหาได้จากสมการ 4.10 ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.4

$$VHR = [(\% \text{ ของ NMP } \times VHR_{NMP}) + (\% \text{ ของ DMSO } \times VHR_{DMSO})]/100 \tag{4.10}$$

ตารางที่ 4.4 ค่า VHR ของตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO : NMP และระดับอันตรายในการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลาย MC

อัตราส่วน DMSO:NMP โดยปริมาตร	ค่า VHR	เมื่อใช้นำไปงานจะมีอันตรายน้อยกว่า MC
100:0	79	117
80:20	71	130
60:40	63	146
50:50	59	156
40:60	55	167
20:80	47	196
0:100	39	236

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.4 พบว่า DMSO:NMP ที่อัตราส่วน 60:40 จะลดอันตรายต่อสุขภาพและลดอัตราการปล่อยออกสู่อากาศน้อยกว่า MC 146 เท่า ซึ่งมีความเป็นอันตรายน้อยกว่าการใช้ DMSO เพียงชนิดเดียว

ตารางที่ 4.5 ราคาตัวทำละลาย DMSO และ NMP ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

อัตราส่วน DMSO:NMP โดยปริมาตร	ค่าใช้จ่ายต่อ 1 kg.(บาท)
100:0	600*
80:20	501
60:40	402
50:50	353
40:60	303
20:80	204
0:100	105**

*ราคาขายส่ง DMSO Horse Store เกรด industrial เมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2550

**ราคาขายส่ง NMP บริษัท Song Ann Co. LTD เกรดทั่วไป เมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2550

จากการวิเคราะห์ต้นทุนของตัวทำละลายแต่ละชนิดพบว่า ราคาจำหน่ายต่อกิโลกรัมของน้ำยาลอกสี MC เป็นเงิน 162 บาท*¹ NMP เป็นเงิน 105 บาท และ DMSO เป็นเงิน 600 บาท สำหรับราคาของตัวทำละลายผสมแสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่อนำอัตราส่วนของ DMSO ต่อ NMP ในอัตราส่วน 60:40 มาเปรียบเทียบกับ NMP และ DMSO เพียงอย่างเดียว พบว่าราคาต่อลิตรของตัวทำละลายผสมจะแพงกว่าการใช้ NMP เพียงอย่างเดียวประมาณ 297 บาท แต่ประหยัดกว่าการใช้ DMSO เพียงอย่างเดียวอยู่ประมาณ 198 บาท โดยที่ลักษณะฟิล์มที่ลอกออกจะใกล้เคียงกับการลอกสีด้วย DMSO แม้ว่า MC จะมีราคาถูกกว่าแต่มีอัตราการระเหยสูงกว่าทำให้ต้องใช้ MC ในปริมาณที่มากกว่าดังนั้นตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO และ NMP จึงน่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในกระบวนการลอกสีเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและอันตรายของผู้ใช้งาน

¹ ราคาขายส่งน้ำยาลอกสี MeCl ชื่อ 3108CID เมื่อวันที่ 22 ตุลาคม 2550

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ตามหัวข้อการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1.1 การศึกษาการลอกสีด้วยตัว NMP และ DMSO ที่สภาวะต่างๆ

การทดลองเมื่อใช้ตัวทำละลายที่มีองค์ประกอบของ MC และตัวทำละลาย MC เพียงอย่างเดียวจะใช้เวลาในการลอกสี PU น้อยกว่า 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง แต่ตัวทำละลาย NMP และ DMSO ใช้ระยะเวลาในการลอกสีมากกว่า โดย NMP จะใช้เวลาในการลอกสีประมาณ 120 นาที ส่วน DMSO จะใช้เวลาในการลอกสีประมาณ 180 นาที แผ่นฟิล์มของสีที่หลุดออกของ MC และ NMP จะมีลักษณะคล้ายกันโดยมีขนาดเล็ก แต่ชิ้นส่วนของสีที่หลุดออกมาเมื่อใช้ DMSO เป็นตัวทำละลายจะมีลักษณะเป็นแผ่นใหญ่สะดวกต่อการจัดเก็บ เมื่อพิจารณาของระยะเวลาการลอกสีและความสามารถในการจัดเก็บฟิล์มสีที่ผ่านการลอกแล้วพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ DMSO:NMP 60:40 โดยปริมาตรจะใช้ระยะเวลาในการลอกสี 150 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 70 °C ที่อัตราส่วนระหว่าง DMSO และ NMP เป็น 60:40 โดยปริมาตรสามารถลดระยะเวลาในการลอกสีลงเหลือ 11 นาที โดยที่ชิ้นส่วนสีมีขนาดใหญ่สะดวกต่อการจัดเก็บ

เมื่อศึกษาผลของ pH พบว่าค่าการปรับ pH ของตัวทำละลาย NMP และ DMSO ให้เป็นกรดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 โมลาร์ สามารถช่วยกำจัดสนิมไปพร้อมๆกับการลอกสีโดยที่ใช้ระยะเวลาในการลอกสีคงเดิมแต่จะทำให้ตัวทำละลายเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างตัวทำละลายกับน้ำ เมื่อเปลี่ยนมาใช้กรดฟอสฟอริกเข้มข้นจะทำให้เวลาในการลอกสีของตัวทำละลาย NMP และ DMSO ลดลงเหลือน้อยกว่า 20 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

กลไกในการลอกสีของ NMP เกิดจากการหดตัวของชั้นแล็กเกอร์อย่างรวดเร็วทำให้ชั้นรองพื้นและสีทับหน้าหลุดเป็นแผ่นขนาดเล็ก ขณะที่กลไกการลอกสีของ DMSO เกิดจากการหดตัวของชั้นแล็กเกอร์ และการขยายตัวของสีรองพื้นอย่างช้าๆทำให้แผ่นฟิล์มที่ลอกออกมีขนาดใหญ่

5.1.2 การศึกษาแนวทางการใช้ซ้ำและการนำกลับมาใช้ใหม่

ตัวทำละลาย NMP และ DMSO สามารถใช้งานอย่างต่อเนื่องโดยที่เวลาที่ใช้ในการลอกสีจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับระยะเวลาในการลอกสีครั้งแรกและการลอกสีครั้งที่ 10 NMP จะใช้เวลา 160 นาที ส่วน DMSO ใช้เวลา 210 นาที และเมื่อนำ NMP และ DMSO มาผ่านการกลั่นที่จุดเดือดของตัวทำละลายพบว่า NMP สามารถกลั่นออกมาและใช้งานได้ใกล้เคียงกับ NMP ก่อนการกลั่น ส่วน DMSO นั้นเกิดการสลายตัวเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษและไม่มีผลต่อการลอกสี ดังนั้นวิธีการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ซ้ำจึงเป็นแนวทางในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนในการลอกสีได้ และเมื่อนำราคาของตัวทำละลายทดแทนทั้งสองชนิดมาทำการคำนวณและเปรียบเทียบกับตัวทำละลาย MC ในด้านความคุ้มค่าและความเป็นพิษโดยใช้ VHR พบว่าการใช้ NMP และ DMSO จะมีความเป็นอันตรายน้อยกว่า MC เป็นอย่างมาก และ MC มีอัตราการระเหยที่สูงกว่าตัวทำละลาย NMP และ DMSO ดังนั้นการนำตัวทำละลาย NMP และ DMSO กลับมาใช้ซ้ำจึงสามารถลดความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งาน MC ที่มีความเป็นอันตรายจากอัตราการระเหยที่สูงกว่าอีกทั้งยังลดการใช้ตัวทำละลายและลดของเสียอันตรายได้อีกทางหนึ่งด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมมีดังต่อไปนี้

- 1) ตัวทำละลาย NMP และ DMSO ไม่ควรเก็บไว้นาน หลังจากเปิดขวดควรใช้ให้หมดภายใน 3-4 เดือน เพราะการเก็บรักษาตัวทำละลายไม่ดี จะทำให้เสื่อมคุณภาพได้อย่างรวดเร็วเพราะตัวทำละลายทั้งสองชนิดสามารถทำปฏิกิริยากับความชื้นในบรรยากาศได้
- 2) ควรศึกษาอิทธิพลอื่นในการลอกสีเช่น การใช้สารลดแรงตึงผิว โลหะอื่นๆที่ใช้เป็นพื้นผิว
- 3) ผสม NMP หรือ DMSO กับตัวทำละลายอื่นๆเพื่อลดต้นทุนหรือลดระยะเวลาในการลอกสี
- 4) ทดสอบกับสีชนิดอื่นๆ นอกจาก PU โดยดูจากค่าการละลายของ Hansen

เอกสารอ้างอิง

1. จูตินันท์ ศรีสถิต และอวยพร แต่ชูตระกูล, 2547, “ขยะอิเล็กทรอนิกส์ ด้านมืดของชีวิตยุคดิจิทัล”, **หนังสือโลกสีเขียว**, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, มีนาคม-เมษายน, หน้า 24-25.
2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2547, ข้อมูลการนำเข้า Methylene Chloride ประจำปี 2547.
3. กรมควบคุมมลพิษ, **ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์** [Online], Available: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=499> [2007, March 30].
4. Dieter, S. and Werner, F., 2001, **Paint Coatings and Solvent**, Weinheim, New York.
5. อรุษา สรวารี, 2542, **สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์)**, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 1-168.
6. Morgans, W.M., 1990, **Outlines of Paint Technology**, 3rd ed., H&ted Press, London, pp. 58.
7. Northern Arizona University, **Fundamentals of Waste Management**, [Online], Available: <http://jan.ucc.nau.edu/doetqp/courses/env450/Lectures/Handouts/CAAA189.htm> [2007, March 30].
8. Boxall, J. and Fraunhofer, J.A., 1980, **Paint Formulation: principles and practice**, George Goodwin publisher, Industrial Press, London, pp.13.
9. Ron, M., 1997, “Abrasive blasting”, **Emission Factor Documentation for AP-42**, U.S. Environmental Protection Agency, pp. 2.1–2.13.
10. Freeman, H.M., 1995, **Industrial Pollution Prevention Handbook**, 1st ed., McGraw-Hill, New York, pp. 478-479, 707-709.
11. Barletta, M., Gisario, A. and Tagliaferri, V., 2006, “Advance in paint stripping from aluminium substrates”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 173, pp. 232–239.
12. EPAh, 1994, “Alternatives to Chlorinated Solvents for Cleaning and Decreasing”, **Guide to Cleaner Technologies**, Office of Research and Development, EPA, pp. 13.
13. Roderick, P.M., **How a Vapor Degreaser Works**, [Online], Available: <http://www.degreasingdevices.com/ebook.htm> [2007, March 30]
14. ThaiRoHS, **List of Prohibited Substances**, [Online], Available: http://www.thairohs.org/index.php?option=com_content&task=view&id=68&Itemid=56 [2007, March 30].

15. EPA, 1991, "The Automotive Refinishing Industry", **Guides to Pollution Prevention**, Office of Research and Development, EPA, pp. 83.
16. Higgins and Thomas, 1989, "Removal of Paint and Coatings", **Hazardous Waste Minimization Handbook**, Chelsea, MI, Lewis Publishers Inc.
17. Gardon, J.L. and Prane, J.W., 1973, **Nonpolluting Coatings and Coating Process**, New York, Plenum Press.
18. EPA, 1994, "Alternatives to Chlorinated Solvents for Cleaning and Degreasing", **Guide to Cleaner Technologies**, Washington DC, Office of Research and Development, pp. 7.
19. EPA, 1994, "Cleaning and Degreasing Process Change", **Guide to Cleaner Technologies**, Washington, DC, Office of Research and Development, EPA, pp. 5-6, 24.
20. EPA, 1994, "Organic Coating Removal", **Guide to Cleaner Technologies**, Washington, DC: Office of Research and Development., EPA, pp. 7-9
21. David, S.L., 1993, **Industrial Source Cleaning Book**, Madison, WI. Solid and Hazardous Waste Education Center, University of Wisconsin-Extension, pp. 15-19.
22. Wikipedia, **Dichloromethane**, [Online], Available:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Dichloromethane> [2007, March 30].
23. U.S. Department Of Health And Human Services Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2000, **Toxicological Profile for Methylene Chloride**, pp. 3-7.
24. กรมควบคุมมลพิษ, ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์ [Online], Available:
<http://msds.pcd.go.th/pdf/672.pdf> [2007, March 30].
25. Gaylord Chemical, **Dimethyl Sulfoxide**, [Online], Available:
<http://www.gaylordchemical.com/products/dmso.htm> [2007, March 30].
26. K.M.U.T.T., **Material Safety Data Sheet for Dimethyl Sulfoxide**, [Online], Available:
http://www.eesh.kmutt.ac.th/html/detail_msd.asp?id=521 [2007, March 30].
27. Arvind, A. and Agrawal, S.L., 2007, "Structural, thermal and electrical characterizations of PVA:DMSO:NH₄SCN gel electrolytes", **Solid State Ionics**, Volume 178, pp. 951-958.
28. Physical & Theoretical Chemistry Lab, **Safety data for methyl sulfoxide**, [Online], Available: http://ptcl.chem.ox.ac.uk/MSDS/ME/methyl_sulfoxide.html [2007, August 15].
29. Wikipedia, **Benzyl Alcohol**, [Online], Available:
http://en.wikipedia.org/wiki/Benzyl_alcohol [2007, March 30].

30. Physical & Theoretical Chemistry Lab, **Safety data for Benzyl Alcohol**, [Online], Available: http://ptcl.chem.ox.ac.uk/MSDS/BE/benzyl_alcohol.html [2007, March 30].
31. U.S. Environmental Protection Agency, **Air Quality Revision to Definition of Volatile Organic Compounds Exclusion of Volatile Methyl Siloxanes and Parachlorobenzotrifluoride**, [Online], Available: <http://www.epa.gov/EPA-AIR/1994/October/Day-05/pr-19.html> [2007, March 30].
32. Set On Resource Center, **MSDS for Methyl Siloxane**, [Online], Available: <http://www.setonresourcecenter.com/msds/docs/wcd00019/wcd01903.htm> [2007, March 15].
33. Whitfield, J.K., Ramsey, G.H., Adams, N.H., Nunez, C.M. and Gillum, D.E., 1999, "Demonstration of n-methyl pyrrolidone (NMP) as a pollution prevention alternative to paint stripping with methylene chloride", **Journal of Cleaner Production**, Vol. 7, No. 5, pp. 331-339.
34. Dishart, K.T., 2003, "Dimethylsulfoxide (DMSO) Solvent Formulations For Exterior Aircraft Coating Removal", **Aerospace Coatings Removal and Coating Conference**, pp. 1-10.
35. WADE, L.G., 1999, "Effects on Amine Basicity", **Organic Chemistry**, 4th ed., Prentice Hall International, USA, pp. 854.
36. Lucas, D.D., 2003, "Mechanistic, Sensitivity, and Uncertainty Studies of the Atmospheric Oxidation of Dimethylsulfide", **Atmospheric and Planetary Sciences**, MIT, Center for Global Change Science Department of Earth, Cambridge.
37. Archer and Wesley, L., 1996, "Hansen Solubility Parameters of Solvents", **Industrial Solvents Handbook**, Marcel Dekker, New York, pp. 35-49.
38. โรงเรียนปรีชาสาส์ตร, **สารและการเปลี่ยนแปลง**, [Online], Available: <http://www2.pn.ac.th/webpn/Elearning/Wit/sas/sas.html> [2007, August 15].
39. Gaylord Chemical Corporation, 2005, "Dimethyl Sulfoxide (DMSO) Recovery, System Engineering, And Environmental Considerations", USA, pp. 7.
40. National Institute of Standards and Technology, **IR Spectrum of DMDS**, [Online], Available: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C624920&Units=SI&Mask=80#IR-Spec> [2007, March 21].
41. Nicholas, K. and Gerald, A., 2000, "Vapor Hazard Ratio", **Safety Management**, Git publishing house Darmstadt, pp. 10-13.

42. ดำเนิน กงพาลา, 2548, “เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานสี”, เทคโนโลยีงานสี, สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., หน้า 61-69.
43. Auto Mag Wheel, **ดูขั้นตอนการ ซ่อม ล้อแม็กซ์**, [Online], Available:
<http://www.automagwheel.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=233210>
[2007, March 19].

ภาคผนวก ก
ขั้นตอนการพ่นสีโลหะ

การพ่นสีด้วยปืนพ่นสี (Air Spraying)

ชุดพ่นสีที่ใช้จะต้องประกอบไปด้วย

1. เครื่องปั๊มลม เป็นเครื่องมือที่ทำให้เกิดแรงดันลม เพื่อไปช่วยในการดูดและดันสีให้แตกเป็นฝอยและฟุ้งกระจาย โดยที่ปั๊มลมนั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ปั๊มลมชนิดลูกสูบและชนิดไดอะแฟรม แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะปั๊มลมชนิดลูกสูบเพราะมีกำลังอัดที่พอเพียงสำหรับการใช้พ่นสี [42]

เครื่องปั๊มลมชนิดลูกสูบ เครื่องปั๊มลมชนิดนี้มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ การทำงานของลูกสูบคล้ายกับการทำงานของเครื่องยนต์ เพียงแต่คัตน้ำมันเชื้อเพลิงและระบบจุดระเบิดออก โดยต่อท่อลมไปยังถังเก็บลม การทำงานคือ เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ลงจะเป็นจังหวะที่ลูกสูบดูดอากาศ ลิ้นลมเข้าจะเปิด เมื่อลูกสูบเคลื่อนลงไปถึงจุดต่ำสุดและอยู่ในจังหวะจะเคลื่อนขึ้น ลิ้นลมเข้าจะเปิด ส่วนลิ้นลม ออกจะปิด เมื่อลูกสูบเคลื่อนขึ้น จะอัดลมผ่านท่อไปเก็บไว้ในถังเก็บลม ทำงานเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งลมถูกอัดเต็มถังลม กำลังอัดของลมในถังวัดเป็นปอนด์ต่อ 1 ตารางนิ้ว หรือกิโลกรัมต่อ 1 ตารางเซนติเมตร

เครื่องปั๊มลมชนิดใช้ลูกสูบต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

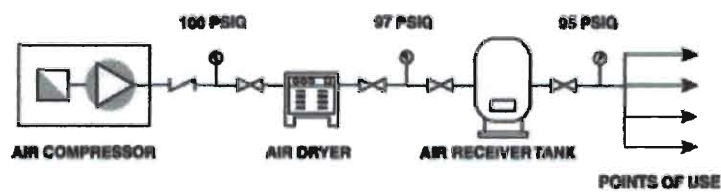
- (ก) ถังอัดลม ลักษณะเป็นถังเหล็กรูปทรงกระบอก ปิดหัวปิดท้าย วางในแนวนอนขนานกับพื้น มีความหนาพอที่จะรับแรงดันได้ตามความเหมาะสม ดังรูปที่ 1ก
- (ข) เครื่องต้นกำลัง นิยมใช้มอเตอร์เป็นตัวต้นกำลังเพราะสามารถปฏิบัติงานได้สะดวกและปลอดภัย
- (ค) สวิตช์อัตโนมัติ เป็นสวิตช์ไฟที่สามารถตัดและต่อวงจรไฟฟ้าได้ โดยอาศัยการตั้งแรงดันภายในถังให้เป็นตัวควบคุม
- (ง) เข็มวัดความดันลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความดันลมที่อยู่ในถังอัดลม



รูปที่ 1ก ภาพถ่ายเครื่องปั๊มลมชนิดลูกสูบ

นอกจากนี้อุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพของการพ่นสีให้มีคุณภาพของสีที่พ่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ประกอบไปด้วย ชุดดักน้ำ(Air Dryer), ถังพักลม(Air Recevier Tank)และชุดปรับแรงดันลม(Air Pressure Control)

โดยมีการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 2ก และภาพอุปกรณ์ต่างๆดังรูปที่ 3ก



รูปที่ 2ก แสดงวิธีการต่อชุดอุปกรณ์ลมทั้งหมด



รูปที่ 3ก ภาพถ่ายอุปกรณ์ลมทั้งหมด

2. ปืนพ่นสี (Spray Gun)

ปืนพ่นสีเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พ่นสีโดยอาศัยแรงดันลมจากเครื่องปั๊มลม ดันให้สีพ่นพุ่งไปข้างหน้า แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนบนที่มีลักษณะคล้ายกับปืน มีไก เป็นตัวเปิด-ปิดลมให้ดูคเอาสีจากกระเปาะที่อยู่ตอนล่างขึ้นมา ส่วนตอนล่างเป็นกระเปาะรูปทรงกระบอกคล้ายก้าน้ำชาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร มีคันหิ้วและตัวล็อกเพื่อใช้ยึดและล็อกเข้ากับส่วนบนได้อย่างสะดวก กระเปาะดังกล่าวทำหน้าที่ใช้ใส่สีตลอดจนวัสดุเคลือบผิวที่มีความเหลวต่างๆได้ ถ้าดูเผินๆคล้ายกับก้าน้ำ ดังนั้นจึงเรียกกันทั่วๆ ไปว่า กากพ่นสีดังรูปที่ 4ก



รูปที่ 4ก กาพ่นสี

หน้าที่ของกาพ่นสี

กาพ่นสีที่ใช้สำหรับการพ่นสี การพ่นแล็กเกอร์รวมไปถึงวัสดุเคลือบผิวต่างๆก่อนการพ่นสีจะต้องถอดกระเปาะตอนล่างออกและใส่สีลงในกระเปาะดังกล่าว ประมาณ $\frac{3}{4}$ ของความจุ ประกอบกาพ่นสีเข้าด้วยกัน พร้อมทั้งต่อท่อลมให้เรียบร้อย จากนั้นเปิดวาล์วจากเครื่องปั๊มลมก็สามารถพ่นสีได้โดยการเหนียวไกเข้ามาคล้ายไกปืน แรงดันลมจะทำหน้าที่ดันลมไปในแนวทางที่กำหนด พร้อมทั้งคู่สีที่อยู่ในกระเปาะให้พุ่งกระจายออกไปข้างหน้า ไปติดพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการพ่น

ส่วนประกอบของกาพ่นสี

กาพ่นสีประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. หัวลม เป็นส่วนประกอบที่สำคัญสุดของกาพ่นสี ติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งด้านหน้าสุดของกาพ่นสี ทำหน้าที่บังคับทิศทางของสีและความเร็วของลมที่อัด ทำให้สีแตกพุ่งกระจายเป็นฝอยในทิศทางตามที่ต้องการ แรงดันลมจะทำให้ละอองของสีพุ่งกระจายไปติดพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการพ่น หัวลมที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ
 - (1) หัวลมแบบผสมภายนอก เป็นหัวลมที่ผสมสีกับภายนอกหัวลม แรงดันลมจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคือ ชั้นนอกและชั้นในจะมาดันและรวมกับสีเพื่อให้เกิดการพุ่งกระจายของสีให้ไปติดพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการพ่น
 - (2) หัวผสมแบบผสมภายใน เป็นหัวลมที่ผสมกับสีภายในหัวลม แรงดันลมที่เป็นชั้นเดียวจะมาดันและรวมกับสี เพื่อให้เกิดการพุ่งกระจายของสีไปติดพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการพ่น หัวลมสามารถถอดออกทำความสะอาดได้
2. หัวปล่อยสี เป็นส่วนประกอบที่สำคัญเป็นอันดับที่สองรองลงมาจากหัวลม ติดตั้งอยู่ติดกับหัวลม ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของสี ตอนในของหัวปล่อยมีลักษณะเป็นรูกลมเพื่อรองรับปลายเข็มปรับปริมาณสี เพื่อใช้ปรับปริมาณสีและเป็นประตูกู้เปิด-ปิดด้วยปลายเข็มดังกล่าว เมื่อเหนียวไก โคนไกจะดึงเข็มดังกล่าวให้ปลายเข็มถอยห่างจากรูกลม คล้ายกับทำหน้าที่เปิดประตูกู้ของสีให้สีไหลออกไป ถ้าเหนียวไกเข้ามามากปลายเข็มก็จะถอยออกมามาก ประตูกู้

- ดังกล่าวก็จะถูกเปิดมาก สี่ก็จะไหลออกไปมาก เมื่อปล่อยไคกลับมาที่เดิมปลายเข็มจะเดินหน้าไปอุดรูกลมดังกล่าวคล้ายกับทำหน้าที่ปิดประตูของสี่ สี่ก็จะไม่สามารถไหลออกไปได้
3. เข็มปรับปริมาณสี่ ลักษณะเป็นแท่งโลหะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ส่วนปลายเรียวยแหลมจนเหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ซึ่งจะสอดเข้าไปอยู่ในรูกลมของหัวปล่อยสี่พอดี ทำหน้าที่เปิด-ปิดประตูของสี่ เมื่อเหนียวไคปลายเข้มนดังกล่าวจะถอยออกมา ประตูของสี่จะถูกเปิดออก สี่ก็จะไหลออกไป เมื่อเหนียวไคเข้ามามาก ปลายเข้มนดังกล่าวจะถอยออกมามาก ประตูของสี่ก็จะถูกเปิดออกมาก สี่ก็จะไหลออกไปมาก เมื่อต้องการให้สี่หยุดที่ปล่อยไค สปริงที่อยู่ทางขวาของเข็มปรับสี่จะดันเข้มนดังกล่าวให้ปลายเข็มสอดเข้าไปในรูกลมของหัวปล่อยสี่ ซึ่งทำหน้าที่ปิดประตูของสี่ ตามปกติก่อนการพ่นสี่เข็มดังกล่าวจะถูกแรงดันของสปริงดันเอาไว้ตลอดเวลาเพื่อปิดประตูของสี่ และเมื่อไรก็ตามที่เหนียวไคปลายเข้มนดังกล่าวจะถอยออกมา
 4. ไค ลักษณะเป็นโลหะคั่นปลายโลหะปลายโค้งเล็กน้อย ติดตั้งอยู่ตรงส่วนกลางระหว่างหัวปล่อยสี่กับค้ำจับ ส่วนปลายบนมีสกรูยึดเพื่อเป็นจุดหมุน ส่วนตอนกลางเอาไว้ให้ใช้นิ้วชี้และนิ้วกลางคล่องรัดได้อย่างถนัดเป็นตัวทำให้กาพ่นสี่ทำงาน โดยจะทำงานไปพร้อมๆ กับลิ้นและประตูของสี่ที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน ตามปกติไคจะถูกแรงดันของสปริงที่ดันเข็มปรับปริมาตรสี่ให้อยู่ในตำแหน่งก่อนไปทางด้านหน้าซึ่งประตูของสี่จะถูกปิดกั้นลมก็จะถูกปิดเช่นเดียวกัน เมื่อเหนียวไคประตูของสี่และลิ้นลมจะถูกเปิด สี่และแรงดันลมจะถูกปล่อยออกไปให้ผสมกันเพื่อฟุ้งกระจายไปตีตัววัสดุที่อยู่ด้านหน้า
 5. สกรูควบคุมการปล่อยปริมาณสี่ ลักษณะเป็นสกรูหัวกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หัวด้านนอกเป็นร่องผ่าตลอด ส่วนหัวด้านในเป็นแกนเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร เมื่อต้องการให้ปริมาณสี่ไหลออกมาก็คล้ายสกรูดังกล่าวให้ถอยออกมาเกือบสุดก็สามารถเหนียวไคเข้ามาได้มาก ในทางตรงกันข้ามเมื่อต้องการให้ปริมาณสี่ไหลออกน้อยก็ขันสกรูดังกล่าวเข้าไปตามตำแหน่งที่ต้องการก็จะเหนียวไคเข้ามาได้เล็กน้อย ปริมาณสี่ที่ไหลก็จะไหลออกไปได้น้อยลง
 6. ตัวควบคุมลิ้นลม ลักษณะเป็นแท่งโลหะกลมขนาดเล็ก ติดตั้งอยู่ใต้โคนเข็มปรับปริมาณสี่ทำงานโดยการเหนียวให้ตัวควบคุมลิ้นลมเปิด แรงดันลมจะเข้าสู่หัวลม ทั้งตัวควบคุมลิ้นลมและเข็มปรับปริมาณสี่จะทำงานไปพร้อมๆ กันเมื่อเหนียวไค พร้อมทั้งหยุดการทำงานพร้อมๆ กันเมื่อปล่อยไค
 7. ตัวควบคุมรูปแบบของการพ่น ลักษณะเป็นปุ่มโลหะกลม สามารถหมุนปรับตามหรือทวนเข็มนาฬิกาได้ ติดตั้งอยู่บนเนื้อสกรูควบคุมการปล่อยปริมาณสี่ ทำหน้าที่ปรับความกว้าง

รูปแบบของสีที่พ่น โดยการควบคุมแรงดันลมที่ปล่อยไปยังหัวลม ซึ่งเป็นหัวลมแบบผสม ภายนอก

8. ค้ำจับ ลักษณะเป็นแท่งโลหะกลวงรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 35 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตรหนา 15 มิลลิเมตร มุมทั้ง 4 โค้งมนเพื่อให้กำได้ถนัด ค้ำจับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญเพราะทำหน้าที่เป็นตัวยึดส่วนประกอบต่างๆเข้าด้วยกัน ออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อให้มีความสมดุลสะดวกสบายต่อการถือในขณะพ่นสี
9. ช่องแรงดันลมเข้า ลักษณะเป็นท่อโลหะกลมมีเกลียวอยู่ด้านนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร ภายในมีรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรติดตั้งอยู่ทางตอนล่างของค้ำจับ ทำหน้าที่เป็นจุดต่อสำหรับท่อโลหะอ่อน โดยการขันเกลียวให้ยึดติดกัน

โดยเมื่อรวมองค์ประกอบทั้งหมดเข้าด้วยกัน จะกลายเป็นปืนพ่นสี ที่พร้อมที่จะพ่นสี

สำหรับขั้นตอนการพ่นสีนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการพ่นสีบนพื้นผิวที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบสีและการพ่นสีบนพื้นผิวที่ผ่านการเคลือบสีมาแล้ว โดยทั้งสองวิธีนั้นมีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อยตรงที่พื้นผิวที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบสี สามารถเคลือบสีรองพื้นและทำการพ่นสีได้โดยไม่ต้องทำการปรับแต่งพื้นผิวหรืออาจจะปรับแต่งเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถใช้งานได้ ในที่นี้จะกล่าวถึงการพ่นสีบนพื้นผิวที่ผ่านการเคลือบสีโดยการพ่นสีจะคำนึงถึงความเสี่ยงของพื้นผิวและการใช้งานเป็นปัจจัยหลัก ในกรณีที่พื้นผิวส่วนใหญ่ยังคงมีความสมบูรณ์ของสีและมีความเสียหายเพียงเล็กน้อยจะใช้วิธีการขัดตรงบริเวณที่เสียหายและนำสีไปพ่นมาทาทับเพื่อให้มีความราบเรียบและทำการเคลือบสีรองพื้น และสีทับหน้ารวมถึงพ่นสีเคลือบเงา และสามารถนำไปใช้งานได้ทันที แต่ความคงทนของสีจะน้อยกว่าการนำชิ้นงานมาผ่านกระบวนการลอกสีและทำการเคลือบสีบนพื้นผิวใหม่ทั้งหมด สำหรับการพ่นสีบนพื้นผิวที่ผ่านการเคลือบสีมาแล้วโดยวิธีการลอกสี [43] สามารถทำได้ดังนี้

1. จะเป็นการลอกสีบนพื้นผิวทั้งหมดด้วยตัวทำลายเคมีดังรูปที่ 5ก ซึ่งได้กล่าวถึงในบทที่ 2 มาแล้ว



รูปที่ 5ก ภาพถ่ายลือแม็กซ์ขณะทำการลอกสีด้วยวิธีการจุ่มในตัวทำลาย

2. ขั้นตอนการทำความสะอาด ขัดสีเดิม ออก (Paint Removing & Cleaning) ในขั้นตอนนี้จะนำชิ้นส่วนที่ผ่านการลอกสีด้วยตัวทำละลายขึ้นมาทำความสะอาดตัวทำละลายออกจากชิ้นงานที่ผ่านการลอก และจะเป็นการกำจัดสีบางส่วนที่ยังคงติดอยู่บนพื้นผิววัสดุ ดังรูปที่ 6ก



รูปที่ 6ก ภาพถ่ายการทำความสะอาดชิ้นงานหลังการลอกสีด้วยตัวทำละลาย

3. ขั้นตอนการเตรียมผิว (Sanding) ชิ้นงานที่ผ่านการลอกสีมักจะพบรอยแผล หรือ ร่องลอกบนพื้นผิวที่หยาบ ดังนั้นเพื่อให้ชิ้นงานมีความราบเรียบสม่ำเสมอจะต้องใช้เครื่องมือในการขัด (Sanding machine) และ ขัดด้วยมือ ตามซอกที่เครื่องเข้าไปไม่ถึง และหลังจากนั้นจะนำชิ้นงานไปทำความสะอาดคราบทุกชนิดออกรวมถึงสนิมที่อยู่บนชิ้นงานด้วยวิธีการพ่นทราย (Sand Blasting) ดังรูปที่ 7ก



รูปที่ 7ก ภาพถ่ายการเตรียมพื้นผิวด้วยวิธีการขัดและพ่นทราย

4. เมื่อทำการขัดพื้นผิวด้วยวิธีทางกายภาพ ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการตกแต่งพื้นผิวให้มีความเรียบสนิท ด้วยการใช้กระดาษทรายน้ำขัด และกรณีพบว่าชิ้นงานนั้นไม่มีพื้นผิวที่ไม่เรียบ ถึกขาด แหว่งหรือมีร่องลึก จะใช้การเชื่อมด้วยโลหะให้กับชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานมีสภาพที่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 8ก ในขั้นตอนนี้ถ้าเป็นชิ้นงานที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนักอาจจะใช้สีโป้วแทนก็ได้



รูปที่ 8ก ภาพถ่ายขั้นตอนการปรับแต่งพื้นผิวอย่างละเอียดและการเชื่อมพื้นผิว

5. เมื่อเตรียมพื้นผิวเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการล้างชิ้นงานอีกครั้งด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน และสิ่งสกปรกต่างๆออก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเคลือบสีให้มากขึ้นและทำการพ่นสีรองพื้น (Primer Coating) เพื่อให้สีกับพื้นผิวมีการยึดเกาะที่ดีขึ้นและทำการปรับแต่งพื้นผิวอีกครั้งให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมและสวยงามหรือเรียกว่า การปรับระดับพื้นผิว (Surface Leveling) ดังรูปที่ 9ก



รูปที่ 9ก ภาพถ่ายขั้นตอนการพ่นสีรองพื้นและการปรับระดับพื้นผิว

6. เมื่อได้ชั้นรองพื้นเรียบร้อยแล้วในขั้นตอนต่อมาจะเป็นการพ่นสีทับหน้า (Top Coat) โดยสามารถผสมสีทับหน้าให้ได้เฉดสีตามที่ต้องการ และทำการพ่นลงพื้นผิวโดยจะทำการพ่นประมาณ 2-3 ครั้งเพื่อให้สีทับหน้ามีความราบเรียบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 10ก



รูปที่ 10ก การพ่นสีทับหน้า ทั้งด้านในและด้านนอก

7. และในขั้นตอนสุดท้ายของการเคลือบสีจะเป็นการพ่นสีแลคเกอร์ (Lacquer Coating) เพื่อให้ชิ้นงานมีความเงางาม และเกิดความคงทนต่อสภาพแวดล้อมมากยิ่งขึ้น และหลังจากทำการพ่นสีแลคเกอร์ จะนำชิ้นงานไปทำการอบ (Baking) ที่อุณหภูมิ 60-140°C เป็นเวลา 2-5 ชั่วโมง เพื่อให้สีมีการยึดเกาะที่ดีและคงทนต่อสภาพแวดล้อมมากที่สุด ดังรูปที่ 11ก



รูปที่ 11ก ภาพถ่ายขั้นตอนการเคลือบสีแลคเกอร์และนำชิ้นงานไปอบ

8. เมื่อทำการอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะได้ชิ้นงานที่มีการเคลือบสีอย่างสมบูรณ์และสวยงาม ดังรูปที่ 12ก



รูปที่ 12ก ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบสีอย่างสมบูรณ์

ภาคผนวก ข
ระยะเวลาที่ใช้ในการลอกสีต่างๆ

ตารางที่ ข.1 แสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีด้วยตัวทำละลายชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 30°C

เวลาที่ใช้ (นาที)	MC	Com.Solvent	NMP	DMSO
ครั้งที่ 1				
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	5	11	15	62
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	10	14	124	184
ครั้งที่ 2				
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	5	10	19	68
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	9	16	120	190
ครั้งที่ 3				
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	4	10	13	54
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	10	15	118	163

ตารางที่ ข.2 แสดงเวลาที่ใช้ในการลอกสีของตัวทำละลายเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง

	pH NMP เมื่อปรับด้วย HCl		pH NMP เมื่อปรับด้วย NaOH		pH DMSO เมื่อปรับด้วย HCl		pH NMP เมื่อปรับด้วย HOAc		pH DMSO เมื่อปรับด้วย HOAc	
	2.0	3.5	12.5	13.0	2.0	3.5	3.5	4.5	3.5	4.5
เวลาที่ใช้ (นาที) ครั้งที่ 1										
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	31	34	29	30	60	63	5	5	7	8
เวลาที่ใช้ไปใน การลอกสี ทั้งหมด	122	119	123	120	182	183	16	16	18	21
ครั้งที่ 2										
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	25	28	23	35	61	64	4	5	6	7
เวลาที่ใช้ไปใน การลอกสี ทั้งหมด	135	122	110	133	184	189	15	16	18	19
ครั้งที่ 3										
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	29	29	33	32	-	-	5	4	7	8
เวลาที่ใช้ไปใน การลอกสี ทั้งหมด	115	130	128	125	-	-	16	15	17	20

ตารางที่ ข.3 เวลาที่ใช้ในการลอกสีโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง DMSO:NMP ที่ 30°C

DMSO:NMP เวลาที่ใช้ (นาที)	100:0	80:20	60:40	50:50	40:60	80:20	0:100
ครั้งที่ 1							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	62	32	15	15	14	15	15
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	184	181	152	150	130	130	124
ครั้งที่ 2							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	68	28	14	15	15	16	19
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	190	170	145	140	135	136	120
ครั้งที่ 3							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	54	31	16	16	14	14	13
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	163	190	158	155	132	120	118

ตารางที่ ข.4 เวลาที่ใช้ในการลอกสีของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-80°C

อุณหภูมิ °C เวลาที่ใช้ (นาที)	NMP						
	30	40	50	60	70	80	
ครั้งที่ 1							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	15	7	6	3	3	2	
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	124	48	35	25	13	10	
ครั้งที่ 2							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	19	7	5	3	3	2	
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	120	50	34	27	13.20	10	
ครั้งที่ 3							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	13	8	6	3	2	2	
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	118	47	33	24	12	11	

ตารางที่ ข.4 เวลาที่ใช้ในการลอกสีของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30-80°C (ต่อ)

อุณหภูมิ °C เวลาที่ใช้ (นาที)	DMSO						
	30	40	50	60	70	80	
ครั้งที่ 1							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	62	19	18	17	5	4	
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	184	69	59	40	36	15	
ครั้งที่ 2							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	68	18	18	18	4	4	
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	190	70	60	45	33	14	
ครั้งที่ 3							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	54	19	17	15	6	4	
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	163	72	58	35	39	15	

ตารางที่ ข.5 ผลการลอกสีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 40-70°C

เวลาที่ใช้ (นาที) ที่อุณหภูมิ 40°C	อัตราส่วนตัวทำละลาย DMSO : NMP						
	100:0	80:20	60:40	50:50	40:60	80:20	0:100
ครั้งที่ 1							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	19	13	12	9	7	7	7
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	69	63	58	69	65	60	48
ครั้งที่ 2							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	18	14	9	13	8	7	7
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	70	63	60	60	58	56	50
ครั้งที่ 3							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	19	13	11	11	8	7	8
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	72	69	63	62	59	64	47
ที่อุณหภูมิ 50°C							
ครั้งที่ 1							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	18	8	14	15	19	7	6
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	59	80	76	62	70	68	35
ครั้งที่ 2							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	18	12	14	14	16	9	5
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	60	82	82	62	67	72	34
ครั้งที่ 3							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	17	22	10	9	18	10	6
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	58	85	70	63	72	65	33

ตารางที่ ข.5 ผลการลอกสีเมื่อทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่ อุณหภูมิ 40-70 °C (ต่อ)

เวลาที่ใช้ (นาที) ที่อุณหภูมิ 60°C	อัตราส่วนตัวทำละลาย DMSO : NMP						
	100:0	80:20	60:40	50:50	40:60	80:20	0:100
ครั้งที่ 1							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	17	9	8	9	14	10	3
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	40	39	48	43	63	38	25
ครั้งที่ 2							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	18	12	10	8	15	15	3
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	45	43	39	40	54	44	27
ครั้งที่ 3							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	15	11	9	9	13	11	3
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	35	43	48	40	43	44	24
ที่อุณหภูมิ 70°C							
ครั้งที่ 1							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	5	4	4	5	4	6	3
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	36	24	11	12	12	25	13
ครั้งที่ 2							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	4	4	5	4	5	5	3
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	33	23	10	11	13	24	13
ครั้งที่ 3							
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	6	5	4	5	5	6	2
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	39	24	11	12	12	25	12

ตารางที่ ข.6 เวลาที่ใช้ในการลอกสีชั้นต่างๆ ด้วยตัวทำละลาย NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30°C

ชั้นสีตัวทำละลาย เวลาที่ใช้ (นาที)	สีรองพื้น		สีรองพื้น+ทับหน้า		สีแลคเกอร์	
	NMP	DMSO	NMP	DMSO	NMP	DMSO
ครั้งที่ 1						
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	ไม่เกิดการลอก	62	ไม่เกิดการลอก	70	3	3
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	ไม่เกิดการลอก	220	ไม่เกิดการลอก	260	15	18
ครั้งที่ 2						
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	ไม่เกิดการลอก	72	ไม่เกิดการลอก	82	3	3
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	ไม่เกิดการลอก	190	ไม่เกิดการลอก	240	14	16
ครั้งที่ 3						
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	ไม่เกิดการลอก	70	ไม่เกิดการลอก	75	3	3
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	ไม่เกิดการลอก	250	ไม่เกิดการลอก	250	15	17

ตารางที่ ข.7 เวลาที่ใช้ในการลอกสีโดยการนำมาใช้ซ้ำของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30°C

ตัวทำละลาย \ เวลาที่ใช้ (นาที)	Reused		Recycle
	NMP	DMSO	NMP
ครั้งที่ 1			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	16	62	19
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	118	190	125
ครั้งที่ 2			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	17	60	20
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	129	178	128
ครั้งที่ 3			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	17	61	16
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	105	175	115
ครั้งที่ 4			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	14	71	15
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	116	200	120
ครั้งที่ 5			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	18	62	16
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	121	184	121
ครั้งที่ 6			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	17	65	19
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	128	172	123
ครั้งที่ 7			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	18	54	23
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	140	165	128
ครั้งที่ 8			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	17	70	25
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	150	200	132

ตารางที่ ข.7 เวลาที่ใช้ในการลอกสีโดยการนำมาใช้ซ้ำของ NMP และ DMSO ที่อุณหภูมิ 30°C (ต่อ)

ตัวทำละลาย เวลาที่ใช้ (นาที)	Reused		Recycle
	NMP	DMSO	NMP
ครั้งที่ 9			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	19	72	24
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	155	220	126
ครั้งที่ 10			
เวลาที่เริ่มเกิดการลอกสี/รอยร้าว	20	68	28
เวลาที่ใช้ไปในการลอกสี ทั้งหมด	160	210	135

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายชวกร ลักษณะปัญญากุล
วัน เดือน ปี เกิด	1 พฤศจิกายน 2523
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประ โยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวัดอินทาราม พ.ศ. 2542
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2545
ระดับปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2550
ทุนการศึกษา	ทุนสนับสนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ปีงบประมาณ 2548
ประวัติการทำงาน	2545 บริษัท Storefront จำกัด ตำแหน่งงาน Website Graphic Designer
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	ชวกร ลักษณะปัญญากุล, สิริลักษณ์ เจียรกร และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2550, “ตัวทำละลายทดแทนในการบวนาการ ชะล้างสีของพื้นผิววัสดุ”, การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 6, สมาคมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, หน้า 1-6.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2548

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) ชวกร ลักษณะปัญญาคุณ รหัสประจำตัว 47401116

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☒ โท ☐ เอก ☐ ประด

หลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ

อยู่บ้านเลขที่ 44/173 ตรอก/ซอย จันทรา 34 ถนน วิภาวดี

ตำบล/แขวง บางพลี อำเภอ/เขต บางพลี จังหวัด สมุทรปราการ

รหัสไปรษณีย์ 10130 ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน ตำแหน่ง คณบดีคณะพลังงานและวัสดุ

เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลง ดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “ตัวทำละลายทดแทนในกระบวนการชะล้างพื้นผิววัสดุ”

ซึ่งอยู่ในความควบคุม ดร.ศิริลักษณ์ เกียรติวรกร

ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้
กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราช
บัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุ
ว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก ๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราช
บัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์
อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นายชวกร ลักษณะปัญญาคุณ

ลงชื่อ ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.อภิชาติ เทอดโยธิน)

ลงชื่อ พยาน
(ดร.ศิริลักษณ์ เกียรติวรกร)

ลงชื่อ พยาน
(รศ.ดร.นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์)