



สื่เคลื่อนสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

นายวัลลภ หาญณรงค์ชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

สื่อกลับสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

นายวัลลภ หาญณรงค์ชัย วศ.บ. (วิศวกรรมวัสดุ)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(ดร.พัฒนา รักษ์ความสุข)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์)

..... กรรมการ
(ดร.ทิพวรรณ ปะละไทย)

..... กรรมการ
(ดร.ชญานา ชนชานนท์)

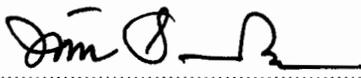
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

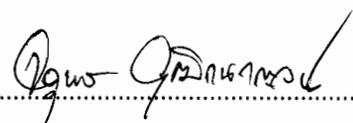
สื่เกลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

นายวัลลภ หาญณรงค์ชัย วศ.บ. (วิศวกรรมวัสดุ)

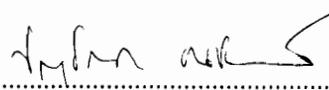
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(ดร.พัฒนาะ รักความสุข)


..... กรรมการ
(รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์)


..... กรรมการ
(ดร.ทิพบรรณ ปะละไทย)


..... กรรมการ
(ดร.ชัยขนา ชนชานนท์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน
หน่วยกิต	15
ผู้เขียน	นายวัลลภ หาญณรงค์ชัย
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.พัฒนา รักความสุข
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสีเคลือบเพื่อเพิ่มค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยได้ทำการศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ คือ ชนิดของผงสี ความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงสี ความหนาของสีเคลือบและอัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ต่อผงสีสีดำ จากผลการศึกษาพบว่า ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อ ความเข้มข้น โดยปริมาตรของผงสี และความหนาของสีเคลือบเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นจนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่าความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงสีและความหนาของสีเคลือบจะเพิ่มขึ้นก็ตาม นอกจากนี้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่อัตราส่วนของ TiO_2 ต่อผงสีสีดำเท่ากับ 7:1 จากผลการเปรียบเทียบกับสีเคลือบเชิงพาณิชย์ พบว่าสีเคลือบที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่า ยกเว้นสีแดงและสีฟ้าที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับสีเคลือบเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของสีเคลือบโดยทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะ พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบ ในขณะที่สีอื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเสื่อมสภาพของสีเคลือบเกิดจากปัจจัยต่างๆ คือ การเสื่อมสภาพของสารยึดและปฏิกิริยาระหว่างสารเติมแต่งกับ สารเคลือบสีและสารป้องกันการเสื่อมสภาพจากแสง

คำสำคัญ : สีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ / ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ / การเสื่อมสภาพของสีเคลือบ / การอนุรักษ์พลังงาน

Thesis Title	Coloured Solar Reflective Coating for Energy Conservation
Thesis Credits	15
Candidate	Mr.Wanlop Harnnarongchai
Thesis Advisor	Dr.Pattana Rugkwamsuk
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Department	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2549

Abstract

This research was concentrated on investigating the development of reflective coating in order to enhance the solar reflectance. The influence of pigment volume concentration (PVC), types of pigment, thickness of coating, and ratio between Titanium Dioxide (TiO₂) and reflective pigment (black) were examined. The obtained results showed an increase in the solar reflectance as the pigment volume concentration and the thickness of coating were increased. However, it should be noted that the increase of the pigment volume concentration and the thickness of coating did not produce any major changes in the solar reflectance as reaching its maximum value. It was also found that the solar reflectance initially increased and reached a maximum value at the ratio between TiO₂ and reflective pigment of 7:1. In the comparison with the solar reflectance of commercial coating, it was found that the solar reflectance of the reflective coating was higher than that of the commercial coating, except for the red and blue pigments which do not have significant difference when it is compared with the commercial coating. The degradation of coating was also investigated by accelerated weathering test. It was found that the reflective coating of white pigment significantly decreased during the early stage of exposure, whilst it has no significant change in other pigment. The degradation of coating being closely associated with the degradation of binder, the chemical reaction between additive and UV absorber, and the reversing phenomena of UV absorber and HALs.

Key words : Solar Reflective Coating / Solar Reflectance / Degradation of Coating /
Energy Conservation

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความรู้ และคำแนะนำต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา ระหว่างการทำงานวิจัย ตลอดจนได้ประสบการณ์ใหม่ๆ ในการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ดร.พัฒนา รักความสุข รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ อาจารย์คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ สำหรับความรู้ และคำแนะนำในการวางแผนการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ทิพวรรณ ปะละไทย และ ดร.ชญชญา ธนชยานนท์ สำหรับความกรุณาในการสละเวลา เพื่อการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ บริษัท แมททีเรียล ซัพพลาย อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด และบริษัท เพอร์โร เซอเดค (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับการให้ความอนุเคราะห์วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคน รวมถึง ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกาย และกำลังใจในการทำงาน สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๙
สารบัญ	๑๑
รายการตาราง	๑๒
รายการรูปประกอบ	๑๓
ประมวลศัพท์และคำย่อ	๑๔
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ประสิทธิภาพในการลดความร้อนของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์	4
2.2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	7
2.2.1 อิทธิพลของความเรียบผิวเคลือบ	7
2.2.2 อิทธิพลของสารเจือปน	8
2.2.3 อิทธิพลของความหนาผิวเคลือบ	8
2.2.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคผงสี	9
2.2.5 อิทธิพลของเวลาในการบดผงสี	10
2.3 การเสื่อมสภาพของอะครีลิกพอลิเมอร์	10
3. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	15
3.1 องค์ประกอบของสารเคลือบ	15
3.2 สารยึดหรือสิ่งนำสี	15
3.3 ผงสี	16

	หน้า	
3.4	สารเติมแต่ง	20
3.5	การผลิตสีเคลือบ	21
3.6	อุปกรณ์ในการผลิตสีเคลือบ	23
3.7	การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้	27
3.8	การสะท้อนรังสีอาทิตย์ในเนื้อผิวเคลือบ	28
4.	การดำเนินงานวิจัย	31
4.1	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	33
4.1.1	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	33
4.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	33
4.2	การเตรียมสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์	34
4.2.1	การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสีเคลือบ	34
4.2.2	การผลิตสารเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์	34
4.3	การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	35
4.3.1	อิทธิพลของชนิดผงสีและ %PVC ที่มีต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	35
4.3.2	อิทธิพลของความหนาสีเคลือบที่มีต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	36
4.3.3	อิทธิพลของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับผงสีชนิดอื่น	37
4.4	การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ	37
4.4.1	การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบด้วยเครื่องเร่งสภาวะ	37
4.4.2	การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริง	40
4.5	การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเคลือบทางพาณิชย์	40
5.	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	41
5.1	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	41
5.1.1	อิทธิพลของ %PVC ต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	41
5.1.2	อิทธิพลของชนิดผงสีต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	46
5.1.3	อิทธิพลของความหนาสีเคลือบต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	46
5.1.4	อิทธิพลของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับผงสีสีดำ	48
5.2	การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเคลือบทางพาณิชย์	51

	หน้า
5.3 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ	60
5.3.1 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบด้วยเครื่องเร่งสภาวะ	60
5.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสีเคลือบด้วยเทคนิค FTIR	66
5.3.3 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริง	80
6. สรุปผลการทดลอง	82
6.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	82
6.1.1 อิทธิพลของชนิดผงสีและความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	82
6.1.2 อิทธิพลของความหนาสีเคลือบต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์	82
6.1.3 อิทธิพลของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับผงสีสีดำ	82
6.2 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเคลือบทางพาณิชย์	82
6.3 การเสื่อมสภาพของสีเคลือบ	83
6.3.1 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบด้วยเครื่องเร่งสภาวะ	83
6.3.2 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริง	83
6.4 ข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	87
ก. เอกสารแสดงแสดงสมบัติของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	87
ข. มาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัย	95
ค. FTIR Spectra ของสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ	118
ประวัติผู้ทำวิจัย	134

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	สมบัติของผงสีและการเลือกใช้ผงสี	17
4.1	ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลองการเสื่อมสภาพของสีเคลือบโดยการเร่งสภาวะ	39
5.1	ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่ 15% PVC และความหนาใกล้เคียงกัน	46
5.2	%PVC, ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์, ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ในช่วงเนียร์อินฟราเรดและความหนาสีเคลือบที่เหมาะสมในการผลิตและใช้งาน	48

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	อุณหภูมิห้องใต้หลังคาของบ้านที่สภาพหลังคาแตกต่างกันในการทดลอง	5
2.2	การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีดำที่ผลิตได้เทียบกับสีดำทั่วไป	7
2.3	การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบที่เรียบและขรุขระ	8
2.4	การดูดกลืนแสงอาทิตย์ของผิวเคลือบที่ความหนาต่างกัน	9
2.5	การเสื่อมสภาพของ PHMA เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต	11
2.6	การเกิดหมู่คาร์บอนิวใหม่จากการเสื่อมสภาพของ poly(alkyl methacrylate)	11
2.7	FTIR Spectra ของ PBMA หลังจากการฉายแสงที่ 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ	11
2.8	การขาดออกของสายโซ่ต่อโมเลกุลเริ่มต้นของ PMA ที่เวลาในการเร่งสภาวะต่างๆ	12
2.9	FTIR สเปกตรัมของ PMA ก่อนการเร่งสภาวะและที่เวลาในการเร่งสภาวะที่ 100, 216 และ 532 ชั่วโมง	13
2.10	กลไกการเกิดโครงสร้าง γ -lactone	13
2.11	กลไกการเกิดโครงสร้าง Anhydrides	14
3.1	โครงสร้างของอะครีลิค	15
3.2	ขั้นตอนการผลิตผงสีแบบการนอนกัน	18
3.3	การผลิตผงสีโดยการเผาที่อุณหภูมิสูง	19
3.4	กรรมวิธีการผลิตสีเคลือบ	22
3.5	เครื่องบด Triple Roll Mill	23
3.6	(ก) เครื่อง Sand mill, (ข) ไม้ป่นกวน	24
3.7	เครื่องบด Ball mill	25
3.8	เครื่อง Attritor Mill	26
3.9	(ก) เครื่อง high speed disperser ,(ข) ไม้ป่นกวน	27
3.10	เปรียบเทียบการหักเหแสงของอนุภาคที่มีดัชนีหักเหต่างกัน	29
3.11	เปรียบเทียบการหักเหของแสงในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกัน	30
3.12	เปรียบเทียบการเลี้ยวเบนของแสงที่อนุภาคมีขนาดต่างกัน	30
4.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	31
4.2	ขั้นตอนการผลิตสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์	35

รูป (ต่อ)	หน้า
4.3 เครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer	36
4.4 เครื่องวัดความหนาสีเคลือบ	37
4.5 เครื่องทดสอบการเสื่อมสภาพโดยการเร่งสภาวะ	38
4.6 เกณฑ์เทียบสีตามมาตรฐาน CIE-L*a*b*	39
4.7 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริงตามมาตรฐาน ASTM G7	40
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวที่ 1, 3, 5, 10, 15 และ 20% PVC	41
5.2 การสะท้อนของรังสีในสีเคลือบที่ %PVC แตกต่างกัน	42
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเหลืองที่ 1, 3, 5, 10, 15 และ 20% PVC	43
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีแดงที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC	43
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเขียวที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC	44
5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีฟ้าที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC	45
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีดำที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC	45
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง %PVC กับความหนาของสีเคลือบที่ทำให้ได้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์คงที่	47
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC	49
5.10 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ สีขาว, สีดำและสีเทาที่อัตราส่วนของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำ 1:1 ที่ 10% PVC	49
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดของสีเคลือบสีเทาที่มีอัตราส่วนระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 1:1, 3:1, 4:1, 7:1 และ 9:1	50
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีขาวสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีขาวทางพาณิชย์	51

รูป (ต่อ)	หน้า
5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีเหลืองสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเหลืองทางพาณิชย์	52
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีแดงสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีแดงทางพาณิชย์	53
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีเขียวสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเขียวทางพาณิชย์	54
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีฟ้าสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีฟ้าทางพาณิชย์	55
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีดำสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีดำทางพาณิชย์	56
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาทางพาณิชย์กับสีเทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่อัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 1:1	57
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาทางพาณิชย์กับสีเทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่อัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 3:1	58
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาทางพาณิชย์กับสีเทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่อัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 4:1	59
5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาทางพาณิชย์กับสีเทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่อัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 7:1	60
5.22 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์กับระยะเวลาในการเร่งสภาวะ	61
5.23 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ระยะเวลาในการเร่งสภาวะที่ 0, 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง	62
5.24 ค่า b^* ของสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ	63
5.25 ดัชนีความเหลืองของสีเคลือบที่มีและไม่มีสารเติมแต่งที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ	64
5.26 ดัชนีความเหลืองของสีเคลือบที่ไม่มีสารเติมแต่งและสีเคลือบที่มี UV Absorber และ HALs ที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ	65
5.27 ดัชนีความเหลืองของสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs, สีเคลือบที่ไม่มีสารเติมแต่งแต่มี UV Absorber และ HALs และสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs ในปริมาณมากกว่าปกติ 2 เท่า ที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ	66

รูป (ต่อ)	หน้า
5.28 FTIR spectra ของสีเคลือบที่ก่อนและหลังผ่านการเร่งสภาวะที่ระยะเวลาต่างๆ	67
5.29 การดูดกลืนแสงของพันธะ C-O ของสีเคลือบปกติ และสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ	68
5.30 กลไกการเสื่อมสภาพของอะคริลิกแบบการขาดออกของสายโซ่กิ่ง	68
5.31 การดูดกลืนแสงของพันธะ C-O ของสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนมากกว่าปกติ 2 เท่า ที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ	69
5.32 การดูดกลืนแสงของพันธะ C-H ของสีเคลือบปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ ที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ	70
5.33 การดูดกลืนแสงของพันธะ C-H ของสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนมากกว่าปกติ 2 เท่า ที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ	70
5.34 ดัชนีคาร์บอนิลของสีเคลือบปกติ และสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ ที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ	71
5.35 ดัชนีคาร์บอนิลของสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่าที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ	72
5.36 โครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบ	73
5.37 การบวมตัวของสีเคลือบที่เวลาต่างๆ	74
5.38 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่เวลาในการเร่งสภาวะต่างๆ	75
5.39 การเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบสีดำก่อนการเร่งสภาวะและที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง (ก) ค่า L* (ข) ค่า a* (ค) ค่า b*	76
5.40 การเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบสีเหลืองก่อนการเร่งสภาวะและที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง (ก) ค่า L* (ข) ค่า a* (ค) ค่า b*	77
5.41 การเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบสีเทาก่อนการเร่งสภาวะและที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง (ก) ค่า L* (ข) ค่า a* (ค) ค่า b*	78
5.42 การเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบสีเขียวก่อนการเร่งสภาวะและที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง (ก) ค่า L* (ข) ค่า a* (ค) ค่า b*	79

รูป (ต่อ)	หน้า	
5.43	ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่ผ่านการใช้งานจริงที่เวลาต่างๆ	80
5.44	ภาพถ่ายของสีเคลือบ (ก) ก่อนการทดสอบ (ข) ผ่านการทดสอบที่เวลา 12 เดือน (ค) ผ่านการทดสอบที่เวลา 12 เดือนและทำความสะอาดผิวเคลือบด้วยน้ำสบู่และฟองน้ำ (ง) ผ่านการทดสอบที่เวลา 12 เดือนและขัดผิวเคลือบด้วยน้ำสบู่และแผ่นขัด	81

ประมวลศัพท์และคำย่อ

TiO ₂	=	Titanium dioxide
PVC	=	Pigment Volume Concentration
TSC	=	Total Solid Content
n	=	reflective index
HALs	=	Hindered Amine Light stabilizer
CIE	=	Commission Internationale d'Eclairage

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน ทำให้การใช้เครื่องปรับอากาศภายในอาคารสำนักงานหรือที่พักอาศัยเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงทำให้จำนวนเครื่องปรับอากาศที่ใช้ต่อครัวเรือนมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] แต่การทำงานของเครื่องปรับอากาศนั้นใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูง ซึ่งจากรายงานปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยพบว่า ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ภายในอาคารมากกว่าครึ่งถูกใช้ในระบบปรับอากาศ [2] ซึ่งในปัจจุบันมีการรณรงค์การใช้ไฟฟ้าอย่างประหยัดเนื่องจากน้ำมันซึ่งเป็นทรัพยากรในการผลิตไฟฟ้านั้นกำลังขาดแคลน ดังนั้นการลดความร้อนจากบรรยากาศก่อนเข้าสู่ภายในตัวอาคารจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากการทำงานของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน คือ การติดตั้งฉนวนกันความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้หลังคา

แต่การใช้ฉนวนกันความร้อนประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้เกิดคำถามมากมายในแง่มุมมองของการเลือกใช้ การออกแบบและการติดตั้ง จนถึงการทำบำรุงรักษาฉนวนในระยะยาว เพื่อให้ฉนวนกันความร้อนมีประสิทธิภาพ และคงสภาพไว้ได้นานที่สุด ซึ่งปัญหาที่พบมากในการใช้ฉนวนกันความร้อนได้แก่ ฉนวนเปียกน้ำจากหลังคารั่ว, ฉนวนหลุดออกจากการยึดเกาะ, การเสื่อมคุณภาพของฉนวนกันความร้อน, การสะสมความร้อนในเวลากลางวันและคายความร้อนออกมาในเวลากลางคืน ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระของเครื่องปรับอากาศและเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

จากปัญหาเหล่านี้ ทำให้เกิดแนวคิดใหม่ในการลดความร้อนโดยการสะท้อนความร้อนที่เกิดจากรังสีอาทิตย์ ก่อนถูกดูดกลืนและเปลี่ยนเป็นความร้อนสะสมถ่ายเทเข้าสู่ตัวอาคารต่อไป ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา การเคลือบกรอบอาคารด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Ceramic coating) ได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมการก่อสร้างภายในประเทศ โดยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์นี้สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar reflectance) ได้ถึง 94% [3] ซึ่งสามารถลดปริมาณความร้อนสะสมบนแผ่นหลังคาและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวด้านนอกไปยังผิวด้านในอาคาร ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลงและลดภาระการทำงานของเครื่องปรับอากาศ นอกจากนี้ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแผ่นหลังคาและลดต้นทุนแฝงจากการใช้ฉนวนกันความร้อน แต่ทว่าสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากสีเคลือบสะท้อนสะท้อนรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่เป็นสีขาว ทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการใช้เป็นสีของหลังคาซึ่งเป็นส่วนที่รับความร้อนมากกว่าเมื่อเทียบกับผนัง อีกทั้งสามารถสังเกตคราบสกปรกได้ง่ายเมื่อใช้งาน ประกอบกับความไม่แน่ใจของผู้บริโภคในเรื่องการทนต่อสภาพแวดล้อมและประสิทธิภาพในการใช้งานในระยะยาว

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาและพัฒนาการผลิตสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ให้มีสีที่หลากหลาย และศึกษาอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความร้อนและความชื้น ต่อการเสื่อมสภาพและการเปลี่ยนแปลงของสีเคลือบสะท้อนความร้อน ซึ่งคาดว่าผลที่ได้ จะทำให้เกิดการพัฒนาการผลิตสีเคลือบสะท้อนสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่มีสีหลากหลาย มีสมบัติสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ดี ทนทานต่อสภาพแวดล้อม การใช้งาน ทั้งยังเป็นการเพิ่มทางเลือกให้แก่ผู้บริโภคในด้านการประหยัดพลังงาน และเป็นการขยายตลาดสำหรับผู้ผลิตสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยใช้เทคโนโลยีและบุคลากรภายในประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุสีเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการสะท้อนรังสีอาทิตย์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาปริมาณความเข้มข้น โดยปริมาตรของผงสีและความหนาที่เหมาะสมในการผลิตและใช้งานสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนระหว่างไททาเนียมไดออกไซด์และผงสีสะท้อนรังสีอาทิตย์ในการผลิตสีเคลือบชนิดต่างๆ ที่มีประสิทธิภาพในการสะท้อนรังสีอาทิตย์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของสีเคลือบภายใต้การทดสอบแบบเร่งสภาวะ และการทดสอบในระยะยาว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียมสีเคลือบ
 - สีเคลือบที่เตรียม คือ สีขาว สีแดง สีดำ สีเหลือง สีฟ้าและสีเขียว
- 1.3.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ
 - ชนิดของผงสี ซึ่งผงสีที่ใช้ได้แก่ ไททาเนียมไดออกไซด์ และผงสีสะท้อนรังสีอาทิตย์
 - ร้อยละของความเข้มข้นโดยปริมาตรผงสี (%PVC) ที่ปริมาณร้อยละ 1, 3, 5, 10 และ 15 ตามลำดับ
 - ความหนาของผิวเคลือบ โดยปรับความหนาสีเคลือบที่ต่างกัน 6 ค่า
- 1.3.3 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างผงสีสะท้อนรังสีอาทิตย์และไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ร้อยละของความเข้มข้นโดยปริมาตรผงสี (%PVC) ที่ปริมาณร้อยละ 1, 3, 5 และ 10

- 1.3.4 ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุสีเคลือบเมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต
- ด้วยเครื่องเร่งสภาวะ (มาตรฐาน ASTM G 53)
 - การทดสอบระยะยาว (มาตรฐาน ASTM G 7)
- 1.3.4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีของผิวเคลือบ โดยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR) และ UV-VIS-NIR Spectrophotometry.

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป

- 1.4.1 ศึกษาข้อมูลและเอกสารทางวิชาการเกี่ยวกับสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ กระบวนการผลิต และสารเคมีที่ใช้ รวมถึงวิธีทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์
- 1.4.2 ออกแบบการทดลองและจัดเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี ที่ใช้ในการทดลอง
- 1.4.3 ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณของผงสีที่ใช้, ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ในการผสมกับผงสีชนิดอื่น เพื่อปรับสีของผิวเคลือบและความหนาของสีเคลือบ
- 1.4.4 ศึกษาการเสื่อมสภาพของสีเคลือบด้วยเครื่องเร่งสภาวะ (UV-accelerated weathering test) และจากการใช้งานจริง
- 1.4.5 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเคมีของสีเคลือบด้วยเทคนิค FT-IR และการเปลี่ยนแปลงการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบด้วยเทคนิค UV-VIS-NIR Spectrophotometry.

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

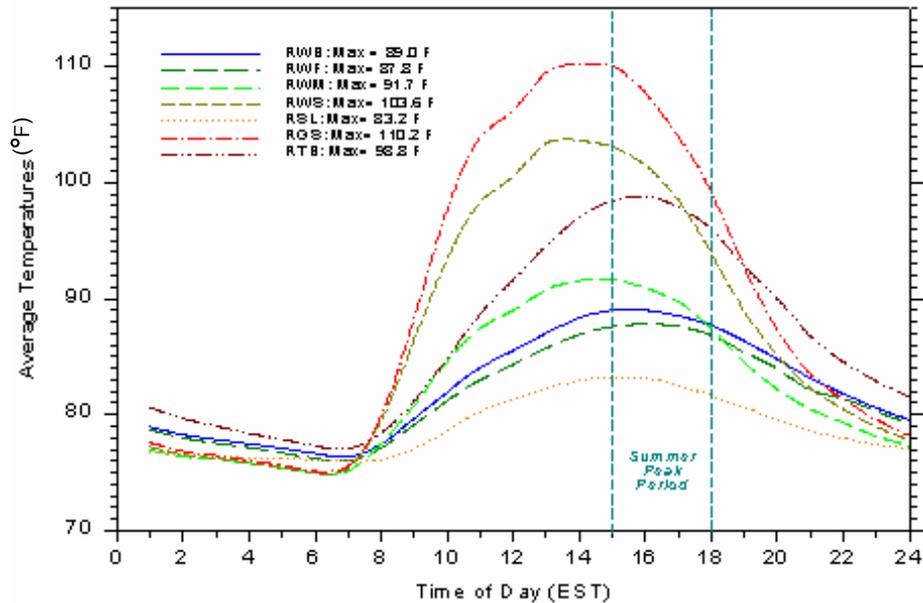
- 1.5.1 ทราบถึงขั้นตอนการเตรียมวัสดุสีเคลือบสะท้อนความร้อน
- 1.5.2 สามารถผลิตสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่มีสีหลากหลายและมีสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ดี
- 1.5.3 ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ
- 1.5.4 ทราบถึงลักษณะการเสื่อมสภาพของสีเคลือบเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตและการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อม
- 1.5.5 สามารถลดการเสื่อมสภาพของสีเคลือบโดยใช้ UV Absorber และ HALs
- 1.5.5 ส่งเสริมและเพิ่มทางเลือกในการใช้สีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประสิทธิภาพในการลดความร้อนของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์

Chandra S. et al. (1998) [4] เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดความร้อนของหลังคา Asphalt shingle ซึ่งเคลือบด้วยสีดำ, สีขาว, สีเทา และสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาว พบว่าหลังคาที่ทำด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวมีประสิทธิภาพในการลดความร้อนสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของหลังคาที่ทำด้วย สีดำ สีขาวและสีเทา พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.05 ,0.25 และ 0.22 ตามลำดับ ส่วนสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงถึง 0.65–0.72 นอกจากนี้ Danny S. P. et al. (2002) [5] ได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวกับสีทางการค้า โดยทาสิบบนหลังคาบ้าน 7 หลังในช่วงฤดูร้อนปี ค.ศ. 2000 ซึ่งควบคุมลักษณะและสภาพของบ้านให้เป็นแบบเดียวกันยกเว้นสภาพหลังคาคือ หลังคากระเบื้องแผ่นเล็กสีเทาดำ (RGS), หลังคาสีดำปกติซึ่งภายใต้หลังคามีการบุนนวนกันความร้อน (RSL), หลังคากระเบื้องสี Terra Cotta (RTB) และหลังคากระเบื้องสีขาว (RWS) เปรียบเทียบกับสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวที่ทาบนหลังคา 3 ชนิดคือ หลังคากระเบื้องลอน (RWB), หลังคากระเบื้องเรียบ (RWF) และหลังคาเหล็ก (RWM) จากนั้นเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในบ้านทุกๆ 15 นาที เป็นเวลา 1 เดือน พบว่าบ้านที่หลังคาทำด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำกว่าบ้านที่มีหลังคาเป็นกระเบื้องแผ่นเล็กสีเทาดำ (RGS) 20 องศาฟาเรนไฮต์, ต่ำกว่าหลังคากระเบื้องสี Terra Cotta (RTB) 10 องศาฟาเรนไฮต์ และต่ำกว่าบ้านที่มีหลังคากระเบื้องสีขาว 7 องศาฟาเรนไฮต์ และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของห้องใต้หลังคาคงแสดงดังรูปที่ 2.1 พบว่าบ้านที่หลังคาทำด้วยกระเบื้องแผ่นเล็กสีเทาดำ (RGS) มีอุณหภูมิสูงถึง 110 องศาฟาเรนไฮต์ ในขณะที่บ้านที่ทาหลังคาด้วยสีเคลือบสะท้อนความร้อนทั้ง 3 หลังมีอุณหภูมิเพียง 90 องศาฟาเรนไฮต์ เมื่อพิจารณาภาระการทำความเย็นของบ้านที่หลังคาเป็นกระเบื้องแผ่นเล็กสีเทาดำ (RGS) พบว่ามีภาระการทำความเย็น 17 kWh ต่อวัน, บ้านที่ใช้หลังคากระเบื้องสี Terra Cotta (RTB) มีภาระการทำความเย็น 16.2 kWh ต่อวัน, บ้านที่ใช้หลังคากระเบื้องสีขาว (RWS) มีภาระการทำความเย็น 15.6 kWh ต่อวัน, บ้านที่ใช้หลังคาสีดำซึ่งภายใต้หลังคาบุนนวนกันความร้อน (RSL) มีภาระการทำความเย็น 14.9 kWh ต่อวัน และบ้านที่ทาหลังคาด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์มีภาระการทำความเย็น 13.3 kWh ต่อวัน หากพิจารณาจากวันที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด พบว่าบ้านที่ทาหลังคาด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สามารถลดภาระการทำความเย็นได้ถึง 23-33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับบ้านที่มีหลังคาสีเทาดำ (RGS) ส่วนบ้านหลังคาสีดำที่ภายใต้หลังคามีการบุนนวนกันความร้อน (RSL) สามารถลดภาระการทำความเย็นได้

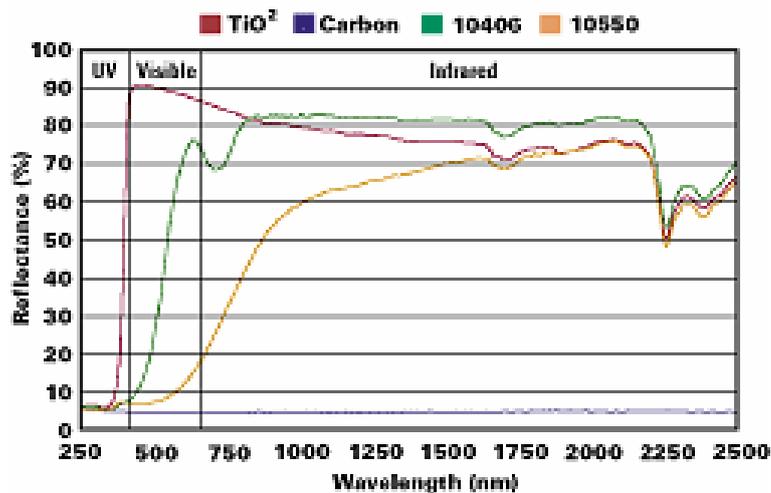
ใกล้เคียงกับบ้านที่มีหลังคากระเบื้องสี Terra Cotta (RTB) คือ ปริมาณร้อยละ 11 เมื่อเปรียบเทียบกับบ้านที่มีหลังคาสีเทา (RGS)



รูปที่ 2.1 อุณหภูมิห้องใต้หลังคาของบ้านที่สภาพหลังคาแตกต่างกันในการทดลอง [5]

นอกจากนี้ อนุสรฯ ศรีสรวล (2545) [3] ได้ทำการศึกษาวัดคุณสมบัติของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เตรียมจากการผสมไททาเนียมไดออกไซด์ สารเพิ่มเนื้อ และสารยัด โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ได้แก่ สัดส่วนสารยัด, ชนิดผงสี, สารเพิ่มเนื้อ, ปริมาณ TiO_2 , ความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงสี (PVC) และความหนาผิวเคลือบ จากการทดลองพบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ขึ้นกับชนิดผงสี ปริมาณ TiO_2 และความหนาผิวเคลือบ แต่ไม่ขึ้นกับสัดส่วนของสารยัด โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TiO_2 และความหนาผิวเคลือบส่งผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวค่าหนึ่ง ที่ถึงแม้ปริมาณ TiO_2 และความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นแต่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ก็ยังคงที่ นอกจากนี้ยังพบว่า สารเคลือบทั้งที่มีน้ำยางธรรมชาติ และน้ำยางสังเคราะห์ ผสมในสารยัด ให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกัน รวมถึงให้สมบัติทางกลและทางกายภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและพบว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบลดลงมากในช่วงแรกของการทดสอบ และเริ่มน้อยลงจนคงที่ และเมื่อทดสอบโดยการวางผิวเคลือบนี้บนหลังคาพบว่าผิวเคลือบที่ได้มีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวเคลือบทางการค้าถึง 13 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าสีขาวจะเป็นสีที่นิยมในการผลิตสารเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ ซึ่งสามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดี แต่อย่างไรก็ตามสีขาวหรือสีโทนอ่อนกลับไม่เป็นที่นิยมในการใช้เป็นสีหลังคาของบ้านพักอาศัย จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะผลิตสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ให้หลากหลายมากขึ้น โดย Smith G.B. et al. (2002) [6] ทดลองผลิตสีจากผงสีโลหะของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เคลือบบนผิว

อะลูมิเนียม พบว่าผิวเคลือบที่ได้มีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดได้ดีกว่าการใช้ผงสีทั่วไป ทำให้สามารถลดภาระในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ อีกทั้งยังมีสีให้เลือกใช้งานได้หลากหลาย นอกจากนี้ได้ทำการเคลือบผิวชั้นเดียวและสองชั้น โดยเคลือบ Fe_2O_3 ลงบน SiO_2 ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหต่างกัน ทำให้สีที่ได้จากการเคลือบด้วย Fe_2O_3 ชั้นเดียวจะเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่สีเหลือง ชมพู เทา จนถึงสีม่วง เมื่อความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น ส่วนผิวเคลือบสองชั้นนั้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีนอกจากจะขึ้นกับความหนาของผิวเคลือบแล้วมุมตกกระทบของรังสีก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผิวเคลือบมีสีสันทากหลาย นอกจากนี้ Smith G.B. et al. (2002) [6] ได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงพลังงานของสีที่ใช้ Fe_2O_3 เป็นผงสี เปรียบเทียบกับสีทางการค้าทั่วไป โดยใช้แบบจำลองในที่ร่มและกลางแจ้ง ซึ่งในที่ร่มทดสอบโดยใช้หลอดไฟขนาด 800 วัตต์ ฉายไปยังผิวโลหะที่ถูกทาสีด้วยสีดำและสีทอง เปรียบเทียบกับผิวโลหะที่ทาสีด้วยสีทองและสีทองแดงที่มี Fe_2O_3 เป็นผงสี จากการทดลองพบว่า ผิวเคลือบที่มี Fe_2O_3 เป็นผงสีมีอุณหภูมิต่ำกว่าสีดำและสีทองทางการค้า 33 และ 16 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนสีทองแดงมีอุณหภูมิต่ำกว่าสีดำและสีทองทางการค้า 20 และ 12 องศาเซลเซียสตามลำดับ เมื่อพิจารณาการทดสอบกลางแจ้ง พบว่าอุณหภูมิภายใต้โลหะที่ทาสีด้วยสีทองที่มี Fe_2O_3 เป็นผงสีมีอุณหภูมิต่ำกว่าสีดำและสีทองทางการค้า 15 และ 8 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนโลหะที่เคลือบด้วยสีทองแดงมีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะที่เคลือบด้วยสีดำและสีทองทางการค้า 13 และ 6 องศาเซลเซียสตามลำดับ ทำให้สีที่มีส่วนผสมของ Fe_2O_3 สามารถลดภาระการทำความเย็นได้ถึง 50% เมื่อเปรียบเทียบกับสีทางการค้าทั่วไป นอกจากนี้ Degussa Metal Catalyst Cerdec (2000) [7] ได้ผลิตผงสีสีดำซึ่งสามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดี โดยสังเคราะห์โครเมียมออกจากผงสีสีดำชนิดเดิม ซึ่งเป็นผลให้ผงสีที่ได้มีโทนสีดำขึ้นและมีค่าการสะท้อนรังสีในช่วงเนียร์อินฟราเรดได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากโครเมียมมีผลในการดูดซับรังสีอาทิตย์ในช่วงนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ระหว่างสีดำที่ผลิตได้กับสีดำทั่วไปซึ่งผงสีคือคาร์บอนแบล็ค พบว่าสีดำที่ผลิตได้มีการสะท้อนรังสีอาทิตย์มากกว่าสีดำทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.2

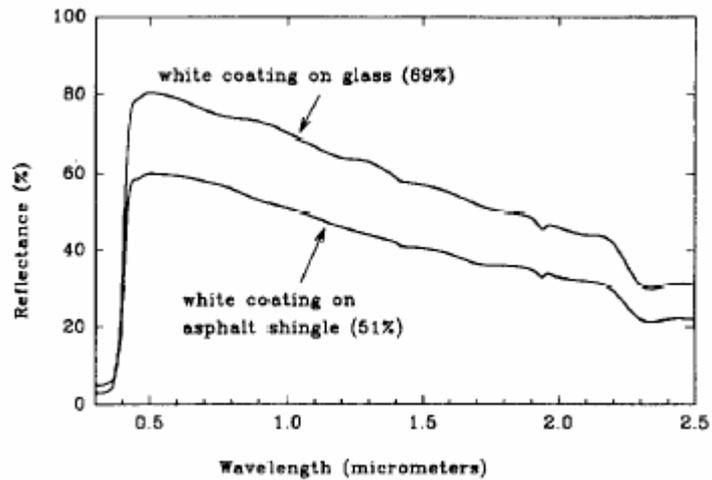


รูปที่ 2.2 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีค่าที่ผลิตได้เทียบกับสีค่าทั่วไป [7]

2.2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

2.2.1 อิทธิพลของความเรียบผิวเคลือบ

ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุคือ ความเป็นไปได้ที่โปรตอนสะท้อนออกมาเมื่อรังสีตกกระทบวัสดุ เมื่อพิจารณาผิวขรุขระ พบว่าโปรตอนมีการสะท้อนไปมาที่ผิวก่อนจะสะท้อนออกมาจากผิวทำให้ผิวสามารถดูดกลืนโปรตอนได้เป็นจำนวนมาก แตกต่างจากผิวเรียบซึ่งจะมีการสะท้อนของโปรตอนที่ผิวน้อยกว่า จึงสามารถสะท้อนจำนวนโปรตอนกลับไปได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Paul B. (1997) [8] ซึ่งทดสอบอิทธิพลของความเรียบต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบ โดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีขาวบนกระเบื้องคอนกรีต (Asphalt shingles) ซึ่งมีผิวขรุขระกับสีเคลือบสีขาวบนแก้วซึ่งมีผิวเรียบ โดยมีความหนาของสีเคลือบเท่ากัน พบว่าลักษณะกราฟการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบทั้งสองมีรูปร่างเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เริ่มแตกต่างกันที่ความยาวคลื่น 0.5 ไมโครเมตร โดยผิวเคลือบที่เรียบมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่า ผิวเคลือบขรุขระ 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงตามองเห็น (visible absorbance) พบว่าผิวเรียบมีการดูดกลืนพลังงานแสง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าผิวขรุขระซึ่งมีการดูดกลืนพลังงานแสงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ Oren N. et al. [9] ได้ศึกษาผลของความเรียบบนหลังคาเหล็กต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยสร้างแบบจำลองหลังคาเหล็กในรูปแบบต่างๆ พบว่าหลังคาเหล็กที่ถูกทำให้ขุ่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงจะมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงเมื่อเทียบกับหลังคาเหล็กที่เรียบ ซึ่งการลดลงของค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นกับมุมของแสงที่ตกกระทบหลังคา



รูปที่ 2.3 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบที่เรียบและขรุขระ [9]

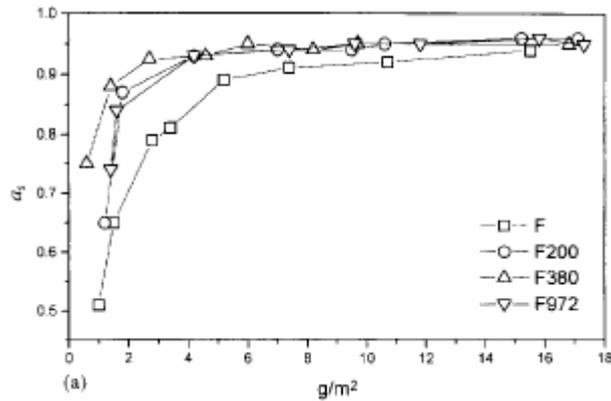
2.2.2 อิทธิพลของสารเจือปน

Smith G, et al. (2006) [10] ได้ศึกษาผงสีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งใช้ในการทำอิฐสีแดง หรือผสมเป็นผงสีเคลือบบนคอนกรีต และหลังคา พบว่าใน Fe_2O_3 มีสารประกอบของ Fe_3O_4 ที่ให้สีดำ ซึ่งไม่มีผลต่อการแยกความแตกต่างของสี เนื่องจากมี Fe_3O_4 ผสมอยู่ในปริมาณน้อย แต่ส่งผลกระทบต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ซึ่งลดลงมากในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1.1 ถึง 2.1 ไมโครเมตร สามารถแก้ไขได้โดยการเผาผงสีในอากาศ ทำให้ Fe_3O_4 ที่เจือปนอยู่เกิดการออกซิไดซ์เป็น Fe_2O_3 วิธีนี้ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 1.1-2.1 ไมโครเมตรเพิ่มจาก 0.2 เป็น 0.8

2.2.3 อิทธิพลของความหนาผิวเคลือบ

Hong Y. O. et al. (2001) [11] ได้ศึกษาอิทธิพลของความหนาผิวเคลือบต่อค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวที่มี TiO_2 17% PVC โดยศึกษาความหนาของผิวเคลือบตั้งแต่ 28-163 ไมโครเมตร พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดคือ 0.93 ที่ความหนา 134 ไมโครเมตร จากนั้นค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จะคงที่แม้ความหนาจะเพิ่มขึ้นก็ตาม เนื่องจากที่ความหนาของผิวเคลือบน้อย แสงสามารถเดินทางผ่านผิวเคลือบได้ แต่เมื่อความหนาผิวเคลือบมากขึ้น แสงสามารถเดินทางผ่านได้น้อยลงทำให้มีแสงส่วนที่สะท้อนกลับมากขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่แสงไม่สามารถเดินทางผ่านผิวเคลือบได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจุดนี้ทำให้เกิดการดูดกลืนและสะท้อนกลับของแสงอย่างสมบูรณ์ ทำให้แม้ความหนาจะเพิ่มขึ้นแต่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ยังคงเท่าเดิม ซึ่งสอดคล้องกับ Zorica C. (1996) [12] ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีเคลือบที่มีโลหะ

ออกไซด์เป็นผงสี ดังแสดงดังรูปที่ 2.4 พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของผิวเคลือบมากขึ้นเมื่อความหนาของผิวเคลือบมากขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าสูงสุด และไม่เปลี่ยนแปลงถึงแม้ความหนาจะเพิ่มขึ้นก็ตาม



รูปที่ 2.4 การดูดกลืนแสงอาทิตย์ของผิวเคลือบที่ความหนาต่างกัน

อนุสรณ์ ศรีสรวล (2545) [3] ได้ทดลองอิทธิพลของความหนาผิวเคลือบต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ขึ้นกับความหนาผิวเคลือบ โดยเฉพาะช่วงความหนาน้อยๆ การเพิ่มขึ้นของความหนามีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มาก แต่เมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จะลดลงเรื่อยๆ จนถึงความหนาช่วงหนึ่งที่ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2.2.4 อิทธิพลของขนาดอนุภาคผงสี

Norman S. et al., (2003) [13] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางแสงของ TiO_2 คือ ดัชนีหักเห (Refractive index) = 2.5-2.7 และขนาดอนุภาคของ TiO_2 โดยทฤษฎีการกระเจิงแสงของ Mie (Mie light scattering theory) [14] กล่าวว่าขนาดอนุภาคที่เหมาะสมของ TiO_2 สามารถกระเจิงแสงได้สูงและทึบแสงในช่วงที่ตามองเห็น ซึ่งการกระเจิงแสงนั้นขึ้นกับความแตกต่างระหว่างดัชนีหักเหของผงสีกับสารยึด จากการศึกษในปัจจุบันพบว่า TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร สามารถป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ ทำให้ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเป็นที่นิยมในงานสีเป็นอันมาก แต่ทฤษฎีของ Mie นั้นไม่สามารถอธิบายการกระเจิงแสงของ TiO_2 ในระดับนาโนเมตรได้เพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำทฤษฎีอื่นเข้ามาช่วยด้วย โดยทฤษฎีที่สามารถอธิบายสมบัตินี้ได้คือ ทฤษฎีของ Rayleigh [14] พบว่าอนุภาคของ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรนี้ สามารถกระเจิงแสงได้ดีในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นนี้อนุภาคขนาดเล็กสามารถเกิดการกระเจิงได้ดี โดยความเข้มแสงที่ถูกกระเจิงโดย TiO_2 ขนาดเล็กเป็นสัดส่วนกับ Fourth Power ของ

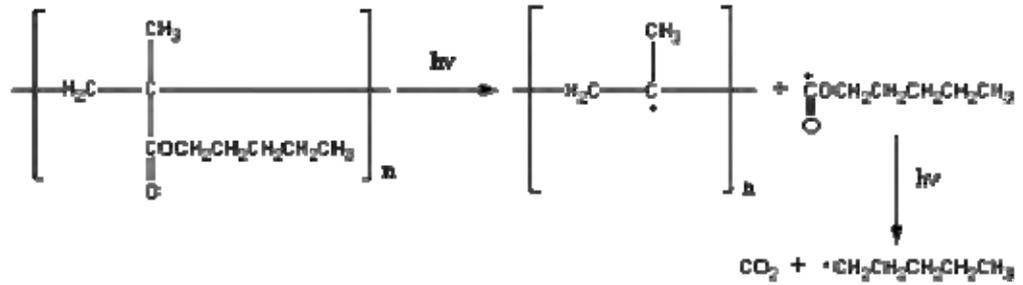
ความยาวคลื่น ดังนั้นในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นอนุภาคนาโนเล็ก (5-15 นาโนเมตร) จะมีกำลังในการกระเจิงแสงลดลง ทำให้แสงสามารถเดินทางผ่านไปได้เป็นผลให้อนุภาคโปร่งใสมากกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนปกติ และในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ 200-300 นาโนเมตร TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร จะมีพฤติกรรมเป็นสารกึ่งตัวนำ เป็นผลให้พลังงานแสงถูกดูดกลืนได้ดี

2.2.5 อิทธิพลของเวลาในการบดผงสี

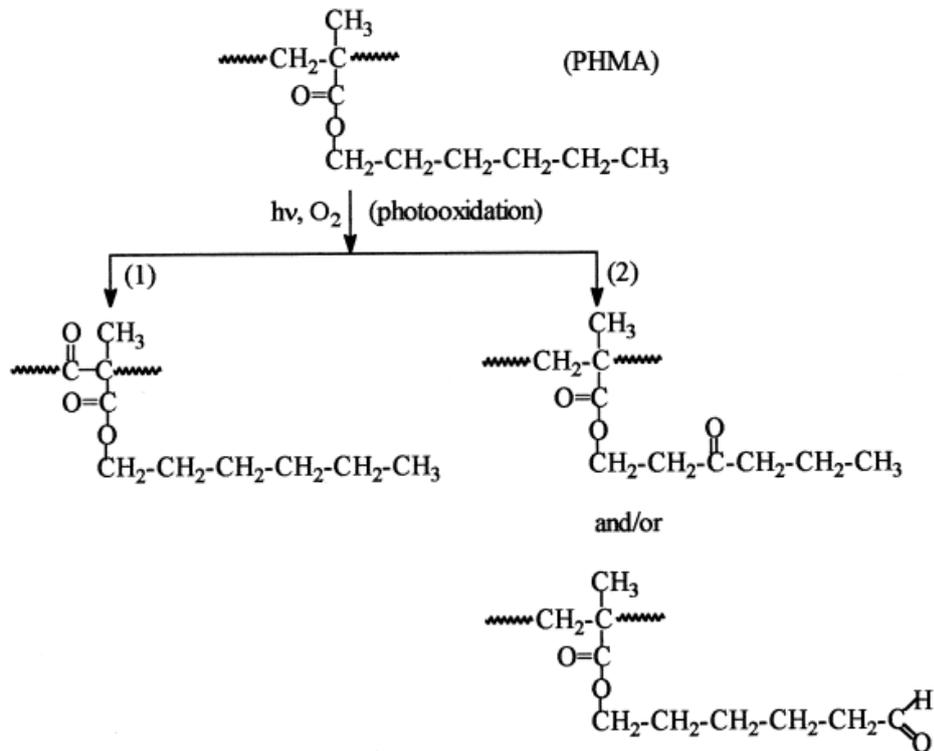
Marta, et al. (2003) [15] ได้ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการบดผงสีเหล็กออกไซด์ต่อขนาดของผงสีและการกระจายตัวของผงสีในสารยึด พบว่าการใช้เวลาในการบดผงสีเป็นเวลานาน ทำให้การกระจายตัวของผงสีดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้สมบัติการกระเจิงแสงและการดูดกลืนแสงดีขึ้น เมื่อคำนวณตัวแปรต่างๆ ตามทฤษฎีของ Kubelka-Munk [14] พบว่าเวลาที่ใช้ในการบดนั้นมีผลต่อการกระเจิงมากกว่าการดูดกลืนแสง

2.3 การเสื่อมสภาพของอะครีลิคพอลิเมอร์

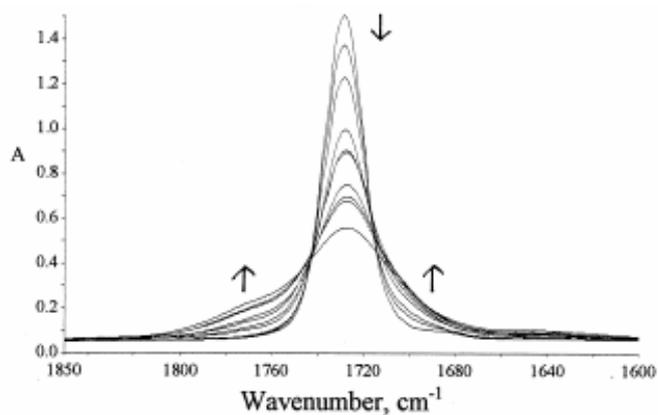
Halina, et al. (1999) [16] ได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของ poly(alkyl methacrylate) ที่มีความยาวของสายโซ่กิ่งแตกต่างกัน 4 ชนิด คือ poly(methyl methacrylate), poly(ethyl methacrylate), poly(n-butyl methacrylate) และ poly(n-hexyl methacrylate) ด้วยการเร่งสภาวะโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อเวลาในการเร่งสภาวะเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ทดสอบด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometry ที่ความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (200-400 นาโนเมตร) ของ poly(alkyl methacrylate) ที่มีสายโซ่กิ่งยาวมีการดูดกลืนแสงมากกว่าที่มีสายโซ่กิ่งสั้น เนื่องจากสายโซ่กิ่งยาวเมื่อเสื่อมสภาพสามารถเกิดโครโมฟอร์ (Chromophore) ที่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ และจากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าการดูดกลืนแสงของหมู่คาร์บอนิล ($1728-1731 \text{ cm}^{-1}$) ซึ่งแสดงถึงปริมาณหมู่เอสเทอร์ในสายโซ่กิ่งลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการเร่งสภาวะเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของหมู่คาร์บอนิลสามารถแสดงได้ดังกลไกในรูปที่ 2.5 แต่ขณะเดียวกันก็สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้หมู่คาร์บอนิลขึ้นใหม่เป็นโครงสร้าง Aliphatic ketones และหมู่ Peracid/Perester ดังกลไกในรูปที่ 2.6 ทำให้การดูดกลืนแสงของหมู่คาร์บอนิล ($1707-1710 \text{ cm}^{-1}$ และ $1754-1760 \text{ cm}^{-1}$) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และพบว่า poly(alkyl methacrylate) ที่มีสายโซ่กิ่งยาวจะเกิดหมู่คีโตนมากกว่า poly(alkyl methacrylate) ที่มีสายโซ่กิ่งสั้น เนื่องจากสายโซ่กิ่งยาวทำให้มีปริมาตรอิสระ (Free volume) ที่ออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปในสายโซ่โมเลกุลได้มากกว่าสายโซ่กิ่งสั้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่า



รูปที่ 2.5 การเสื่อมสภาพของ PHMA [16]



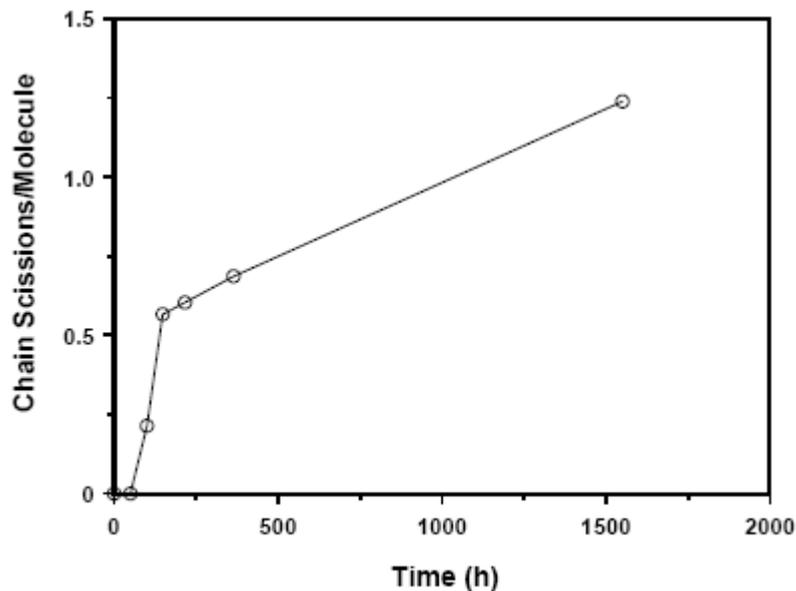
รูปที่ 2.6 การเกิดหมู่คาร์บอนิลใหม่จากการเสื่อมสภาพของ poly(alkyl methacrylate) [16]



รูปที่ 2.7 FTIR สเปกตรัมของ PBMA หลังจากการฉายแสงที่ 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ [16]

นอกจากนี้การเสื่อมสภาพของ poly(alkyl methacrylate) สามารถส่งผลให้ปริมาณของหมู่ C-O ลดลง โดยพบว่า poly(alkyl methacrylate) ที่มีสายโซ่กิ่งสั้นจะมีการลดลงของหมู่ C-O เร็วกว่า poly(alkyl methacrylate) ที่มีสายโซ่กิ่งยาว เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่กิ่งยาวทำให้มีช่องว่างระหว่างสายโซ่หลักมาก และสายโซ่โมเลกุลมีความยืดหยุ่นสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่กิ่งสั้นทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปในพอลิเมอร์และเร่งให้เกิดปฏิกิริยา Photooxidation ได้มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่กิ่งสั้น

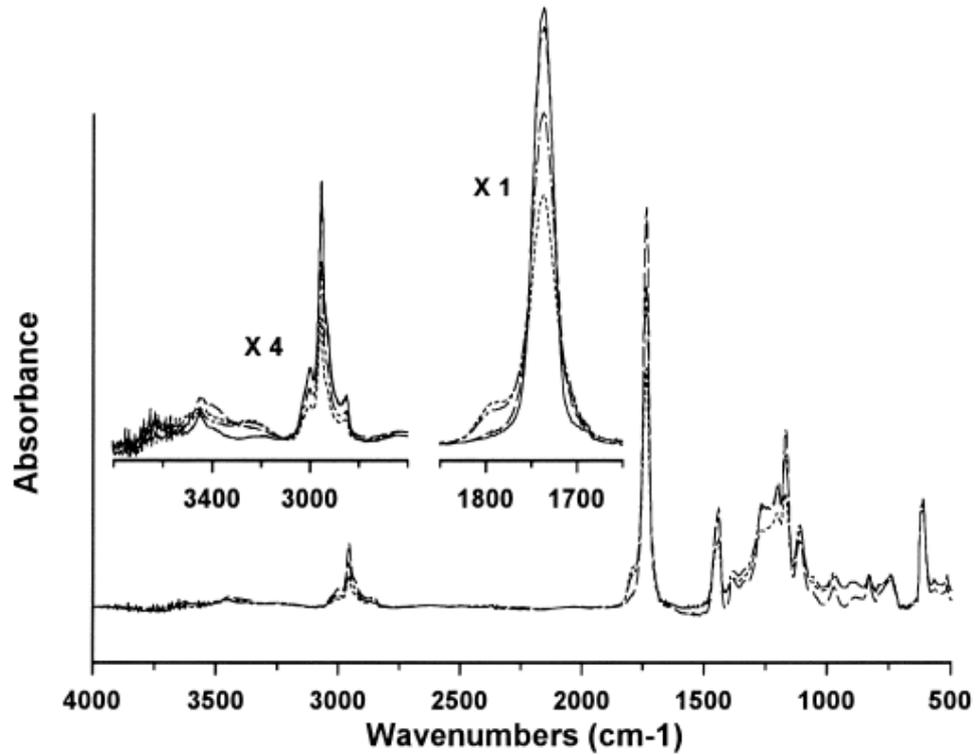
Chaintore, et al. (1999) [17] ศึกษาการเสื่อมสภาพของ polymethyl acrylate (PMA) ด้วยการเร่งสภาวะโดยการฉายรังสียูวี พบว่าในช่วงแรกของการเสื่อมสภาพน้ำหนักของ PMA เริ่มหายไปทีละเวลาตั้งแต่ 100 ชั่วโมง จนถึงที่เวลา 1,500 ชั่วโมงพบว่าน้ำหนักของ PMA หายไปถึง 27% และเมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลด้วยเทคนิค Size Exclusion Chromatography (SEC) พบว่าสายโซ่โมเลกุลเกิดการขาดจากกัน (Chain scission) และจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการขาดของสายโซ่ต่อโมเลกุลกับเวลาในการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.8 พบว่าการขาดของสายโซ่ในช่วงแรกของการทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ แสดงว่าการเสื่อมสภาพเกิดมากในช่วงแรกของการทดสอบ



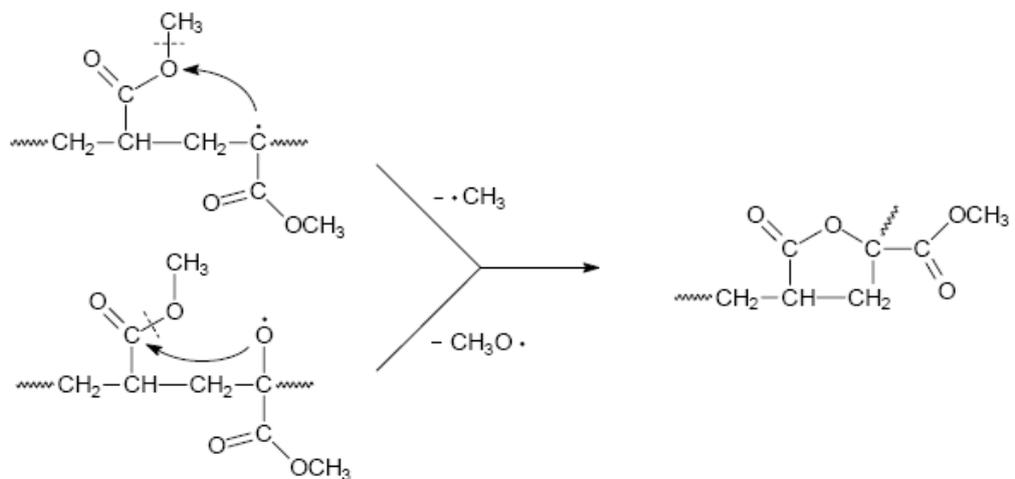
รูปที่ 2.8 การขาดออกของสายโซ่ต่อ โมเลกุลเริ่มต้นของ PMA ที่เวลาในการเร่งสภาวะต่างๆ [17]

เมื่อทดสอบการเสื่อมสภาพของ PMA ด้วยเทคนิค FT-IR ดังแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่าความสูงของพีคที่เกิดจากหมู่คาร์บอนิลที่ตำแหน่ง 1710 cm^{-1} ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการลดลงนี้เกิดจากการลดลงของหมู่เอสเทอร์ที่ตำแหน่งกิ่งของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักของ PMA ที่ลดลงจากการ

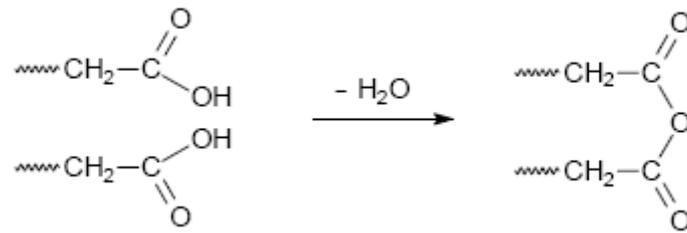
ทดลองในตอนแรก นอกจากนี้ยังพบหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 1760-1800 cm^{-1} ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากการฟอร์มของโครงสร้าง γ -lactone และการเกิดโครงสร้าง anhydrides ซึ่งกลไกการเกิดโครงสร้างทั้งสองนี้สามารถแสดงดังในรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 FT-IR สเปกตรัมของ PMA ก่อนการเร่งสภาวะและที่เวลาในการเร่งสภาวะที่ 100, 216 และ 532 ชั่วโมง [17]



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดโครงสร้าง γ -lactone [17]



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิด โครงสร้าง Anhydrides [17]

บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

3.1 องค์ประกอบของสารเคลือบ

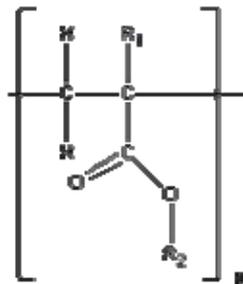
วัตถุประสงค์ในการเคลือบผิวมีด้วยกัน 2 ประการ คือ เพื่อป้องกันพื้นผิวจากมลภาวะต่างๆ และเพื่อตกแต่งให้สวยงาม ซึ่งสารเคลือบมีองค์ประกอบ 3 อย่างด้วยกัน คือ สารยึดหรือสิ่งนำสี ผงสี และสารเติมแต่ง

3.2 สารยึดหรือสิ่งนำสี

สารยึดหรือสิ่งนำสี คือสารที่ทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของสารประกอบในสีเข้าด้วยกันทำให้เกิดเป็นฟิล์มติดกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ซึ่งสารยึดมีหลายประเภทตามลักษณะการเคลือบผิว ที่เหมาะสำหรับการใช้งานภายนอกอาคารนั้นต้องมีสมบัติทนต่อการเสื่อมสภาพจากแสงอัลตราไวโอเลต ความร้อน และสภาพแวดล้อม ตัวอย่างของสารยึดได้แก่

อะครีลิกอิมัลชัน (Acrylic emulsion)

อะครีลิกอิมัลชันหรืออะครีลิกเรซินคือ โพลีเมอร์ และโคโพลิเมอร์ที่เตรียมได้จากกรดอะครีลิก หรืออนุพันธ์ของกรดอะครีลิก) เช่น กรดเมทาครีลิก (และเอสเทอร์ของกรดเหล่านี้ (เช่น เมทาคริลเลตเอสเทอร์) ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของอะครีลิก

อะครีลิกอิมัลชันได้รับความนิยมอย่างแพร่ในอุตสาหกรรมเคลือบผิว เช่น ใช้เป็นสีทาทั้งภายนอกและภายในตัวอาคาร เนื่องจากมีสมบัติเด่น ได้แก่ ความคงทนต่อแสงอัลตราไวโอเลต, มีสมบัติทางกลที่ดี,

มีความคงทนต่อเคมีภัณฑ์ที่กัดกร่อน, มีความเงาของฟิล์มสูง, ผสมเข้ากับผงสีได้ดี, มีการยึดเกาะผิวหน้าดีและมีความแข็งแรงทนทาน

3.3 ผงสี

ผงสีเป็นสารที่ให้สีเพื่อความสวยงามและมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิว ซึ่งผงสีถูกจำแนกตามแหล่งกำเนิดและส่วนประกอบได้เป็น 2 ประเภท [18] ดังนี้คือ

3.3.1 ผงสีอนินทรีย์ (Inorganic Pigment) ซึ่งแบ่งได้ย่อยเป็น 4 ชนิดคือ

1.1 Earth Pigments เป็นผงสีธรรมชาติ ที่ได้จากการนำหินต่าง ๆ ไปบด ล้าง และทำให้แห้ง ตัวอย่างของผงสีชนิดนี้ได้แก่ ดินเหลือง (Orches), ดินเผาสีน้ำตาล (Sienna), ดินสีน้ำตาลไหม้ (Umbers) และ Green earth เป็นต้น

1.2 Mineral Pigments เป็นผงสีที่ได้จากแร่ธาตุ ตัวอย่างของผงสีชนิดนี้ได้แก่ โดโลไมต์ (Dolomite) และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

1.3 ผงสีอนินทรีย์สังเคราะห์ (Synthetic Inorganic Pigments) เตรียมได้โดยวิธีตกตะกอนระหว่างปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 สาร ทำให้เกิดเป็นผงสีตกตะกอนออกมา แล้วกรองออก ตัวอย่างของผงสีชนิดนี้ได้แก่ ไททานเนียมไดออกไซด์ ซิงก์ออกไซด์ และอัลตรามารีน (ultramarine) เป็นต้น

1.4 ผงสีโลหะ (Metallic Pigments) เป็นผงสีที่ได้จากการบดโลหะให้ละเอียด เช่น ผงอลูมิเนียม ผงบรอนซ์ และผงสังกะสี เป็นต้น

3.3.2. ผงสีอินทรีย์ (Organic Pigments) ซึ่งยังแบ่งได้อีก 3 ชนิด คือ

2.1 Pigment Dyestuffs คือสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีและไม่ละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ ผงสีเหล่านี้ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดเกลือได้ ตัวอย่างของผงสีชนิดนี้ได้แก่ สารประกอบอะโซ (azo) ที่เป็นสีเช่น โทลูอิดีนเรด (toluidine red) พาราเรด (para reds) เป็นต้น

2.2 โทเนอร์ (Toner Pigments หรือ Toners) คือสีย้อมที่เป็นกรดหรือด่างที่ละลายน้ำได้ แต่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นผงสีโดยตกตะกอนด้วยเกลือโลหะหรือตกตะกอนด้วยกรด เกลือโลหะที่ใช้กัน ได้แก่ เกลือของตะกั่ว แคลเซียม แบเรียม และสตรอนเทียม เป็นต้น ส่วนกรดที่ใช้กัน ได้แก่ กรดแทนนิก (tannic acid) กรดฟอสโฟทังสติก (phosphotungstic acid) และกรดฟอสโฟโมลิบดีนิก (phosphomolybdic acid) เป็นต้น

2.3 เลก (Lake Pigments หรือ Lakes) คือผงสีที่เตรียมจากสีย้อมที่ละลายน้ำได้ โดยทำให้ตกตะกอนลงบนตัวยึด (substrate) ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ และโดยมากก็ใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ สีย้อมที่ละลายน้ำได้เมื่อไปเกาะบนตัวยึดแล้วจะไม่ละลายน้ำ

ผงสีอนินทรีย์และผงสีอินทรีย์ต่างมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งสมบัติของผงสีแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ดังนี้

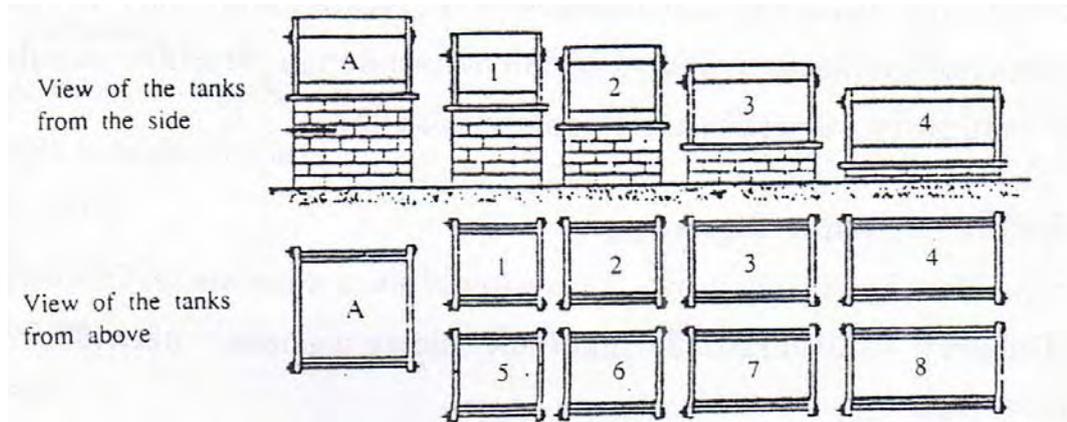
ตารางที่ 3.1 สมบัติของผงสีและการเลือกใช้ผงสี

สมบัติที่ต้องการ	ควรใช้ผงสี	เหตุผล
(1) สีเข้มสดใส	อินทรีย์	ผงสีอินทรีย์ให้สีเข้มและสดใสมากขณะที่ผงสีอนินทรีย์มีกำลังการผสมต่ำต้องใช้ปริมาณมาก
(2) สำหรับทำสีขาว และสีดำ	อนินทรีย์	ผงสีที่ขาวบริสุทธิ์ที่สุดคือ TiO_2 ซึ่งเป็นผงสีอนินทรีย์ และผงสีสีดำที่ดำที่สุด คือคาร์บอนแบล็ก (มักจัดเป็นผงสีอนินทรีย์) ไม่มีผงสีอินทรีย์ที่เป็นสีขาวหรือสีดำ
(3) การไม่เกิดการคายสี	อนินทรีย์	ผงสีอนินทรีย์ไม่ละลายน้ำในตัวทำละลายใดๆ ในขณะที่ผงสีอินทรีย์ละลายได้
(4) ความคงทนต่อแสง	อนินทรีย์	พันธะในโมเลกุลของผงสีอนินทรีย์ทนต่อแสงอัลตราไวโอเล็ตได้มากกว่า
(5) เสถียรภาพต่อความร้อน	อนินทรีย์	ผงสีอินทรีย์ส่วนใหญ่สลายตัวหรือหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า

จากตารางที่ 3.1 พบว่าผงสีอนินทรีย์มีจุดเด่นกว่าผงอินทรีย์หลายประการ เช่น ความทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต ความร้อน และสภาพแวดล้อมต่างๆ ดังนั้นผงสีอนินทรีย์จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสารเคลือบ

3.3.3 ขั้นตอนการผลิตผงสี

1. การบดและการนอนก้น (Grinding and Setting) ใช้สำหรับผลิต Earth pigments และ mineral pigments โดยนำผงสีไปบด แล้วผ่านกระบวนการนอนก้น ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวทำให้สามารถแยกผงสีที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ กันได้รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตผงสีแบบการนอนก้น [19]

นำผงสีที่ผ่านการบดแล้วใส่ในถัง A แล้วปล่อยน้ำเข้าไป จนเต็ม จากนั้นน้ำพร้อมด้วยผงสีจะไหลต่อไปที่ถัง 1 ปล่อยน้ำเข้าไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงถัง 8 ซึ่งระหว่างนั้นผงสีที่อยู่ในถัง 1-4 จะนอนก้น โดยผงสีที่หยาบที่สุดอยู่ในถัง 1 และละเอียดที่สุดอยู่ในถัง 4 จากนั้นกรองเอาผงสีออก เมื่อกรองเสร็จแล้ว ทำการปล่อยน้ำจากถัง A เข้าถัง 1 อีกครั้ง ทำเช่นนี้เรื่อย ๆ โดยระหว่างการปล่อยน้ำนี้ ก็จัดการกรองผงสีที่นอนอยู่ในถัง 5-8 แล้วทำต่อไปเช่นเดิม ทำให้ได้ผงสีที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน

2. การตกตะกอน (Precipitation) เตรียมโดยการทำให้เกิดตะกอนของผงสีที่ไม่ละลายจากปฏิกิริยาระหว่างสารต่าง ๆ วิธีการนี้ใช้สำหรับผลิตผงสีต่าง ๆ กัน เช่น ลิโทโปน (lithopone) โครมเยลโลว์ (chrome yellow) ปรัสเซียนบลู (Prussian blue) และผงสีอินทรีย์ส่วนใหญ่ (เลกและโทนเนอร์)

3. การระเหย (Evaporation) นำวัตถุดิบมาระเหย แล้วผ่านกระบวนการออกซิเดชัน ตัวอย่างผงสีที่ผลิตด้วยวิธีการแบบนี้ได้แก่ แอนติโมนีออกไซด์ ซิงก์ออกไซด์ เป็นต้น

4. การกัดกร่อนโลหะ (Corrosion of Metals) โดยนำโลหะมากัดด้วยกรด ตัวอย่างของผงสีที่ผลิตโดยวิธีการแบบนี้เช่น ผงตะกั่วขาว (White lead)

5. การเผา (Calcination) วิธีการแบบนี้ผลิตโดยการเผาสารที่อุณหภูมิสูง ใช้สำหรับผลิตผงสีประเภทไททาเนียมไดออกไซด์ ลิโทโพน โครเมียมออกไซด์กรีน (chromium oxide green) และอัลตรามารีน ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงรูปที่ 3.3 [19]

ในบางกรณีผงสีบางชนิดสามารถผลิตได้ 2 วิธี เช่น ลิโทโพนผลิตได้โดยการตกตะกอนหรือวิธีเผา แต่ถ้าต้องการให้ผงสีมีคุณสมบัติที่ดีควรผลิตด้วยวิธีการเผา สำหรับการผลิตผงสีไททาเนียมไดออกไซด์ก็เช่นเดียวกัน คือขั้นแรกนำไปตกตะกอนก่อน ทำให้ได้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีน้ำปน จากนั้นนำไปเผาไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีคุณสมบัติดีขึ้น



(ก) เผาแยกสี (Calcine)



(ข) ผสมผงสีกับสารเคมี



(ค) อบก้อนสี



(ง) ผสมน้ำในผงสี



(จ) บดผงสี (Grinding)



(ฉ) ก้อนสีหลังการอบ



(ช) ปั่นกวนให้ผงสีกระจายตัว



(ซ) อบเพื่อไล่ความชื้น



(ด) ผงสี

รูปที่ 3.3 การผลิตผงสีโดยการเผาที่อุณหภูมิสูง [19]

3.4 สารเติมแต่ง [18]

เป็นสารที่เติมลงไปเล็กน้อยเพื่อให้สีเคลือบมีสมบัติต่างๆ ตามต้องการ เช่น ช่วยให้อายุการใช้งานยาวขึ้น, แข็งแรง, ไม่ขึ้นราและมีการกระจายตัวของผงสีที่ดี เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างของสารเติมแต่งที่นิยมใช้ ได้แก่ สารป้องกันการเกิดฟอง สารช่วยการกระจายตัว สารป้องกันเชื้อรา สารเร่งขึ้น สารเร่งแห้ง เป็นต้น

3.4.1 สารป้องกันการเกิดฟอง (Defoamer)

ในการผลิตสารเคลือบอิมัลชันมักพบปัญหาเรื่องการเกิดฟองในระหว่างกระบวนการผลิต และขณะใช้งาน ซึ่งการมีฟองอากาศอยู่ในฟิล์มของสารเคลือบนั้น จะทำให้เกิดรูพรุนเมื่อฟิล์มแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารป้องกันการเกิดฟองในระหว่างกระบวนการผลิต สารป้องกันการเกิดฟองส่วนมาก high surface activity โดยทั่วไปสารป้องกันการเกิดฟองทำงานโดยลดแรงตึงผิวของฟองอากาศทำให้ฟองอากาศจับตัวเป็นฟองขนาดใหญ่ซึ่งมีความเสถียรต่ำทำให้แตกออกในที่สุด สารกันฟองโดยทั่วไปเป็นสารละลายเช่น น้ำมันสัปปะรด (pine oil), ไดบิวทิลฟอสเฟต (dibutyl phosphate) หรือ แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่สั้น (C_6-C_{10})

3.4.2 สารเร่งขึ้น (Thickener)

การเติมสารเร่งขึ้นเพื่อปรับความหนืดของสีเคลือบ โดยสารเร่งขึ้นส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกเซลลูโลส เช่น Hydroxyethyl cellulose ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้เกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลระหว่างพอลิเมอร์โมเลกุลที่มีสายโซ่ยาวทำให้สีมีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งในปัจจุบันพอลิเมอร์เหล่านี้ถูกแทนที่โดย Associative Polymer (AP) ซึ่งประกอบด้วย สายโซ่หลักที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Backbone) และ หมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) รวมเรียกว่า Hydroprobes ซึ่งหมู่ที่ไม่ชอบน้ำจะจับตัวเป็นเหมือนกับโครงสร้าง micelles และ Hydroprobes ที่มีโมเลกุลเหมือนกันสามารถรวมกันเป็นโครงสร้าง micelle ได้เช่นกันเกิดเป็นวง (Loop) เหมือนดอกไม้ แต่ Hydroprobes เหล่านี้สามารถแทรกไปใน micelles อื่นได้ทำให้ micelles เกิดการเชื่อมโยงกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนืดให้กับของเหลว ซึ่งการเชื่อมโยงของ micelles เป็นตัวกำหนดความหนืดของระบบ ซึ่งสารเร่งขึ้นโดยทั่วไปได้แก่ (Hydroxyethyl)cellulose, Tetradecyltrimethylammonium bromide, Polyoxyethylene dodecylether เป็นต้น

3.4.3 สารช่วยการกระจายตัว (Dispersant)

ในการผลิตสีวัตถุประสงค์หลักคือทำให้ผงสีกระจายตัวในสารยึดได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นจึงต้องมีสารช่วยการกระจายตัวเพื่อทำให้ผงสีแตกตัวและกระจายตัวได้ดีขึ้น ซึ่งสารช่วยการกระจายตัวมีให้เลือก

อย่างแพร่หลาย ขึ้นกับชนิดของสารยึดและผงสีที่ใช้ โดยทั่วไปสารช่วยการกระจายตัวเมื่อแตกตัวจะให้ประจุลบ ประจุบวก หรือเป็นกลางขึ้นกับชนิดของสารช่วยการกระจายตัว จากนั้นประจุที่แตกตัวสามารถเข้าจับกับผงสีทำให้ผงสีเปียกและกระจายตัวในสารยึดได้ดีขึ้น ซึ่งตัวอย่างสารช่วยการกระจายตัวได้แก่ sodium carboxymethylcellulose

3.5 การผลิตสีเคลือบ

การผลิตสารเคลือบในอุตสาหกรรมนั้นเป็นการทำให้ผงสีกระจายตัวในสิ่งนำสีหรือสารยึดอย่างมีประสิทธิภาพ [19] ซึ่งขั้นตอนในการผลิตสารเคลือบแสดงในรูปที่ 3.4 มีขั้นตอนดังนี้

3.5.1 การจัดเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation) เป็นการนำวัตถุดิบที่ผ่านระบบการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนผสม

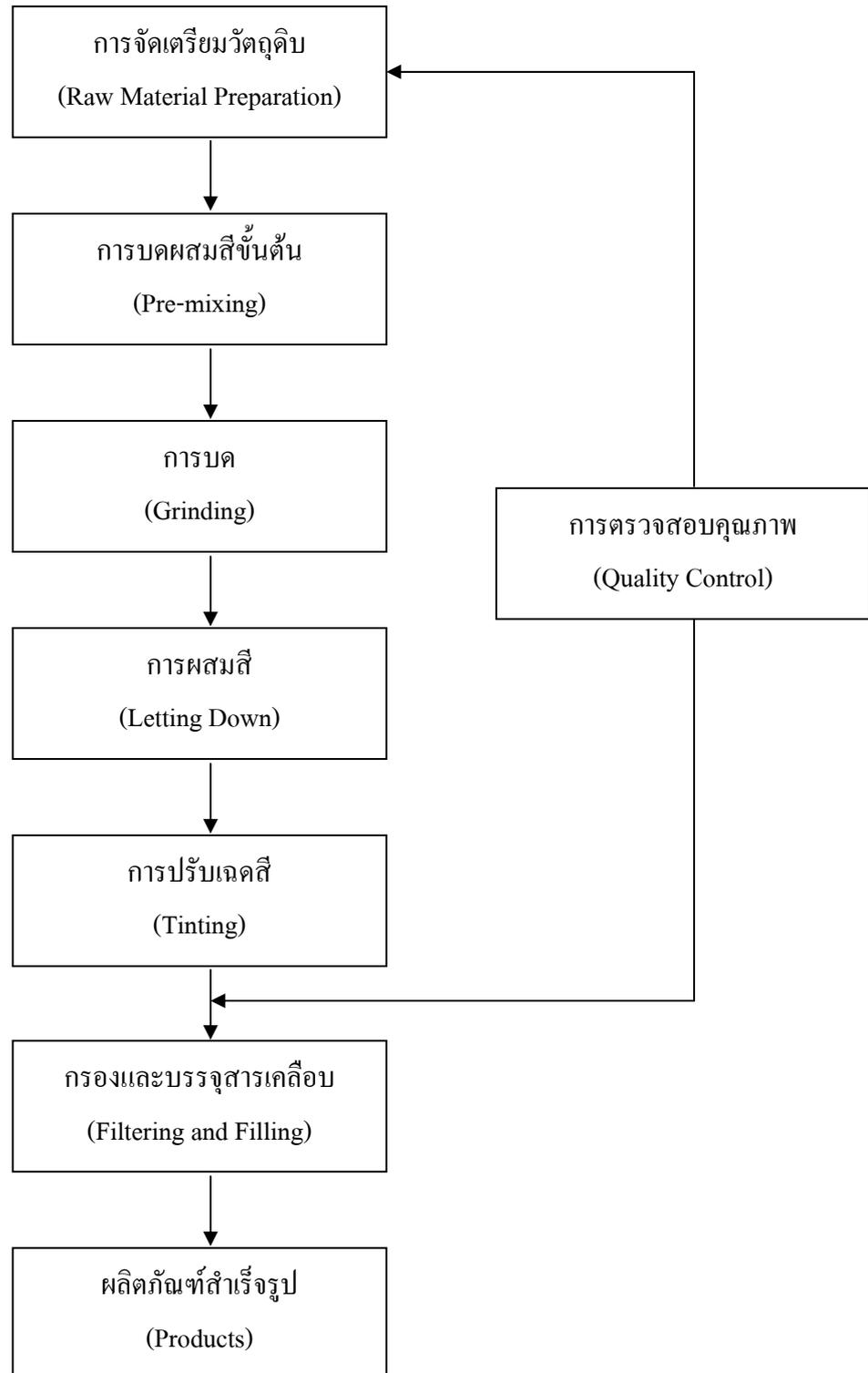
3.5.2 การบดผสมสีขั้นต้น (Pre-mixing) เป็นการผสมผงสี สารยึดและสารเติมแต่งบางส่วนเข้าด้วยกัน

3.5.3 การบด (Grinding) เป็นการทำให้อนุภาคของผงสีแตกตัวหรือมีขนาดเล็กลงตามต้องการ ซึ่งเป็นผลให้ผงสีเปียกและกระจายตัวได้ดี ซึ่งในขั้นตอนนี้มีการผสมเม็ดบดหรือสารช่วยการกระจายตัวของผงสีเพื่อให้ผงสีแตกตัว และเติมสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อให้สารเคลือบมีสมบัติทางกลและกายภาพตามต้องการ

3.5.4 การผสมสี (Letting Down) เป็นการผสมวัตถุดิบส่วนที่เหลือซึ่งเป็นของเหลวเข้าด้วยกัน ได้แก่ สารยึด สารเติมแต่ง ตัวทำละลายของสีอะคริลิก

3.5.5 การปรับเฉดสี (Tinting) เป็นการปรับแต่งสีโดยใช้แม่สี จากนั้นสุ่มตัวอย่างเพื่อตรวจสอบเฉดสีและคุณภาพของสีให้ตรงตามมาตรฐาน เช่น ความหนืด ความหนาแน่น ความละเอียดของเนื้อสี

3.5.6 กรองสิ่งสกปรกและบรรจุสารเคลือบ (Filtering and Filling) เป็นการกรองและบรรจุสีลงในภาชนะบรรจุที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว ได้เป็นผลิตภัณฑ์สีสำเร็จรูป



รูปที่ 3.4 กรรมวิธีการผลิตสีเคลือบ [20]

3.6 อุปกรณ์ในการผลิตสีเคลือบ

ในการผลิตสารเคลือบให้มีประสิทธิภาพนั้น อุปกรณ์ในการผลิตสารเคลือบมีความสำคัญอย่างยิ่งในการทำให้ผงสีกระจายตัวในสารยึดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอุปกรณ์ในการผลิตสารเคลือบที่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรม มี 5 ชนิด คือ

3.6.1 Triple Roll Mill [18]

Triple Roll Mill เป็นเครื่องบดที่ประกอบด้วยลูกกิ้ง 3 ลูกขนาดเท่ากันดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกิ้งโดยทั่วไปคือ 25 – 40 เซนติเมตร และ 60 – 120 เซนติเมตร โดยลูกกิ้งทั้ง 3 หมุนด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน และหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน กล่าวคือลูกกิ้งลูกหลัง หมุนช้าที่สุด และลูกกิ้งลูกหน้าหมุนเร็วที่สุด โดยลูกกิ้งลูกหลังและลูกกลางจะหมุนเข้าหากัน ในขณะที่ลูกกิ้งลูกหน้าและลูกกลางจะหมุนออกจากกัน โดยอัตราหมุนของลูกกิ้งทั้ง 3 ลูกนี้เป็นอัตราส่วนเท่ากับ 1:3:9 และสำหรับช่องว่างระหว่างลูกกิ้งลูกหลัง และลูกกลาง จะมากกว่าช่องว่างระหว่างลูกกิ้งลูกหน้า และลูกกลาง



รูปที่ 3.5 เครื่องบด Triple Roll Mill [21]

การบดเกิดขึ้นเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการผสมแล้วใส่ในถังบรรจุผลิตภัณฑ์จะถูกบดผ่านช่องว่างระหว่างลูกกิ้งลูกหลังและลูกกลางก่อน จากนั้นถูกบดผ่านช่องว่างระหว่างลูกกิ้งลูกกลางและลูกหน้า ดังนั้นช่องว่างยิ่งเล็กจะสามารถบดได้ละเอียดยิ่งขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่บดเสร็จแล้วจะไหลผ่านลูกกิ้งลูกหน้าผ่านตัวชุดแล้วไหลไปเก็บในถาดเก็บ หรือภาชนะบรรจุที่รองรับอยู่ด้านล่าง

เนื่องจากการบดด้วยเครื่อง Triple roll mill มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ใช้เวลานานในการบด การบำรุงรักษา และการทำความสะอาดมีข้อยู่งยาก ทั้งยังไม่เหมาะกับการบดผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยตัว

ทำละลายที่ระเหยง่าย ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้เครื่อง triple roll mill ในอุตสาหกรรมสี แต่ยังมีเครื่องบดชนิดนี้บ้างในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ และอุตสาหกรรมที่ผลิตสารที่มีความเข้มข้นสูง

3.6.2 Sand mill

เครื่อง Sand mill ประกอบด้วยภาชนะรูปทรงกระบอกในแนวตั้ง และน้ำหล่อเย็นภายนอก กลางภาชนะมีแกนพร้อมแผ่นกลมหลายแผ่นซึ่งหมุนด้วยความเร็วสูง แสดงในรูปที่ 3.6 ภายในภาชนะบรรจุทรายซึ่งมีความละเอียด 20-40 เมช หรือลูกแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 - 1 มิลลิเมตร

เมื่อทำการบดผงสีและตัวกลางที่ผ่านการผสมแล้วสารเคลือบจะถูกสูบไปยังก้นของภาชนะ จากนั้นสารเคลือบผสมจะถูกสูบขึ้นไปทางด้านบนของภาชนะ โดยอาศัยการหมุนของแกนเหล็ก วิธีนี้ผงสีจะถูกทำให้กระจายเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างที่สารเคลือบผสมถูกสูบขึ้นไป จนกระทั่งถึงด้านบนสุดของภาชนะ สูบสารเคลือบออกไปเก็บในถังหรือภาชนะอื่นๆ โดยผ่านตระแกรงเพื่อกรองไม่ให้ลูกแก้วหลุดปะปนออกมากับสารเคลือบ

ประสิทธิภาพของเครื่องบด Sand Mill ซึ่งทำให้ผงสีกระจายตัวเนื่องจากการเคลื่อนที่ของลูกบดนั้นสามารถวัดได้จากอัตราการกระจายตัวของผงสี โดยอัตราการกระจายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบดมีขนาดเล็กลง ดังนั้นการใช้ลูกบดทรงกลมที่มีขนาดเล็กมากและกวนในอัตราความเร็วสูงทำให้ได้ผงสีที่มีการกระจายตัวในตัวกลางได้ดีและรวดเร็ว

การใช้เครื่อง Sand mill สามารถบดได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถทำความสะอาดเครื่องได้ง่าย โดยการผ่านตัวทำละลายเข้าไปจากก้นของภาชนะ ดังนั้นเครื่อง Sand mill จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสี



รูปที่ 3.6 (ก) เครื่อง Sand mill, (ข) ใบปั่นกวน [22]

3.6.3 Ball mill

เครื่องบด Ball mill ประกอบด้วยหม้อบดรูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กหรือเซรามิกส์ หมุนในแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 สำหรับหม้อบดที่ทำด้วยเหล็ก ลูกบดที่บรรจุภายในควรใช้ลูกเหล็ก

และใช้บดเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีสีเข้มเท่านั้น เนื่องจากเหล็กอาจหลุดปนในสารเคลือบทำให้สีของสารเคลือบเปลี่ยนแปลงไป แต่ถ้าเป็นหม้อบดที่ทำด้วยเซรามิกส์ เช่น สติไฟต์, อะลูมินา หรือพอร์สเลน สามารถใช้บดผลิตภัณฑ์สีขาวหรือสีอ่อนได้



รูปที่ 3.7 เครื่องบด Ball mill [22]

การใช้งานของเครื่องบด Ball mill นั้น ทำโดยนำวัตถุดิบทั้งหมด และลูกบดใส่ลงในหม้อบด วางหม้อบดบนแกนของเครื่องวาง โดยวางในแนวนอนเปิดสวิตซ์ทำให้แกนของเครื่องวางหมุน ระหว่างการหมุนหม้อบด วัตถุดิบและลูกบดจะเกิดการเหวี่ยงไปมา การบดเกิดขึ้นเนื่องจากการกระทบระหว่าง วัตถุดิบ และลูกบดที่กลิ้งไปตลอดเวลา พร้อมกับการเกิดการเสียดสีระหว่างลูกบด และผนังหม้อบด ดังนั้นถ้าใช้หม้อบดที่ทำด้วยเหล็ก อาจมีเหล็กเจือปนกับผลิตภัณฑ์ ทำให้สีเข้มขึ้น

ประสิทธิภาพในการบดของ Ball mill ขึ้นกับปัจจัยหลายประการดังนี้

1. อัตราการหมุนของหม้อบด
2. ขนาด ปริมาณ และธรรมชาติของลูกบด
3. ปริมาณ และความชื้นเหลวของวัสดุที่นำมาบด

ถ้าสำหรับอัตราการหมุนที่เหมาะสมของหม้อบดจะอยู่ในช่วง 50-60 เปอร์เซนต์ของอัตราเร็ววิกฤต ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราเร็ววิกฤตได้จากสมการ

$$\text{อัตราเร็ววิกฤต} = \frac{54.18}{\sqrt{r}} \quad 3.1$$

r คือรัศมีภายในของหม้อบด (ฟุต)

อัตราเร็ววิกฤต (ฟุต^{-1/2}) หมายถึง อัตราเร็วต่ำสุดที่ทำให้ลูกบดเกิดการเหวี่ยงไปมาได้ โดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง

สำหรับลูกบดที่ใช้มีขนาดเท่าใด ขึ้นกับความหนาแน่นของลูกบด และขนาดของหม้อบด โดยปกติลูกเหล็กที่ใช้กันทั่วไปมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร แต่ถ้าเป็นลูกบดพอร์ซเลน จะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5-3.5 เซนติเมตร ส่วนปริมาณของลูกบดที่ใช้ อยู่ในช่วง 40-50 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรของหม้อบด ในกรณีที่เป็นลูกเหล็กจะใช้ปริมาณที่น้อยกว่าคือ ประมาณ 34-40 เปอร์เซ็นต์ เครื่อง ball mill ไม่เหมาะสำหรับการผลิตอย่างต่อเนื่อง จึงนิยมใช้เครื่อง sand mill ในงานอุตสาหกรรมมากกว่า

3.6.4 Attritor mill

เครื่องบด Attritor mill มีลักษณะเหมือน Ball mill แต่หมุนในแนวตั้ง (Vertical ball mill) ประกอบด้วยหม้อบดรูปทรงกระบอกทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม และภายในบรรจุลูกบด ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งในการบดวัสดุที่ต้องการบดนั้นวัสดุจะถูกกวนพร้อมลูกบดโดยการหมุนของแกนหมุนภายใน ลูกบดที่ใช้อาจเป็นลูกเหล็กหรือลูกสตีไทต์และมักมีขนาดเล็กกว่าลูกบดที่ใช้เครื่อง ball mill การใช้งานของเครื่อง Attritor mill และเครื่อง Ball mill คล้ายคลึงกันมาก เช่น วัสดุที่นำมาบดไม่จำเป็นต้องผ่านการผสมมาก่อน นอกจากนี้ปริมาณของลูกบด และอัตราส่วนระหว่างผงสีและสารยึดที่ใช้เท่ากัน ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่างเครื่องบด 2 ชนิดนี้ คือ เครื่อง Attritor mill จะบดได้เร็วกว่า ทำให้เกิดการกระจายของผงสีสูงในระยะเวลาสั้น



รูปที่ 3.8 เครื่อง Attritor mill [23]

3.6.5 High Speed Disperser

เครื่องบด High Speed Disperser ประกอบด้วยแกนพร้อมใบพัดทำจากแผ่นเหล็กกลม โดยมีลักษณะเหมือนฟันปลาที่ขอบในรูปที่ 3.9 แกนต่อกับมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวปรับอัตราการหมุนของแกนและมีถังสำหรับใส่สารยึดและผงสี ซึ่งในระหว่างการกวนจะมีความร้อนเกิดขึ้น ดังนั้นภาชนะบรรจุ

จำเป็นต้องมีการหล่อเย็น เนื่องจากการใช้เครื่อง High Speed Disperser ทำได้ง่าย จึงนิยมใช้กันมาก สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตสีเคลือบเงา (gloss finishes) จากผงสีที่มีความละเอียดมากๆ นอกจากนี้ ยังนิยมใช้เครื่อง High Speed Disperser สำหรับผสมวัสดุก่อนนำไปบดด้วยเครื่อง Sand mill



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 (ก) เครื่อง high speed disperser, (ข) ใบปั่นกวน [24]

3.7 การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้

3.7.1 ร้อยละโดยปริมาตรของผงสี (Pigment Volume Concentration, PVC)

PVC เป็นค่าที่บอกถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรผงสีต่อปริมาตรสารยึด ดังนั้นค่า PVC สูงจึงหมายความว่า มีปริมาตรสารยึดน้อยเมื่อเทียบกับผงสี หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า ถ้าเพิ่มปริมาณผงสี และลดปริมาตรสารยึด ทำให้ PVC มีค่าสูงขึ้น [18] ดังสมการ

$$\text{PVC (\%)} = \frac{\text{ปริมาตรของผงสี}}{\text{ปริมาตรของผงสี} + \text{ปริมาตรของสารยึดส่วนที่ไม่ระเหย}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2 [25]}$$

ในการคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ใช้ นั้น สิ่งที่ต้องทราบคือ %PVC, ความหนาแน่นของสารเคมีและสารยึด ปริมาณของแข็งบรรจุ (Total Solid Content, TSC) ซึ่งการคำนวณปริมาณผงสีและสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง ถ้าต้องการเตรียมสารเคลือบ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ 10 %PVC ของไททานเนียมไดออกไซด์ (ความหนาแน่น 4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ในสารยึดอะคริลิกอิมัลชัน ที่มี 45%TSC, ความหนาแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเมื่อแห้งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

	ไททานเนียมไดออกไซด์	อะคริลิกอีมีลชัน
ปริมาณฟิล์มแห้ง 100 cc	10	90
ความหนาแน่นของแข็ง (g/cc)	4	1.1
น้ำหนักของแข็งในฟิล์ม* (g)	40	99
%TSC	-	45
น้ำหนักของสารที่ใช้ (g) เมื่อเป็นของเหลว ***	40	198
ความหนาแน่นเมื่อเป็นของเหลว(g/cc)	-	1.01
ปริมาตรสารที่ใช้ *(cc)	10	196
รวมมีปริมาตรสารเคลือบเหลว (cc)	206	
เตรียมสารเคลือบ 100 cc คัดน้ำใช้** (cc)	5	95
น้ำหนักของสารที่ใช้ (g)	20	96

* ใช้สูตร ความหนาแน่น = มวล/ปริมาตร

** เทียบโดยการ ใช้ปริมาตรที่ใช้ให้ใดฟิล์ม 100 cc คูณด้วย (240/177)

***น้ำหนักของสารที่ใช้ (g) เมื่อเป็นของเหลว = (น้ำหนักของแข็ง x 100) / %TSC

3.8 การสะท้อนของรังสีอาทิตย์ในเนื้อผิวเคลือบ

เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง แสงจะมีการสะท้อน หักเหและถูกดูดกลืน ซึ่งในงานสีเคลือบนั้นสมบัติการสะท้อนของรังสีอาทิตย์จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นกับความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index) ระหว่างสีกับอากาศโดยรอบ ซึ่งภายในสีประกอบด้วยผงสีและสารยึด ซึ่งมีดัชนีหักเหต่างกันทำให้มีผลต่อทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งที่มีดัชนีหักเหต่ำ (สารยึด) ไปยังแหล่งที่มีดัชนีหักเหสูง (ผงสี) ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหักเหไปจากแนวเดิม เป็นผลให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเบนออกไปจากผิวของสีเคลือบ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์และผลต่างของดัชนีหักเหของผงสีและสารยึด แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Reflection coefficient} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad \text{สมการที่ 3 [3]}$$

n_1 = ดัชนีหักเหของผงสี

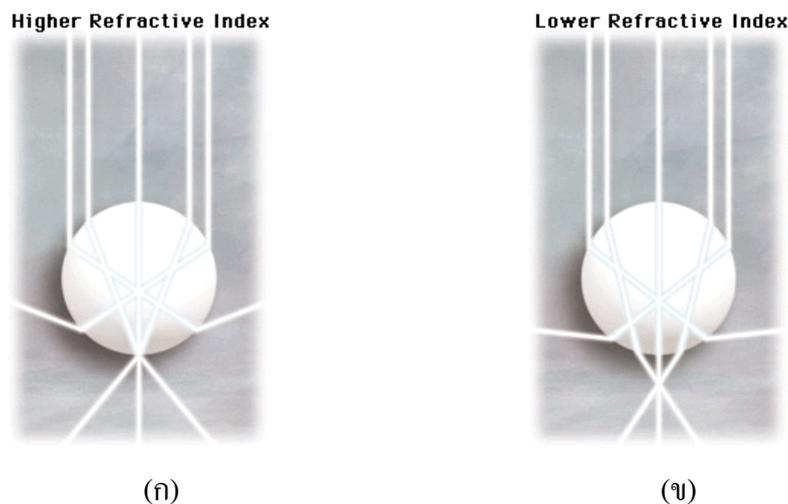
n_2 = ดัชนีหักเหของสารยึด

ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ หาได้จากการวัดค่าการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 นาโนเมตร ถึง 2100 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer และนำผลที่ได้มาเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM E 891

3.8.1 สมบัติการหักเห (Refraction) [26]

การหักเหของของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งซึ่งมีดัชนีหักเหต่างกัน คลื่นส่วนหนึ่งสะท้อนกลับเข้าไปยังตัวกลางที่หนึ่ง โดยมีมุมตกเท่ากับมุมสะท้อน อีกส่วนเดินทางเข้าไปยังตัวกลางที่สองโดยไม่เป็นแนวเส้นตรงจากแนวทางเดิมหรือเกิดการหักเหขึ้น แต่การหักเหออกไปมากน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของดัชนีหักเหของตัวกลางทั้งสอง เมื่อพิจารณาการหักเหในอนุภาคเดี่ยวในรูปที่ 3.10 พบว่าอนุภาคที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า สามารถเกิดการกระเจิงแสงได้มากกว่า เนื่องจากอนุภาคมีดัชนีหักเหแตกต่างจากตัวกลางมากกว่า ทำให้เกิดการโค้งงอของแสงได้มากกว่า เป็นผลให้แสงที่เดินทางออกจากอนุภาคสามารถเบี่ยงเบนออกได้มากกว่า

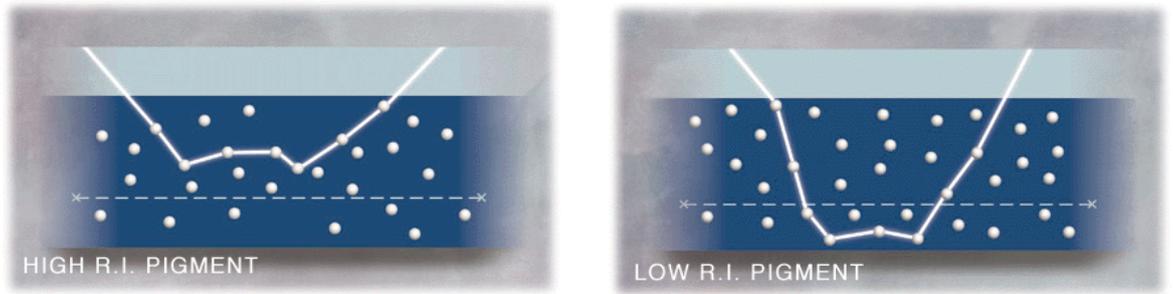
เมื่อเปรียบเทียบการหักเหของแสงในฟิล์มซึ่งมีอนุภาคผงสีที่มีดัชนีหักเหต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 พบว่าฟิล์มที่ผงสีมีดัชนีหักเหสูงจะมีการหักเหของแสงมากกว่าฟิล์มซึ่งผงสีมีดัชนีหักเหต่ำ จึงทำให้ระยะในการเดินทางของแสงสั้นกว่า แสงจึงสามารถเบนออกจากผิววัสดุที่ความหนาต่ำกว่า



รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบการหักเหแสงของอนุภาคที่มีดัชนีหักเหต่างกัน [26]

(ก) ดัชนีหักเหสูง

(ข) ดัชนีหักเหต่ำ



(ก)

(ข)

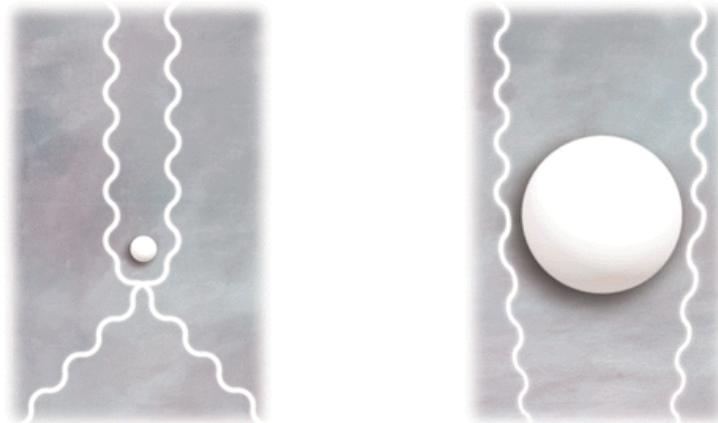
รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบการหักเหของแสงในตัวกลางที่ผงสีมีดัชนีหักเหต่างกัน [26]

(ก) ผงสีมีดัชนีหักเหสูง

(ข) ผงสีมีดัชนีหักเหต่ำ

3.8.2 สมบัติการเลี้ยวเบน (Diffraction)

การเลี้ยวเบนของคลื่นเกิดจากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านวัตถุใดๆ ทำให้คลื่นส่วนหนึ่งเบนไปจากแนวเดิมเพื่อให้สามารถแผ่ไปทางด้านหลังของอนุภาคนั้นได้ ทำให้เกิดการโค้งงอของคลื่น ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่จะมีการโค้งงอของแสงน้อยเมื่อเทียบกับอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้แสงสามารถเลี้ยวเบนจากอนุภาคเล็กได้มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



(ก)

(ข)

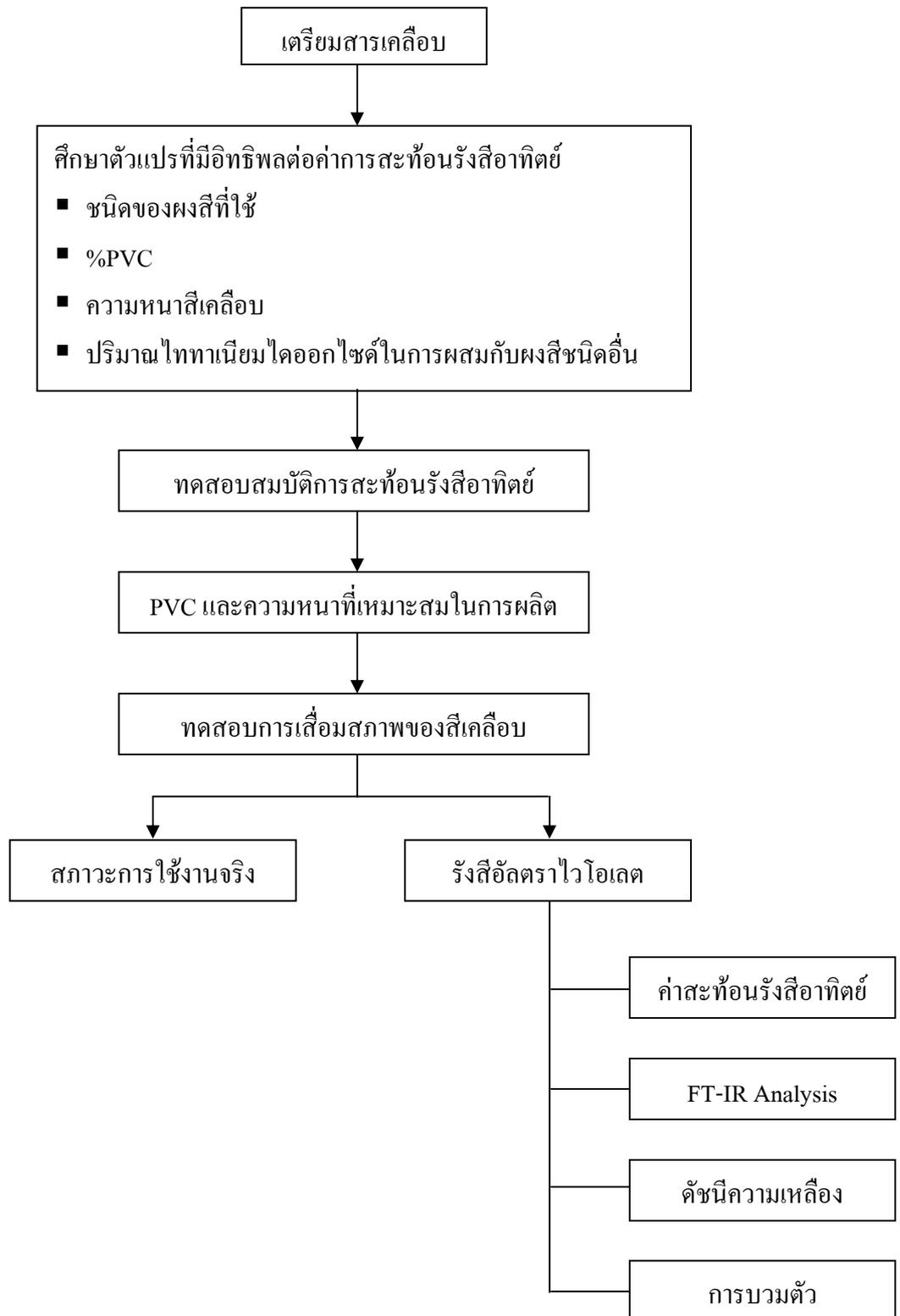
รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบการเลี้ยวเบนของแสงที่อนุภาคมีขนาดต่างกัน [26]

(ก) อนุภาคขนาดเล็ก

(ข) อนุภาคขนาดใหญ่

บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ ดังนั้น ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยเริ่มตั้งแต่ จัดเตรียมเครื่องมือและสารเคมีในการผลิตสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ จากนั้นศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบ คือ ชนิดของผงสี, %PVC, ความหนาผิวเคลือบ และอัตราส่วนของผงสีสีขาว (ไททานเนียมไดออกไซด์) ต่อผงสีสีดำเพื่อปรับเฉดสีและเพิ่มค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ จากนั้นนำสีเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมมาทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลตด้วยเครื่องเร่งสภาวะ (UV-accelerate weathering test) และศึกษาผลของการเติม UV Absorber และ HALs ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ จากนั้นทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบในสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยแสดงดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- อะคริลิกอิมัลชัน 50% Total Solid Content (TSC).
- สารป้องกันการเกิดฟอง
- สารช่วยการกระจายตัว
- สารเร่งขึ้น
- ไททานเนียมไดออกไซด์
- ผงสีโลหะ คือ สีฟ้า สีเขียว สีดำ สีเหลืองและสีแดง
- UV Absorber คือ Hydroxylbenzotriazole
- HALs คือ Decanedioic acid, bis(1,2,2,6,6 pentamethyl-4-piperidiny) ester + Decanedioic acid (1,2,2,6,6 pentamethyl-4-4piperidiny) methyl ester : HA29)

4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์ในการเตรียมสารเคลือบ

- เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง รุ่น PB1502_3 บริษัท Mettler Toledo
- เครื่องปั่นความเร็วรอบสูง (Attritor Mill) รุ่น MN 1/4 บริษัท สยามยูเนียนกลกิต
- แม่แบบที่ใช้สำหรับเคลือบสีที่ความหนาต่างๆ

อุปกรณ์ทดสอบสมบัติทางแสง

- UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer. รุ่น UV-3100 บริษัท Shimadzu, Reflectance Mode, Slit width 20 nm, Interval scan 1 nm, Wave length 190-2100 nm.
- เครื่องวัดความหนาผิวเคลือบ (Thickness tester) รุ่น Elcometer 345 บริษัท Elcomet.

อุปกรณ์ทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ

- เครื่องเร่งสภาวะตามมาตรฐาน ASTM G53
- แผงวางชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM G7
- เครื่อง Fourier Transform Infrared Analyzer รุ่น Equinox 55 ของบริษัท Bruker BioSpin จำกัด

อุปกรณ์อื่นๆ

- เครื่องแก้ว
- แผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีความหนา 0.5 มิลลิเมตร

4.2 การเตรียมสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์

4.2.1 การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสีเคลือบ

การคำนวณปริมาณสารเคมีในการผลิตสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ คำนวณจาก %PVC ของผงสีและสารยึด คัดแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่าง ต้องการผลิตสีเคลือบ 1%PVC ของผงสีสีเหลือง ที่มีความหนาแน่น 4.25 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ในสารยึดที่มีความหนาแน่น 1.08 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีร้อยละของของแข็งโดยปริมาตรเท่ากับ 45

สารเคมี	%PVC	ความหนาแน่น	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	น้ำหนักเปียก (กรัม)
ผงสี	1	4.25	4.25*	4.25
สารยึด	99	1.08	106.9*	237.6**
น้ำ				100.0
รวม				341.85
สารช่วยการกระจาย	1% ของน้ำหนักผงสี			0.42
สารกันฟอง	0.5%ของน้ำหนักเปียก			1.71
สารเร่งชั้น	0.5%ของน้ำหนักเปียก			1.71
รวม				345.69

* น้ำหนักแห้ง = ความหนาแน่นxปริมาตร

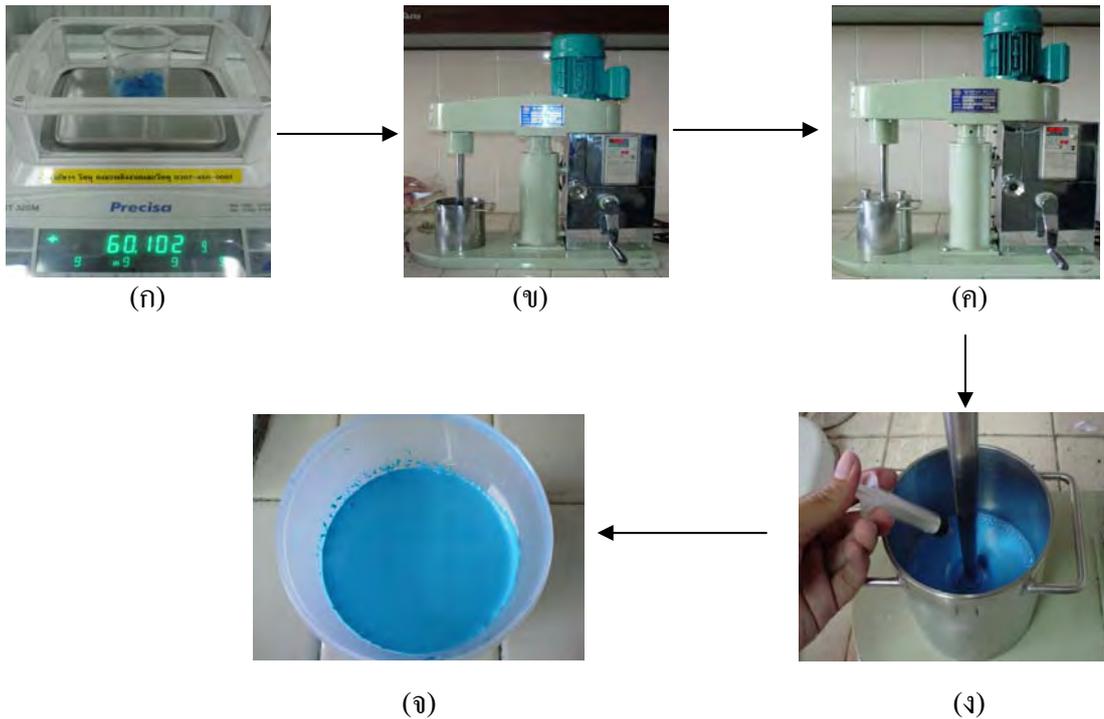
** (น้ำหนักแห้งx100)/45

4.2.2 การผลิตสารเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์

การเตรียมสารเคลือบในงานวิจัยนี้ใช้ เครื่องปั่นความเร็วรอบสูง (Attritor Mill) โดยการเตรียมสารเคลือบแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ตั้งความเร็วรอบของเครื่องปั่นที่ 700 รอบ/นาที
2. ใส่สารยึดและน้ำที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 4.2.1
3. ใส่สารช่วยกระจายครึ่งหนึ่งของที่คำนวณไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1
4. ค่อยๆโรยผงสีลงไปทั้งหมด โดยโรยจากตรงกลาง เพื่อให้ใบพัดปั่นกวนทำงานเต็มที่
5. ปล่อยให้ใบพัดปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นหยุดเครื่องและยกใบกวนเพื่อตรวจสอบว่ามีผงสีติดตามใบกวนหรือก้นภาชนะหรือไม่ ถ้ามีให้ชะออกด้วยแท่งแก้ว

6. ปั่นกวนสารเคลือบต่อเป็นเวลา 10 นาที แล้วตรวจตามหัวข้อ 5 จนตรวจไม่พบ
7. ตั้งความเร็วรอบของเครื่องปั่นที่ 1200 รอบ/นาที
8. ใส่น้ำช่วยกระจายทั้งหมดลงไป
9. ปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นใส่น้ำสารกันการเกิดฟองลงไป และปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที
10. ลดความเร็วของเครื่องปั่นกวนไปที่ 700 รอบ/นาที จากนั้นใส่น้ำสารเร่งขึ้นตามที่กำหนดไว้
11. ปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นกรองสีที่ได้ใส่ในภาชนะปิดสนิท



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการผลิตสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์

- (ก) เตรียมสารเคมี (ข) ผสมสารเคมี
 (ค) ปั่นกวนด้วยความเร็ว 1200 รอบ/นาที
 (ง) ผสมสารเร่งขึ้นพร้อมลดความเร็วในการปั่นกวน
 (จ) สารเคลือบที่ได้

4.3 การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

4.3.1 อิทธิพลของชนิดผงสีและ %PVC ที่มีต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

การศึกษาอิทธิพลของชนิดผงสีและ %PVC ที่มีต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ทำโดยการเตรียมฟิล์มเคลือบที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC ของผงสีชนิดต่างๆ และทำฟิล์มเคลือบที่ได้ลงบนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีหนา 0.5 มิลลิเมตร เมื่อฟิล์มเคลือบแห้งจึงนำไปวัดค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของฟิล์มเคลือบด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยวัดค่าการสะท้อนรังสีในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 ถึง 2100 นาโนเมตร และนำค่าการสะท้อนรังสีที่ได้แต่ละความยาวคลื่นไปคำนวณค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ด้วยการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Average) ตามมาตรฐาน ASTM E891 ต่อไป



รูปที่ 4.3 เครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer

4.3.2 อิทธิพลของความหนาฟิล์มเคลือบที่มีต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

อิทธิพลของความหนาฟิล์มเคลือบศึกษาโดยนำสารเคลือบจากหัวข้อ 4.4.1 ทาลงบนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีหนา 0.5 มิลลิเมตร ที่วางในแม่แบบอะลูมิเนียมที่เจาะรูไว้ที่ความลึกต่างๆกัน เพื่อให้ได้ฟิล์มสีที่มีความหนาแตกต่างกัน 6 ความหนา เมื่อฟิล์มแห้งจึงแกะออกจากแม่แบบ จากนั้นวัดค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของฟิล์มเคลือบที่ %PVC และที่ความหนาต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer และวัดความหนาของฟิล์มเคลือบที่ได้ด้วยเครื่องวัดความหนาผิวเคลือบ (Thickness tester) รุ่น Elcometer 345 บริษัท Elcomet. ดังแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เครื่องวัดความหนาแน่นของพลาสติก

4.3.3 อิทธิพลของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับผงสีชนิดอื่น

การศึกษาปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับผงสีชนิดอื่นเพื่อปรับเฉดสีของสีเคลือบและเพื่อเพิ่มค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์นั้น ศึกษาโดยผลิตสีเคลือบที่ 1, 3, 5 และ 10% PVC โดยแต่ละ %PVC มีอัตราส่วนระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีชนิดอื่นที่ 7:1, 4:1, 3:1, 1: 1 และ 1:3 ตามลำดับ จากนั้นทาสีเคลือบลงบนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีที่วางในแม่แบบอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้ความหนาแตกต่างกัน เมื่อสีแห้งจึงแกะออกจากแบบและนำสีเคลือบที่ได้มาทดสอบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ

4.4 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ

การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบด้วยเครื่องเร่งสภาวะและการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยการพ่นสีเคลือบแต่ละสีที่มีความหนา 350 ± 30 ไมครอน บนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีขนาด 6×6 เซนติเมตร และปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบต่อไป

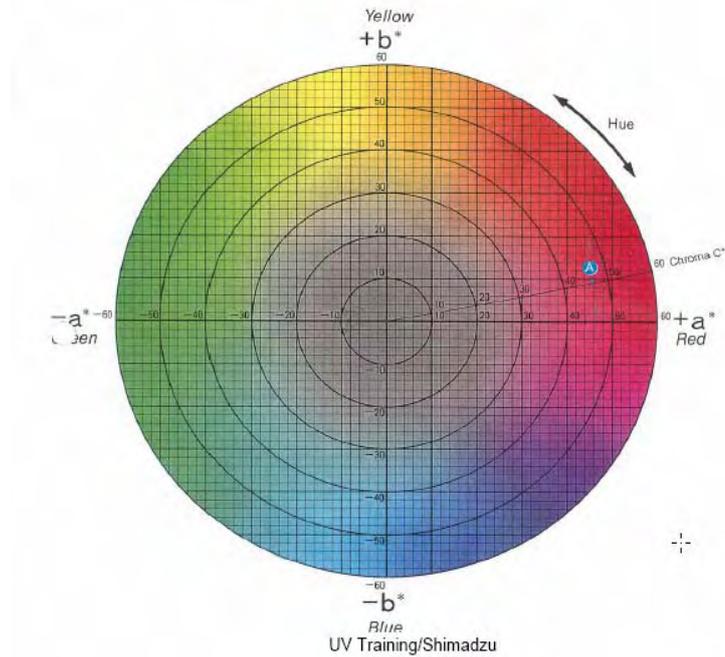
4.4.1 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบด้วยเครื่องเร่งสภาวะ

การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบด้วยเครื่องเร่งสภาวะตามมาตรฐาน ASTM G53 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เป็นเวลา 1000 ชั่วโมง โดยมีช่วงการรับแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 280-330 นาโนเมตรเป็นเวลา 4 ชั่วโมงสลับกับการควบแน่นของไอน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็น

เวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นสุ่มชิ้นงานที่เวลา 200, 500, 800 และ 1000 ชั่วโมง เพื่อวัดค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer โดยการเปลี่ยนแปลงสีจะวัดค่าการสะท้อนรังสีในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 380 ถึง 780 นาโนเมตร และคำนวณสีที่ได้ตามมาตรฐาน CIE-L*a*b* โดยผลที่ได้เป็นค่า L* a* b* ที่แสดงสีตามแกนในรูปที่ 4.6 ซึ่งค่า L* แสดงถึงความสว่าง (Brightness) โดยค่าความสว่าง (L*) มีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) ไปจนถึง 100 (สีขาว) ส่วนค่า a* แสดงถึงแกนสีแดง-สีเขียว โดยค่า a* มีค่าตั้งแต่ -60 (สีเขียว) ถึง +60 (สีแดง) และค่า b* แสดงถึงแกนสีน้ำเงิน-สีเหลือง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ -60 (สีน้ำเงิน) ถึง +60 (สีเหลือง) นอกจากนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของผิวเคลือบด้วยเทคนิค FTIR โดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance Fourier-Transform Infrared Analysis (ATR-FTIR) ซึ่งชิ้นงานที่ทำการทดลองแบ่งเป็น 3 กลุ่มตัวอย่างดังตารางที่ 4.1 คือ สีเคลือบที่ไม่มี UV Absorber และ HALs, สีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำคือ ร้อยละ 3 ของน้ำหนักแห้งของสารยึดและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในปริมาณมากกว่าที่ผู้ผลิตแนะนำคือ ร้อยละ 6 ของน้ำหนักแห้งของสารยึด เพื่อศึกษาผลของปริมาณ UV Absorber และ HALs ที่เพิ่มขึ้นต่อการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ



รูปที่ 4.5 เครื่องทดสอบการเสื่อมสภาพโดยการเร่งสภาวะ



รูปที่ 4.6 เกนเทียบสีตามมาตรฐาน CIE-L*a*b* [27]

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลองการเสื่อมสภาพของสีเคลือบโดยการเร่งสภาวะ

สารเคมี	ปริมาณสารเคมี (กรัม)		
	1	2	3
ผงสี	40	40	40
สารยึด	216	216	216
น้ำ	100	100	100
สารช่วยการกระจายตัว	0.8	0.8	0.8
สารกันฟอง	0.4	0.4	0.4
สารป้องกันเชื้อรา	0.4	0.4	0.4
สารเร่งขึ้น	0.4	0.4	0.4
สารป้องกันการจับตัว	0.4	0.4	0.4
UV Absorber	-	2.9	5.8
HALs	-	2.9	5.8

4.4.2 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริง

การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริง ซึ่งวางชิ้นงานบนแดดฟ้าที่ไม่มีร่มเงา โดยวางชิ้นงานบนแท่นวางชิ้นงานเอียงทำมุม 45 องศา กับแนวราบ และหันหน้าไปทางทิศใต้ ตามมาตรฐาน ASTM G7 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เป็นเวลา 12 เดือน จากนั้นสุ่มชิ้นงานตัวอย่างเดือนละ 3 ชิ้น เพื่อวัดค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากแสงแดดและสภาพแวดล้อม



รูปที่ 4.7 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริงตามมาตรฐาน ASTM G7

4.5 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเคลือบทางพาณิชย์

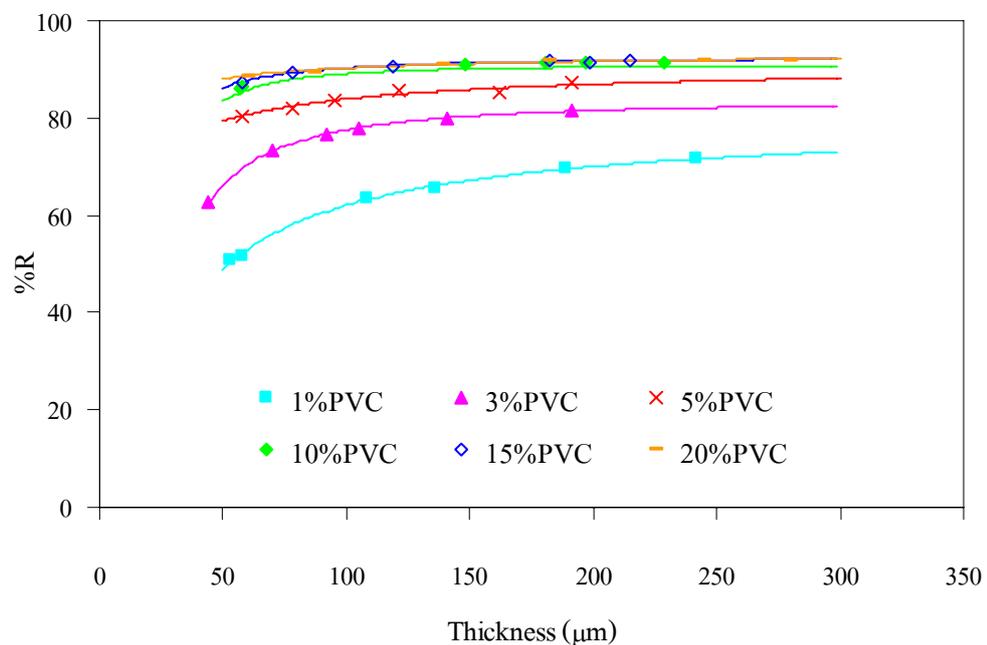
หลังจากได้สีเคลือบที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดในแต่ละสี จากนั้นนำสีเคลือบที่ได้มาทำการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเคลือบทางพาณิชย์ โดยทาสีเคลือบแต่ละสีที่ความหนา 250 ± 50 ไมครอน บนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีขนาด 6x6 เซนติเมตร และปล่อยให้แห้ง จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer ต่อไป

บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

5.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

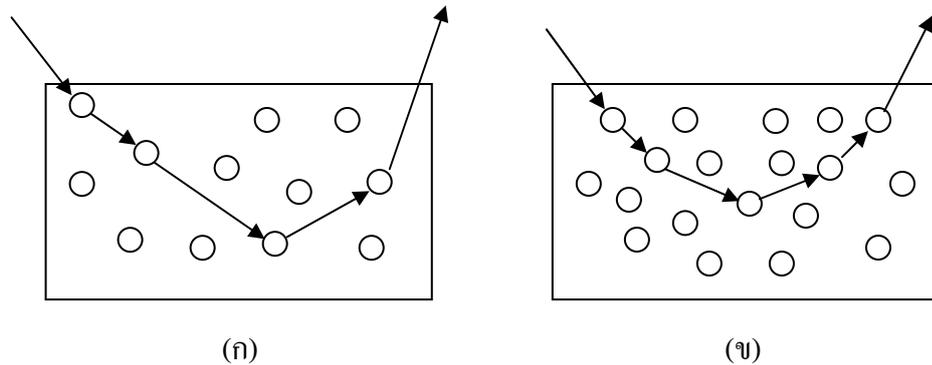
5.1.1 อิทธิพลของ %PVC ต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

เมื่อทดสอบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีขาวซึ่งใช้ผงสีไททานเนียมไดออกไซด์ ที่ %PVC และความหนาแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อ %PVC เพิ่มขึ้น และแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงน้อยลงที่ %PVC สูงๆ จนถึงที่ %PVC ค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์คงที่ กล่าวคือค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้ว่า %PVC เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่ 15 และ 20% PVC ไม่ต่างกัน และสีเคลือบสีขาวมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงสุดที่ 91.8% และ 92.5% ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวที่ 1, 3, 5, 10, 15 และ 20% PVC

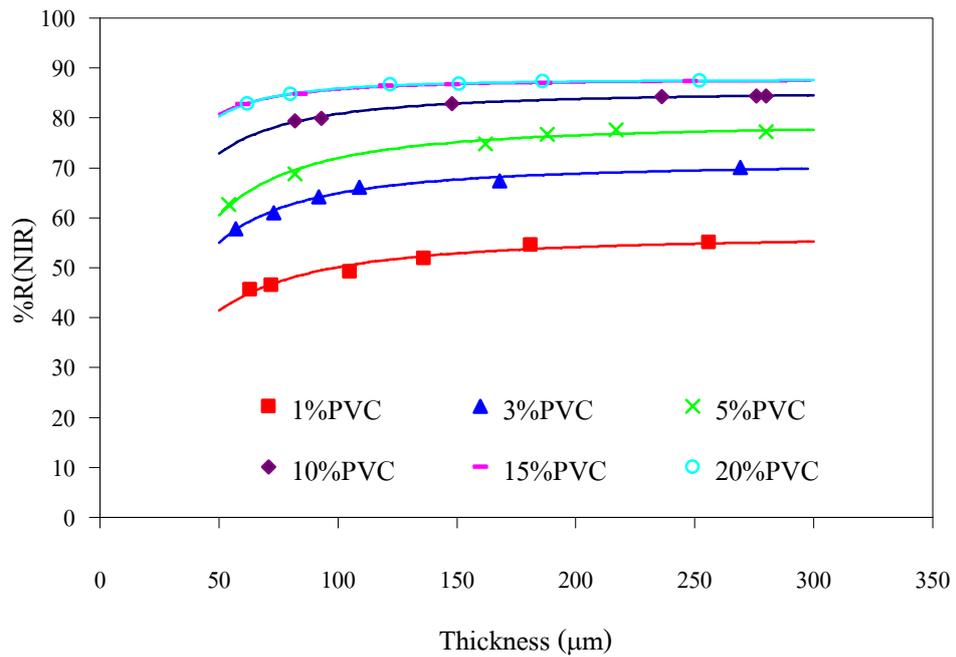
การที่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อ %PVC เพิ่มขึ้นนั้น เนื่องจากที่ %PVC สูงจะมีความหนาแน่นของผงสีในสีเคลือบมากกว่าที่ %PVC ต่ำ ทำให้ระยะห่างระหว่างผงสีลดลง เป็นผลให้ระยะทางในการเดินทางของรังสีสั้นลง ทำให้รังสีสามารถเลี้ยวเบนออกจากสีเคลือบได้มากกว่าที่ความลึกเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 5.2 แต่ที่ความหนาแน่นของผงสีค่าหนึ่งที่รังสีสามารถเลี้ยวเบนได้สูงสุดแล้ว ดังนั้นการเพิ่มความหนาแน่นของผงสีแม้จะทำให้ระยะการเดินทางของรังสีสั้นลง แต่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ยังคงที่ ซึ่งอาจเป็นผลจากขีดจำกัดเรื่องการหักเหของอนุภาคผงสีและความสามารถในการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผงสีและสารยึด



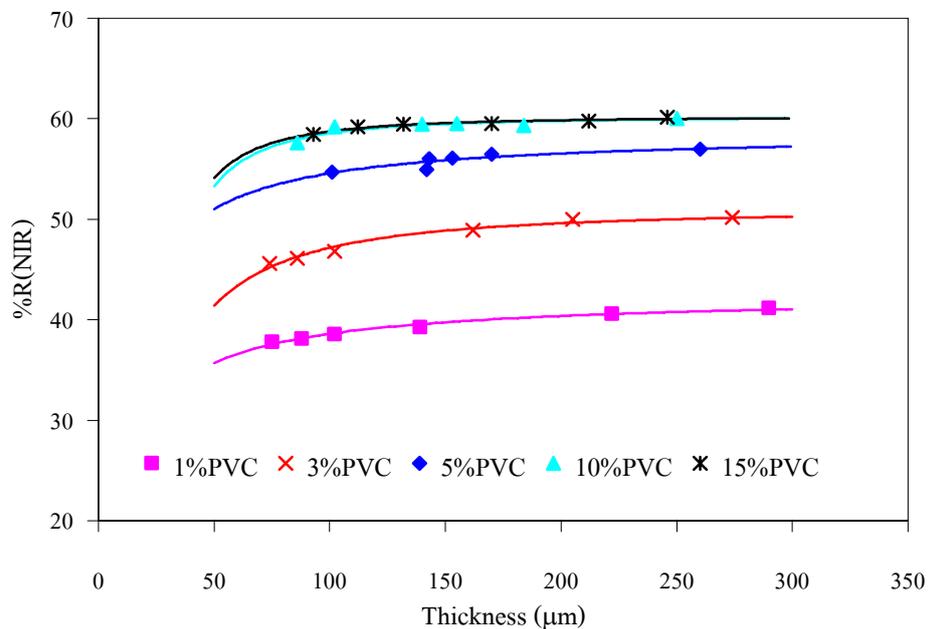
รูปที่ 5.2 การสะท้อนของรังสีในสีเคลือบที่ %PVC ต่างกัน (ก) %PVC สูง (ข) %PVC ต่ำ

เมื่อพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดของสีเคลือบสีเหลือง ที่ %PVC และความหนาแน่นต่างกันดังแสดงในรูปที่ 5.3 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อ %PVC ของผงสีเพิ่มขึ้น และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ 15 และ 20% PVC ไม่แตกต่างกัน ซึ่งค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดของสีเคลือบสีเหลืองสูงสุดที่ 64.3% และ 87.3% ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.4 แสดงค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดของสีเคลือบสีแดง ที่ %PVC ต่างๆ และความหนาแน่นต่างกัน พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่ 10% PVC และมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงสุดที่ 39.4% และ 60.0% ตามลำดับ



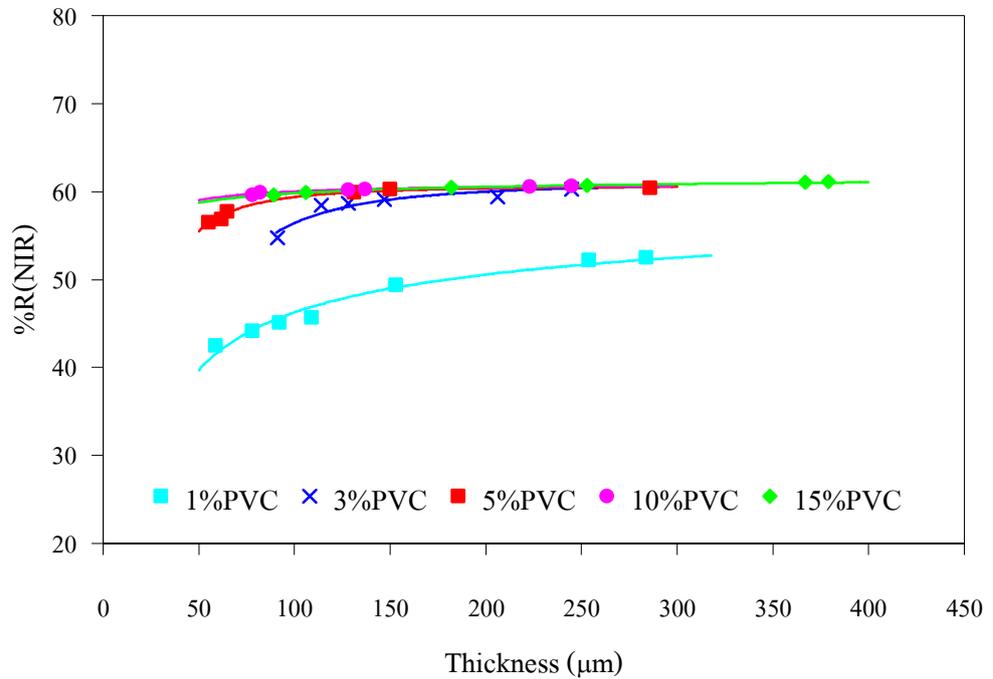
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของสีเหลืองที่ 1, 3, 5, 10, 15 และ 20% PVC



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของสีแดงที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC

เมื่อพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดในช่วงเนียร์อินฟราเรดของสีเคลือบที่ใช้ผงสีสีเขียว ที่ %PVC แตกต่างกันและความหนาแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้น

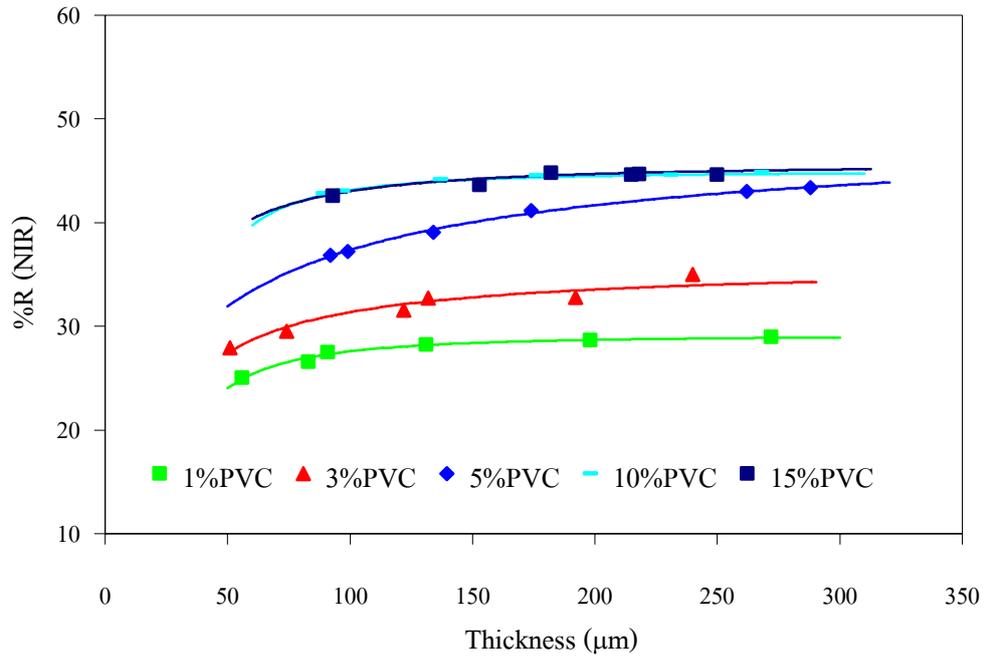
เมื่อ %PVC ของผงสีเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นจนคงที่ที่ 10% PVC ซึ่งมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงสุดที่ 36.9% และ 60.4% ตามลำดับ



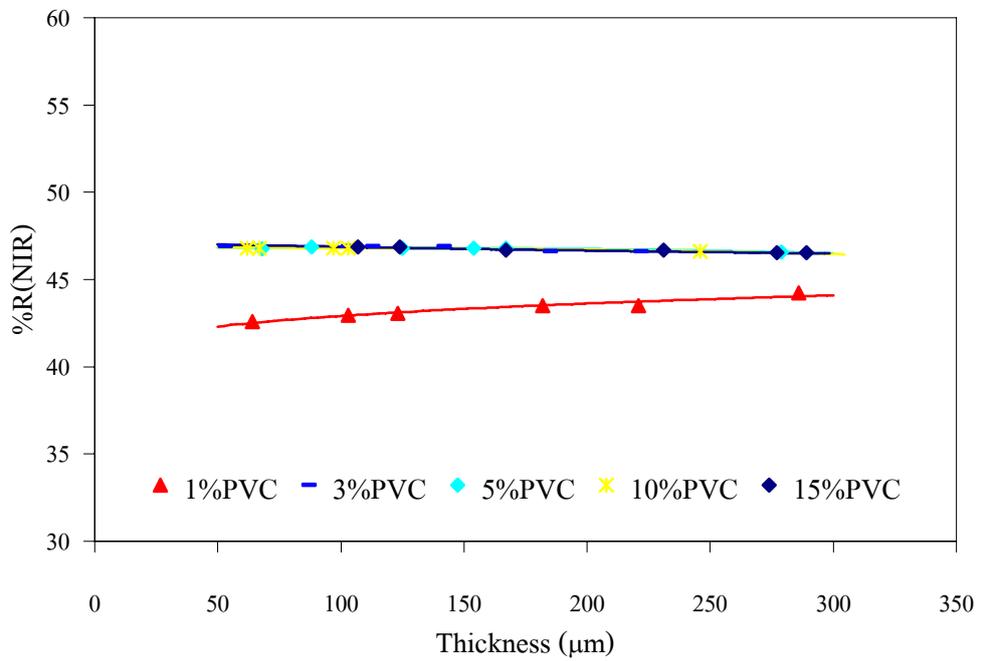
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเขียวที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC

เมื่อพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดของสีเคลือบสีฟ้า ที่ %PVC และความหนาแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.6 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อ %PVC เพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นจนคงที่ที่ 10% PVC ซึ่งมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงสุดที่ 32.5% และ 44.8% ตามลำดับ

หากพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดของสีเคลือบสีดำ ที่ %PVC แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.7 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อ %PVC เพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นจนคงที่ที่ 3% PVC ซึ่งมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงสุดที่ 26.7% และ 46.9% ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของสีฟ้าที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดของสีดำที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC

5.1.2 อิทธิพลของชนิดผงสีต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์

เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่ 15% PVC และความหนาใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่าสีขาวมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุด รองลงมาเป็น สีเหลือง, สีเขียว, สีแดง, สีฟ้าและสีดำ ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่ 15% PVC และความหนาใกล้เคียงกัน

สี	%R	%R (NIR)	ความหนาสีเคลือบ (μm)
สีขาว	91.4	92.2	189
สีเหลือง	64.0	87.1	192
สีแดง	39.4	60.0	182
สีเขียว	36.9	60.4	179
สีฟ้า	32.5	44.8	178
สีดำ	26.7	46.9	175

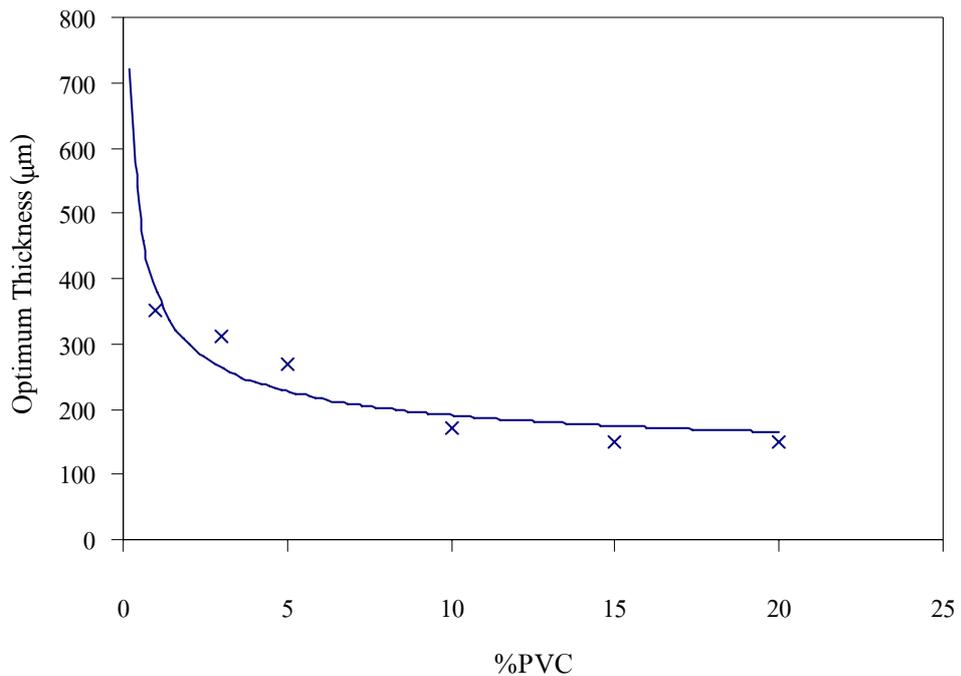
5.1.3 อิทธิพลของความหนาสีเคลือบต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาสีเคลือบกับ %PVC ในสีเคลือบสีต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ถึง 5.7 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของสีเคลือบและ %PVC เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะช่วงความหนาน้อยๆ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความหนามีอิทธิพลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์มาก แต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆ อิทธิพลของความหนาต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์จะลดลง จนถึงความหนาค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์คงที่ กล่าวคือความหนาที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์อีกต่อไป ดังนั้นหากพิจารณาการใช้งานสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์แล้วไม่จำเป็นต้องใช้ความหนาในการใช้งานมากเกินไป เนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นถึงจุดจุดหนึ่งเท่านั้น

การที่ความหนาของสีเคลือบส่งผลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์จนถึงความหนาของสีเคลือบค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์อิ่มตัว เนื่องจากที่ความหนาน้อยๆ รังสีบางส่วนเกิดการหักเหและเลี้ยวเบนกลับได้ส่วนหนึ่ง และรังสีอีกส่วนถูกดูดกลืนโดยองค์ประกอบของสี คือ สารยึดและผงสี ซึ่งรังสีอีกส่วนถูกดูดกลืนโดยแผ่นรองรับ แต่เมื่อความหนาของสีเคลือบเพิ่มขึ้น รังสีส่วนที่หักเหและเลี้ยวเบนในฟิล์มสีจะมีระยะทางในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้รังสีอาทิตย์

สามารถหักเหและเลี้ยวเบนออกจากสีเคลือบได้มากขึ้น ส่งผลให้มีรังสีที่ตกกระทบและถูกดูดกลืนโดยแผ่นรองรับน้อยลง จนกระทั่งความหนาของสีเคลือบเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งซึ่งรังสีสามารถหักเหและเลี้ยวเบนได้สูงสุดแล้ว ทำให้ไม่มีรังสีเดินทางผ่านไปถึงแผ่นรองรับได้อีก โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความสามารถในการหักเหและเลี้ยวเบนอีกต่อไป

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ความหนาและ %PVC ของสีเคลือบ เป็นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการผลิตและใช้งานสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อให้ได้สีเคลือบมีประสิทธิภาพสูงสุด จากรูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %PVC กับความหนาของสีเคลือบที่ทำให้ได้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดในแต่ละ %PVC ของสีเคลือบสีขาว ซึ่งทำให้สามารถทราบถึง %PVC และความหนาของสีเคลือบที่เหมาะสมในการผลิตและใช้งานคือ 17% PVC สำหรับสีเคลือบสีขาว สำหรับ %PVC และความหนาที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดในแต่ละสี ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง %PVC กับความหนาของสีขาวที่ทำให้ได้การสะท้อนรังสีอาทิตย์คงที่

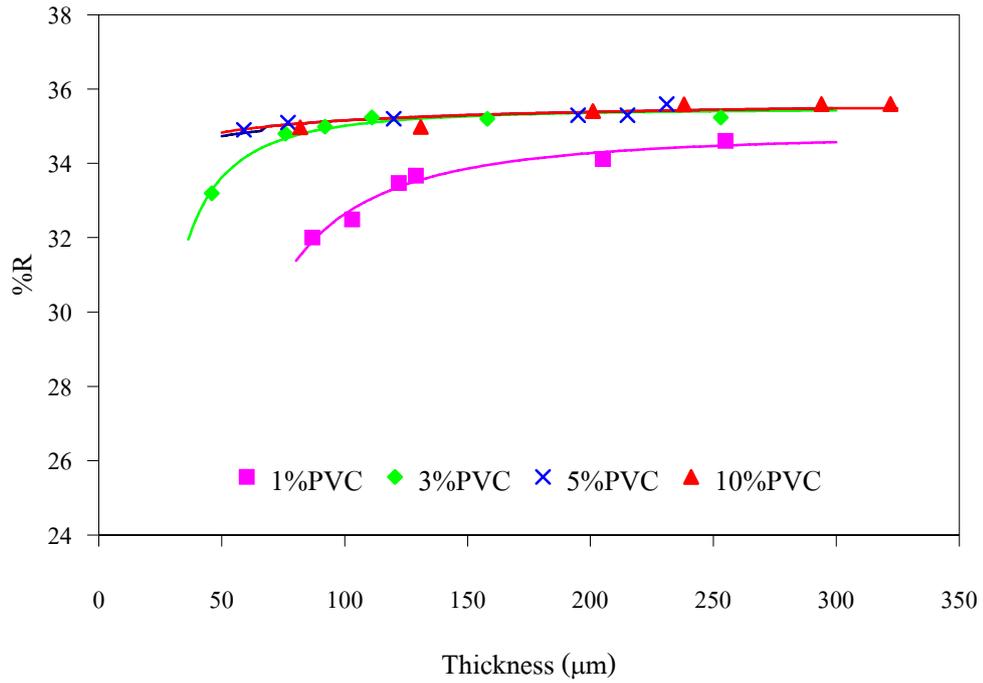
ตารางที่ 5.2 %PVC, ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์, ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรด และความหนาสีเคลือบที่เหมาะสมในการผลิตและใช้งาน

สี	%PVC	%R	%R (NIR)	ความหนาสีเคลือบ (μm)
สีขาว	17	91.8	92.5	180
สีเหลือง	18	64.3	87.3	160
สีแดง	13	39.4	60.0	185
สีเขียว	9	36.9	60.4	120
สีฟ้า	13	32.5	44.8	180
สีดำ	3	26.7	46.9	70

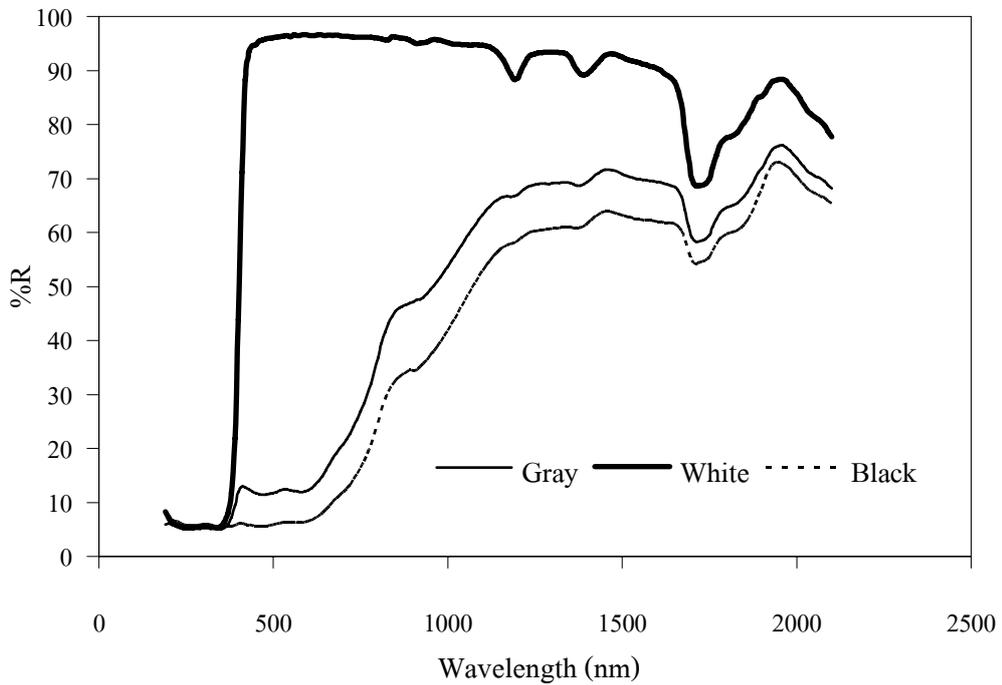
5.1.4 อิทธิพลของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับผงสีสีดำ

เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องปริมาณผงสีที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำเท่านั้น โดยศึกษาอัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 1:1, 3:1, 4:1, 7:1 และ 9:1 ซึ่งการผสมไททานเนียมไดออกไซด์กับผงสีดำนั้นทำให้ได้สีเทาซึ่งมีหลากหลายเฉดสี ซึ่งเป็นการเพิ่มทางเลือกในการใช้งานสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์อีกทางหนึ่ง

เมื่อพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทาที่มีส่วนผสมของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่อัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 1:1 ดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสูงขึ้นเมื่อ %PVC ของผงสีเพิ่มขึ้น และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทาที่ตั้งแต่ 5% PVC และเมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทาที่ผลิตได้กับสีดำและสีขาวดังแสดงในรูปที่ 5.10 พบว่าสีเคลือบสีเทามีการสะท้อนรังสีอาทิตย์มากกว่าสีเคลือบสีดำแต่น้อยกว่าสีเคลือบสีขาว ดังนั้นการผสมไททานเนียมไดออกไซด์กับผงสีสีดำ นอกจากได้สีเคลือบสีเทาแล้วยังเป็นการเพิ่มค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบอีกด้วย



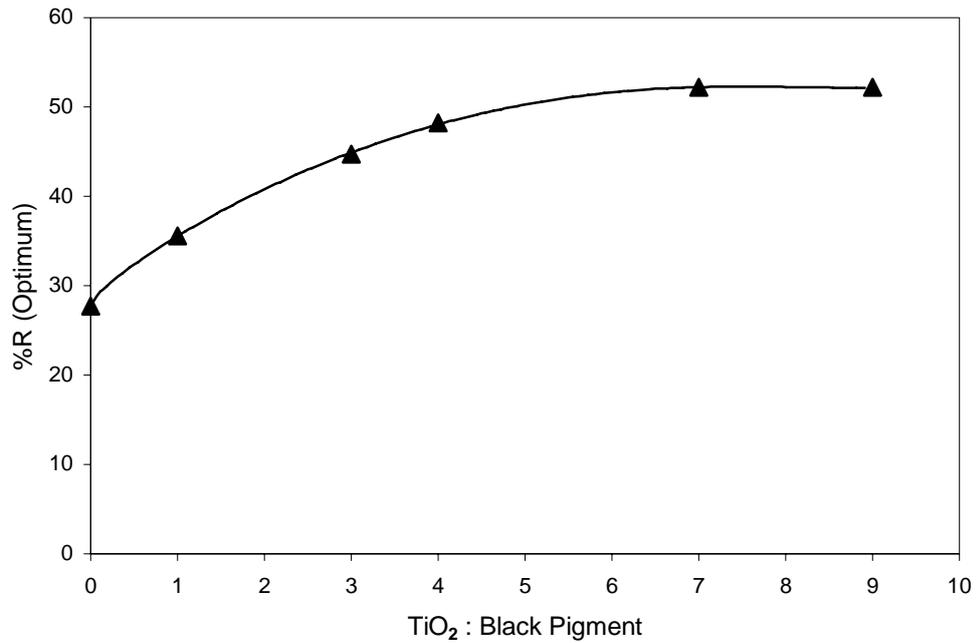
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทาที่ 1, 3, 5, 10 และ 15% PVC



รูปที่ 5.10 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ สีขาว, สีดำและสีเทาที่อัตราส่วนของ ไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำ 1:1 ที่ 10% PVC

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำเป็น 3:1, 4:1, 7:1 และ 9:1 ตามลำดับ

พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดของสีเคลือบที่อัตราส่วนต่างๆเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.11 และ ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งที่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์อิ่มตัว (อัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์กับผงสีสีดำที่ 7:1) กล่าวคือค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะเพิ่มอัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำก็ตาม

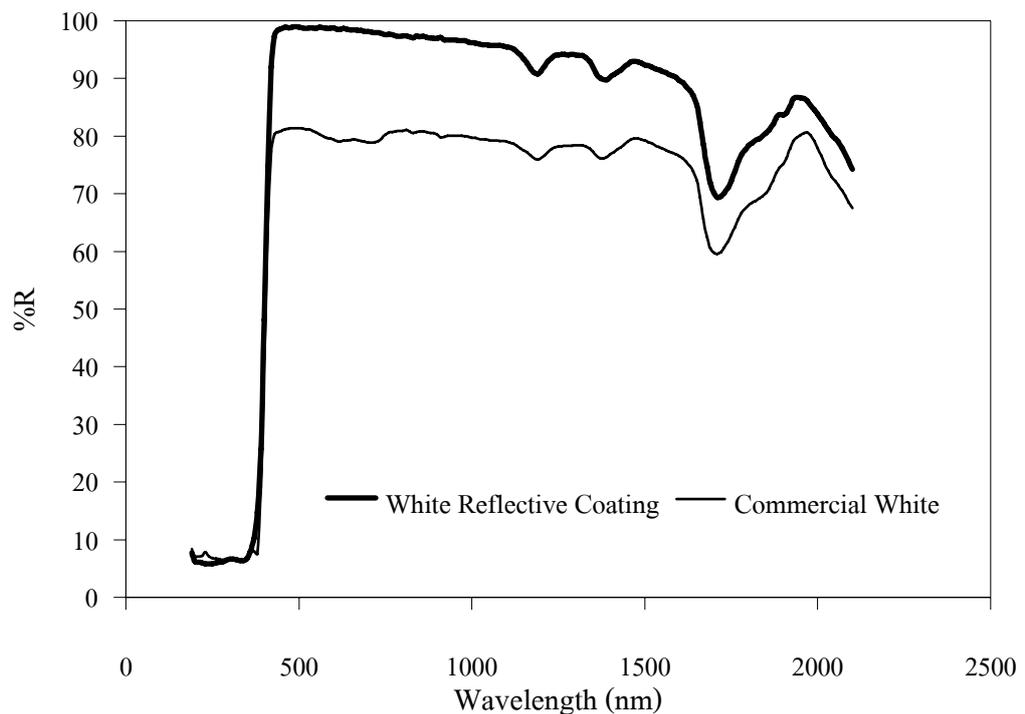


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดของสีเคลือบสีเทาที่มีอัตราส่วนระหว่างไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 1:1, 3:1, 4:1, 7:1 และ 9:1

5.2 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเคลือบทางพาณิชย์

5.2.1 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีขาวทางพาณิชย์

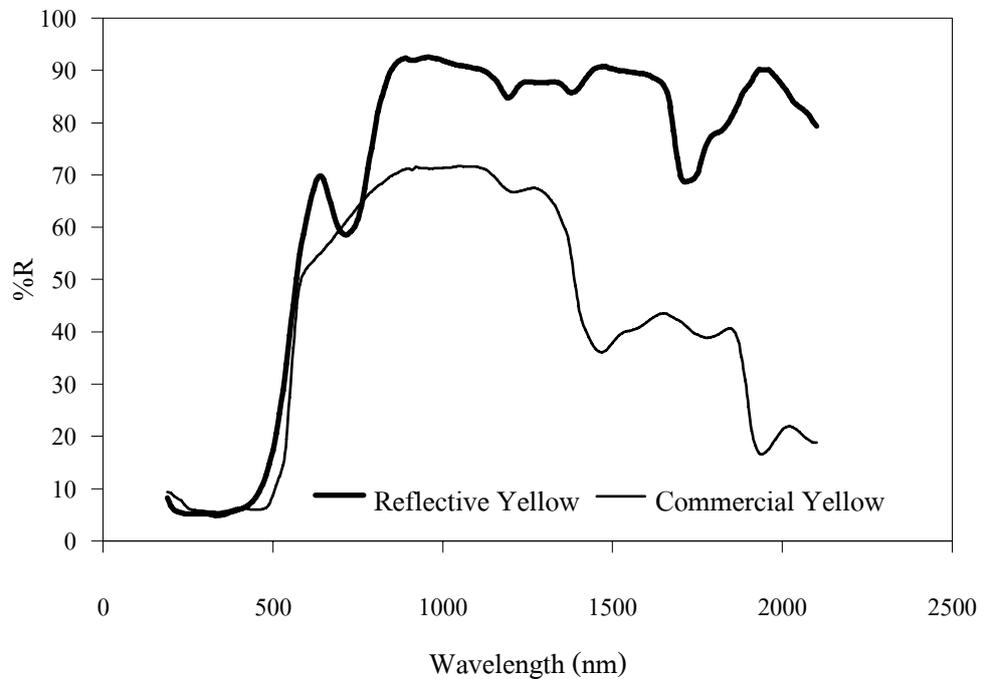
เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวที่ผลิตได้กับสีขาวทางพาณิชย์ที่เจดสีและความหนาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.12 พบว่าสีขาวที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 91.8% และ 92.5% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสีขาวทางพาณิชย์ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 78.5% และ 81.3% ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของสีขาวสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีขาวทางพาณิชย์

5.2.2 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเหลืองสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเหลืองทางพาณิชย์

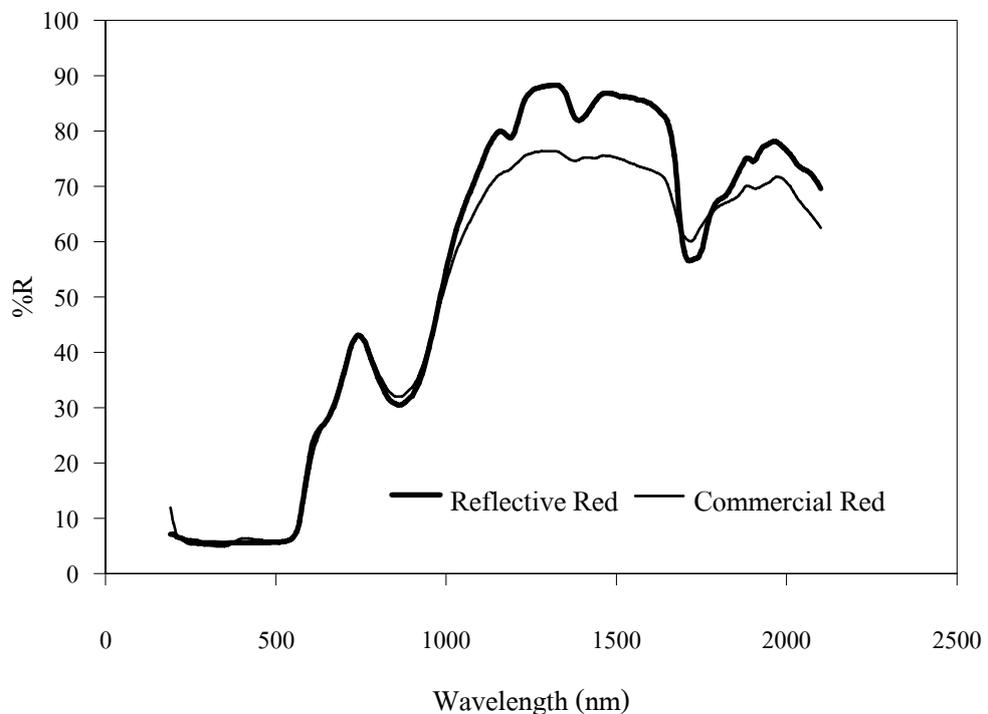
เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเหลืองที่ผลิตได้กับสีเหลืองทางพาณิชย์ที่เจดสีและความหนาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่าสีเหลืองที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 64.3% และ 87.3% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสีเหลืองทางพาณิชย์ ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 49.3% และ 62.6% ตามลำดับ



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของสีเหลืองสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเหลืองทางพาณิชย์

5.2.3 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีแดงสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีแดงทางพาณิชย์

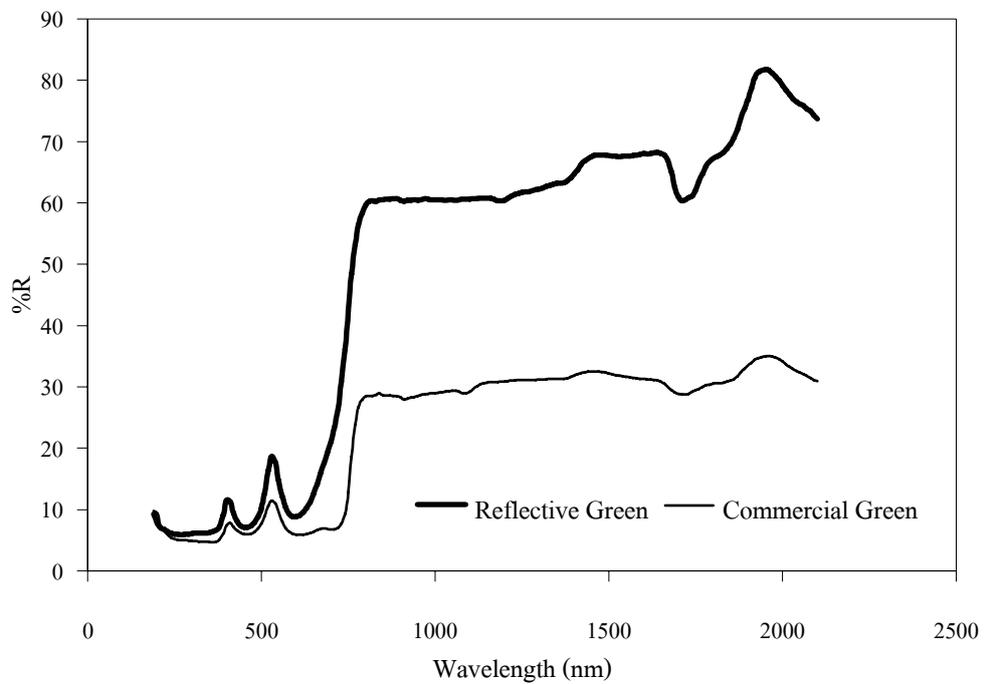
เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีแดงที่ผลิตได้กับสีแดงทางพาณิชย์ที่เฉดสีและความหนาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.14 พบว่าสีแดงที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 39.4% และ 60.0% ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงสีแดงทางพาณิชย์ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 37.2% และ 55.3% ตามลำดับ



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีแดงสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีแดงทางพาณิชย์

5.2.4 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเขียวสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเขียวทางพาณิชย์

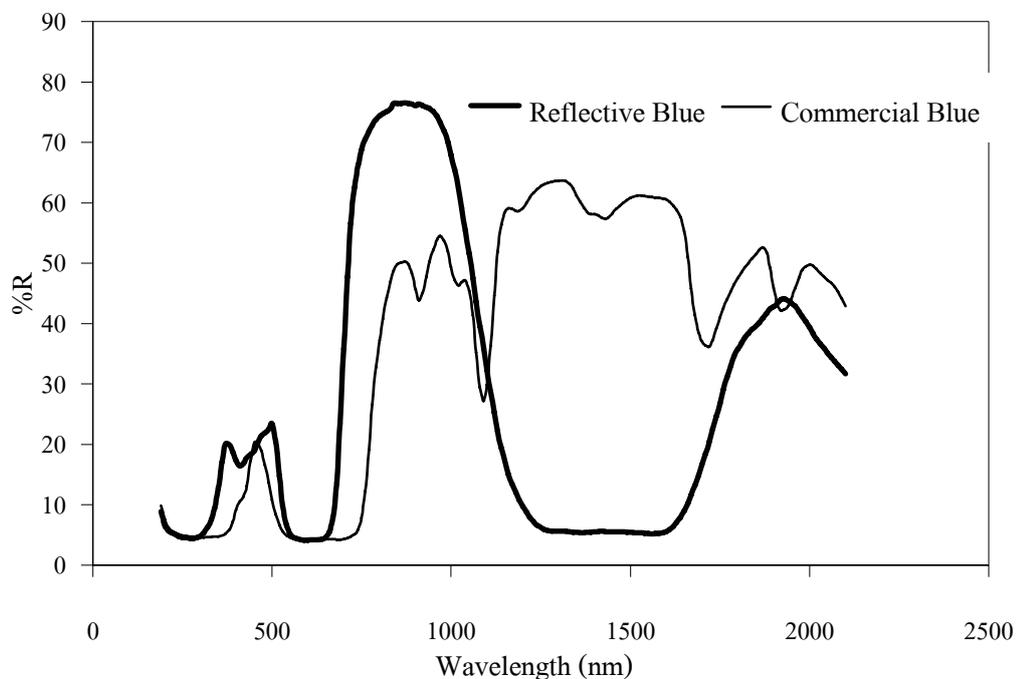
เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเขียวที่ผลิตได้กับสีเขียวทางพาณิชย์ที่เฉดสีและความหนาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.15 พบว่าสีแดงที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 36.9% และ 60.4% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสีเขียวทางพาณิชย์ ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 18.8% และ 30.1% ตามลำดับ



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีเขียวสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเขียวทางพาณิชย์

5.2.5 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีฟ้าสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีฟ้าทางพาณิชย์

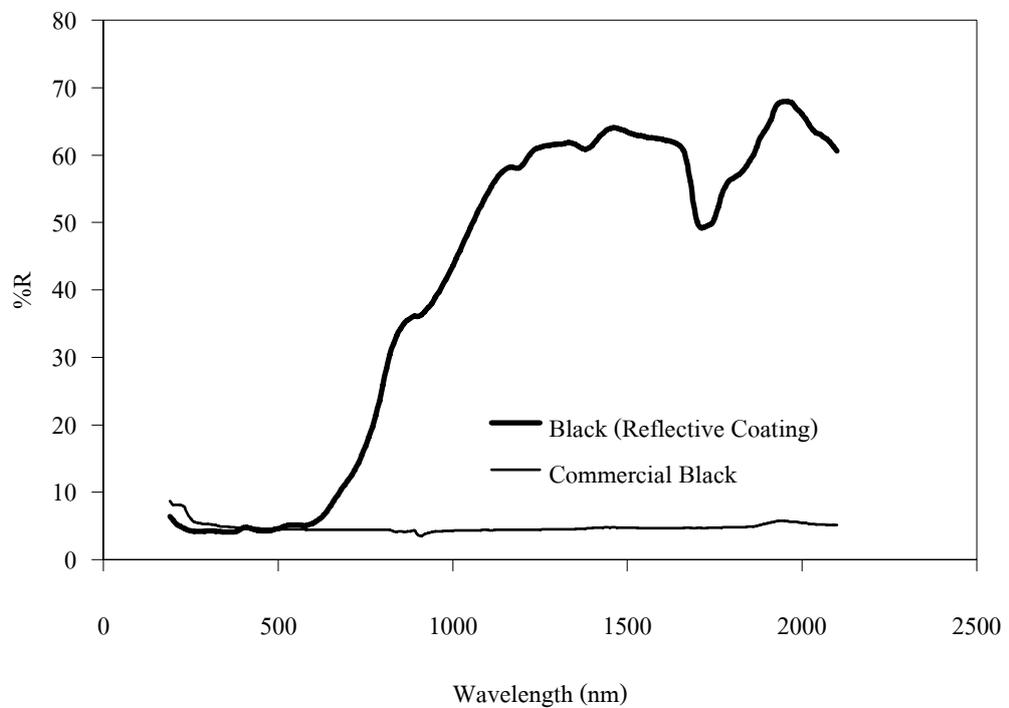
เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีฟ้าที่ผลิตได้กับสีฟ้าทางพาณิชย์ที่เฉดสีและความหนาใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.16 พบว่าสีฟ้าที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 32.5% และ 44.8% ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับสีฟ้าทางพาณิชย์ ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 30.0% และ 49.6% ตามลำดับ



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของสีฟ้าสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีฟ้าทางพาณิชย์

5.2.6 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีดำสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีดำทางพาณิชย์

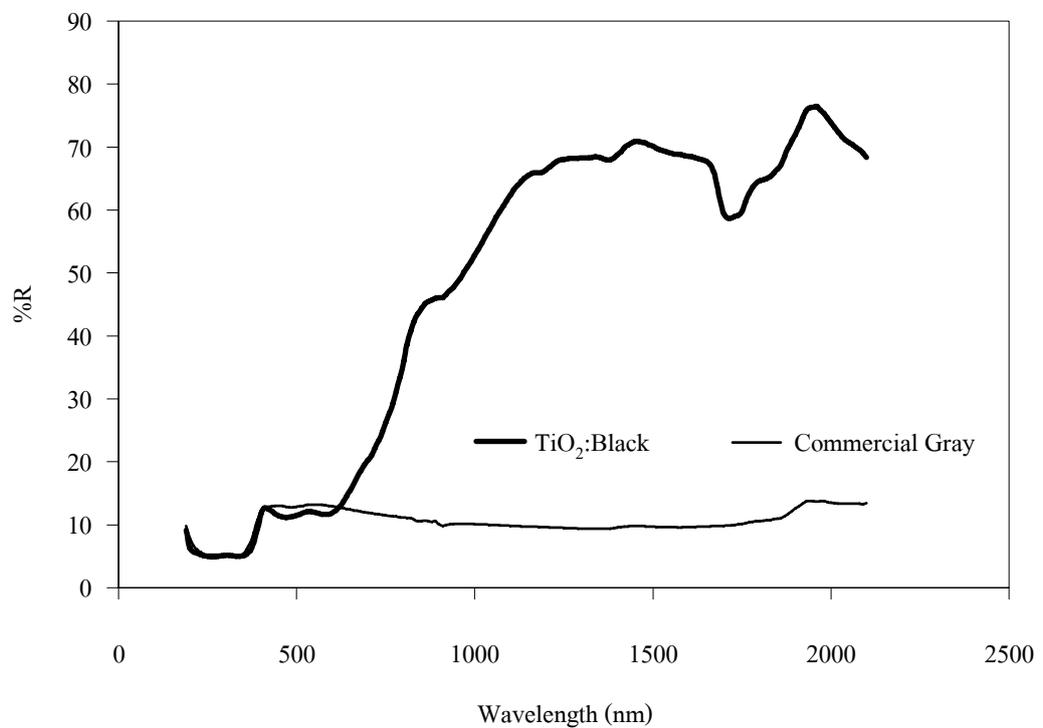
เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีดำที่ผลิตได้กับสีดำทางพาณิชย์ที่เจดสีและความหนาของสีเคลือบใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.17 พบว่าสีดำที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 27.1% และ 46.6% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสีดำทางพาณิชย์ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 4.4%



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆของสีดำสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีดำทางพาณิชย์

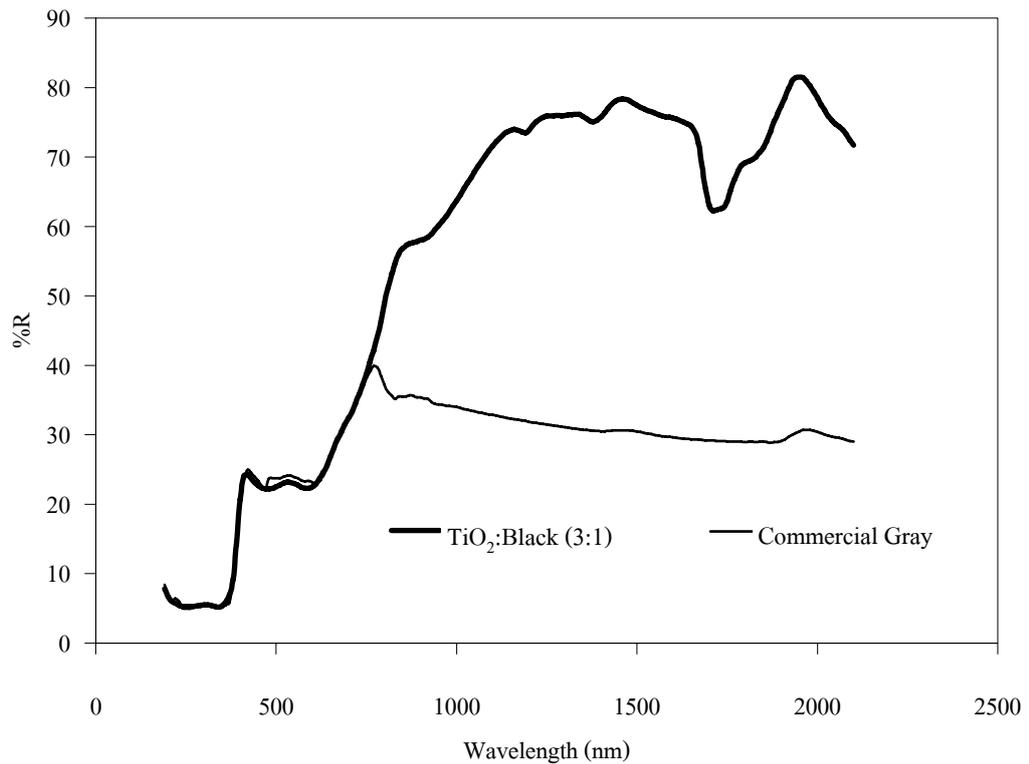
5.2.7 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทากับสีเทาทางพาณิชย์

เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทาที่อัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 1:1 กับสีเทาทางพาณิชย์ที่เฉดสีและความหนาใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.18 พบว่าสีเทาที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 35.6% และ 57.0% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสีเทาทางพาณิชย์ ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 10.2% และ 11.3% ตามลำดับ



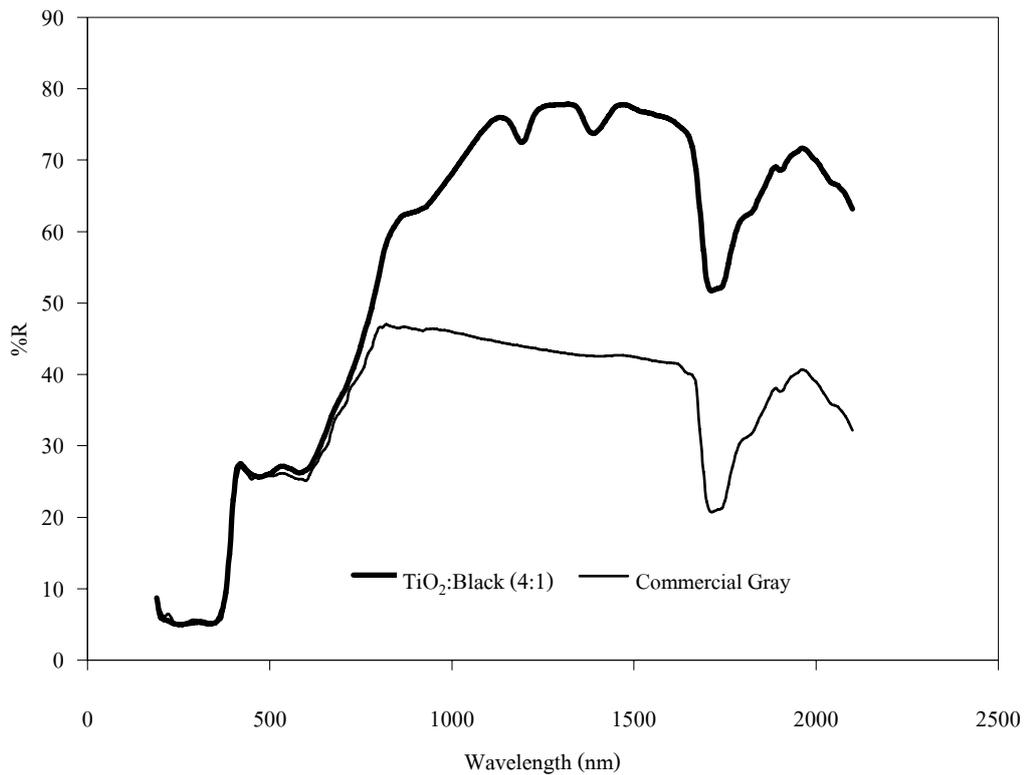
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาทางพาณิชย์กับสีเทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่อัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 1:1

เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทาที่อัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสี สีดำที่ 3:1 กับสีเทาทางพาณิชย์ที่ความหนาและเฉดสีของสีเคลือบใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.19 พบว่าสีเทาที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 45.2% และ 65.4% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสีเทาทางพาณิชย์ ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 23.4% และ 31.3% ตามลำดับ



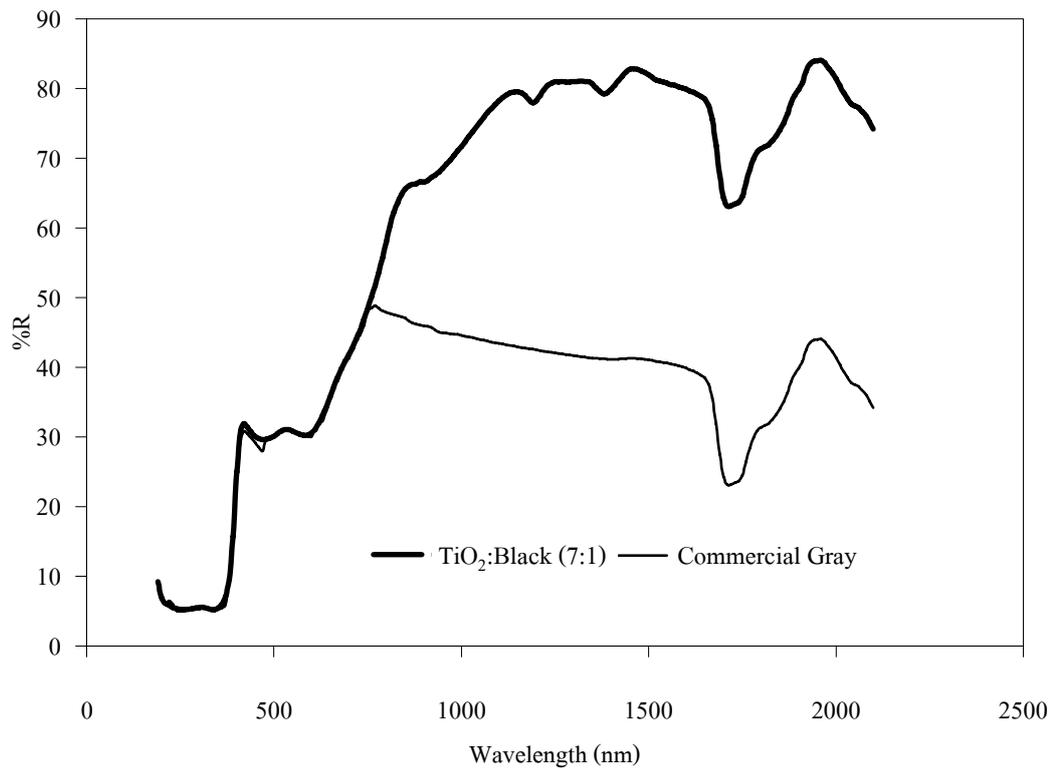
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาทางพาณิชย์กับสีเทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่อัตราส่วนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 3:1

เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทาที่อัตราส่วนของไททาเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 4:1 กับสีเทาทางพาณิชย์ที่ความหนาและเฉดสีของสีเคลือบใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.20 พบว่า สีเทาที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 48.2% และ 67.6% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสีเทาทางพาณิชย์ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 30.1% และ 37.3% ตามลำดับ



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาทางพาณิชย์กับสีเทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่อัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 4:1

เมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีเทาที่อัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 7:1 กับสีเทาทางพาณิชย์ที่ความหนาและเฉดสีของสีเคลือบใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 5.21 พบว่า สีเทาที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดสูงถึง 52.5% และ 72.5% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าสีเทาทางพาณิชย์ที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดเท่ากับ 32.8% และ 41.5% ตามลำดับ



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเทาทางพาณิชย์กับสีเทาสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่อัตราส่วนไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำที่ 7:1

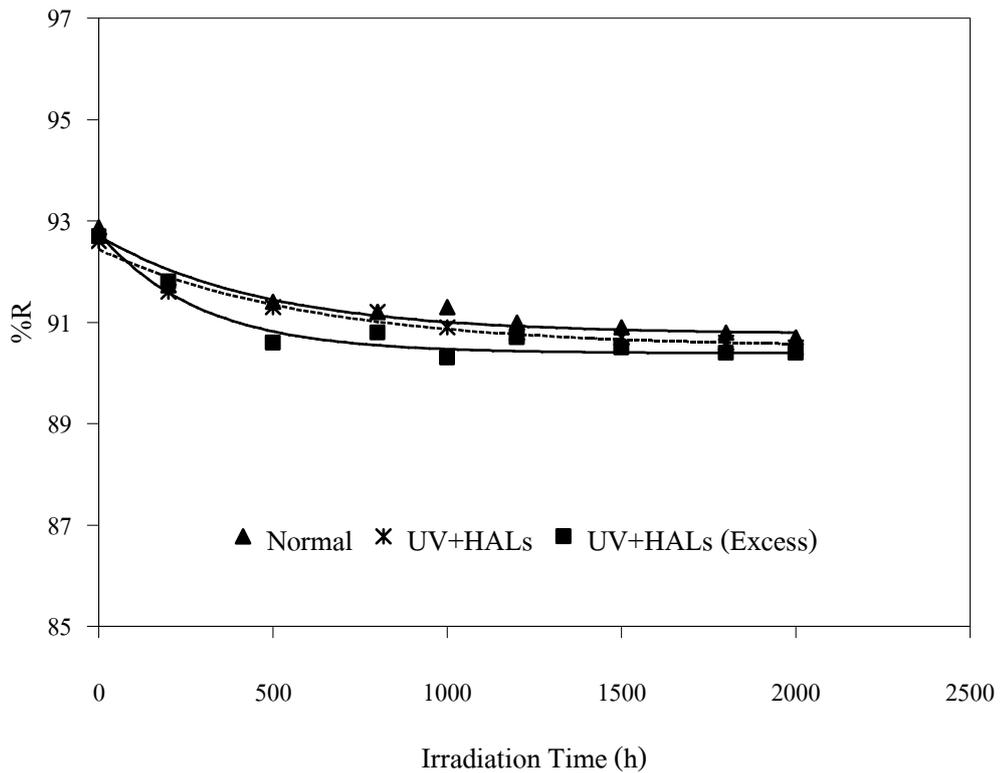
จากการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ผลิตได้กับสีเคลือบทางพาณิชย์ พบว่าสีเคลือบที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่าสีเคลือบทางพาณิชย์ ยกเว้นสีแดงและสีฟ้าที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับสีเคลือบทางพาณิชย์

5.3 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ

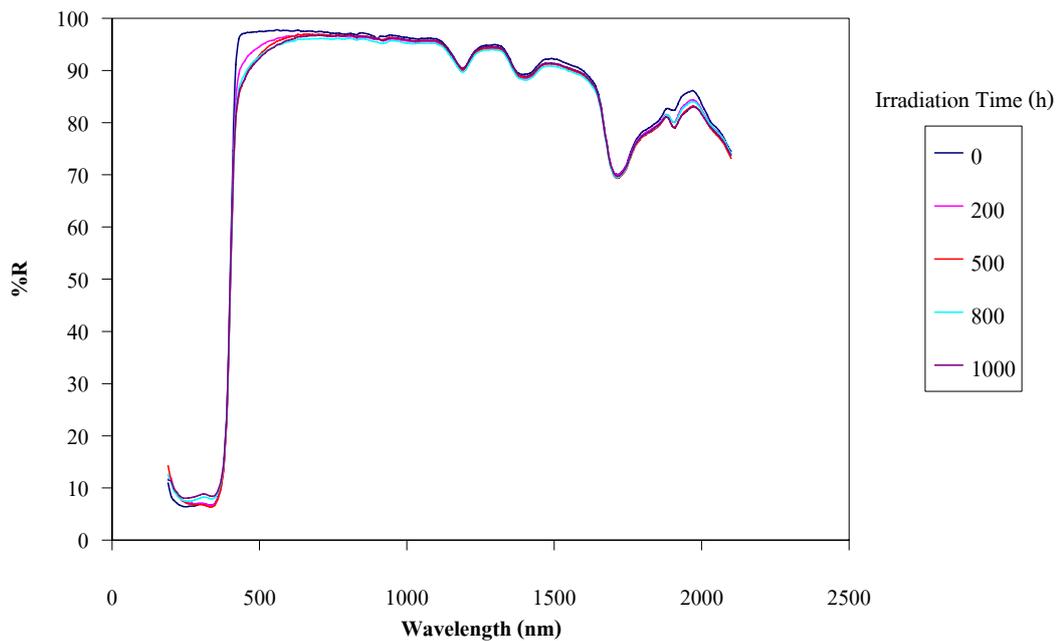
5.3.1 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบด้วยเครื่องเร่งสภาพ

จากผลการทดลองการเสื่อมสภาพของสีขาวและสีขาวที่เติม UV Absorber และ HALs ดังรูปที่ 5.22 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเร่งสภาพ จากนั้นค่อยๆ ลดลงจนมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาในการเร่งสภาพเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ณ ความยาวคลื่นต่างๆของสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาพที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.23 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (ระหว่าง 380 – 780 นาโนเมตร) ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตที่เกิดขึ้นกับสีของสารเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาพที่เวลาต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงจากสีขาวเป็นสีเหลือง ซึ่ง

การเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า การขึ้นเหลือง (Yellowish) ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตและไอน้ำที่สีเคลือบได้รับ ทำให้เกิดปฏิกิริยา Photooxidation โดยสีเคลือบดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นผลให้เกิดการสลายตัวเกิดหมู่ฟังก์ชัน หรือ ครอโมฟอร์ (Chromophore) ขึ้น ซึ่งทำให้สารเคลือบเกิดเป็นสีเหลืองและมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลง



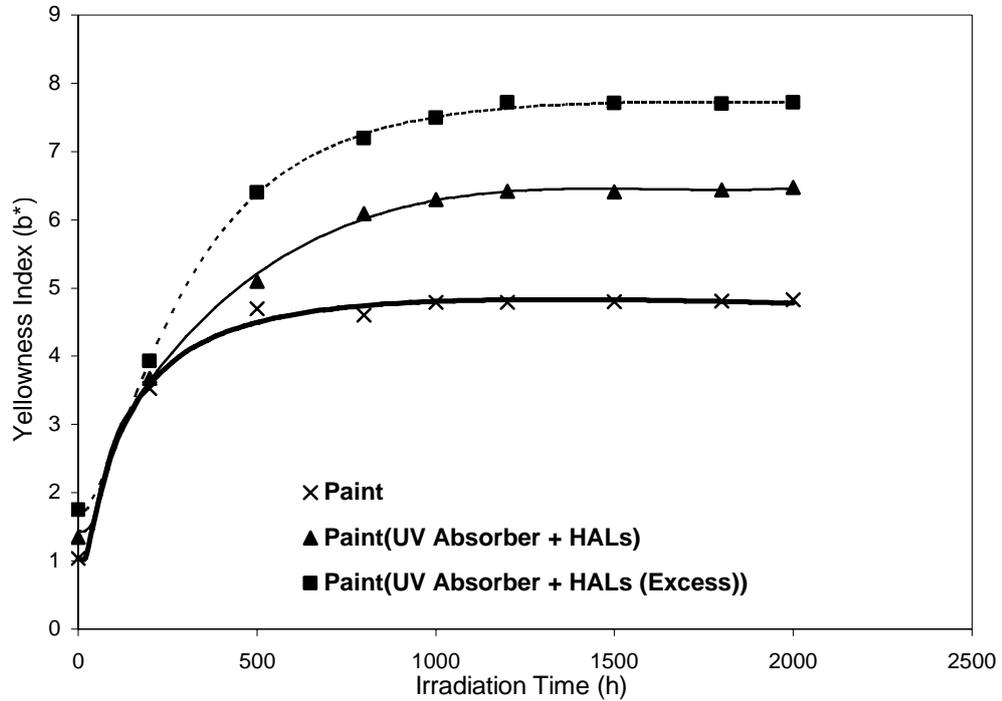
รูปที่ 5.22 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์กับระยะเวลาในการเร่งสภาวะ



รูปที่ 5.23 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ระยะเวลาในการเร่งสภาวะที่ 0, 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบปกติ สีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในปริมาณที่ผู้ผลิตแนะนำ (ร้อยละ 3 ของน้ำหนักแห้งสารยึด) และในปริมาณที่มากกว่าที่ผู้ผลิตแนะนำ 2 เท่า (ร้อยละ 3 ของน้ำหนักแห้งสารยึด) ดังรูปที่ 5.22 พบว่าการเติม UV Absorber และ HALs ทำให้สีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ต่ำกว่าสีเคลือบปกติ และการเพิ่มปริมาณ UV Absorber และ HALs เพิ่มขึ้นต่อไปจะยิ่งทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบต่ำลงไปอีก เมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ระยะเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.24 พบว่าสีขาวมีการเปลี่ยนแปลงเกิดเป็นสีเหลืองขึ้น โดยมีค่า b^* เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเร่งสภาวะ และจะคงที่เมื่อเวลาในการเร่งสภาวะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเร่งสภาวะ แสดงว่าการเสื่อมสภาพของสีเคลือบเกิดมากในช่วงแรกของการเร่งสภาวะ เมื่อเปรียบเทียบความเหลืองโดยพิจารณาจากค่า b^* ของสีเคลือบปกติ, สีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs (Paint (UV Absorber+HALs)) ในอัตราส่วนปกติ และมากกว่าปกติ 2 เท่า พบว่าสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่า (Paint (UV Absorber+HALs(Exceed))) มีความเหลืองมากที่สุด (ค่า b^* มากที่สุด) รองลงมาคือสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ และสีเคลือบปกติที่ไม่เติม UV Absorber และ HALs มีความเหลืองน้อยที่สุด ซึ่งวัตถุประสงค์ของการเติม UV Absorber และ HALs นั้น เพื่อเป็นการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา Photooxidation ของสีเคลือบ แต่ผลที่ได้กลับทำให้สีเคลือบเกิดการ

เสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ โดยสังเกตจากสีของสีเคลือบที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสีเหลืองเร็วกว่าสีเคลือบปกติ



รูปที่ 5.24 ค่า b* ของสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ

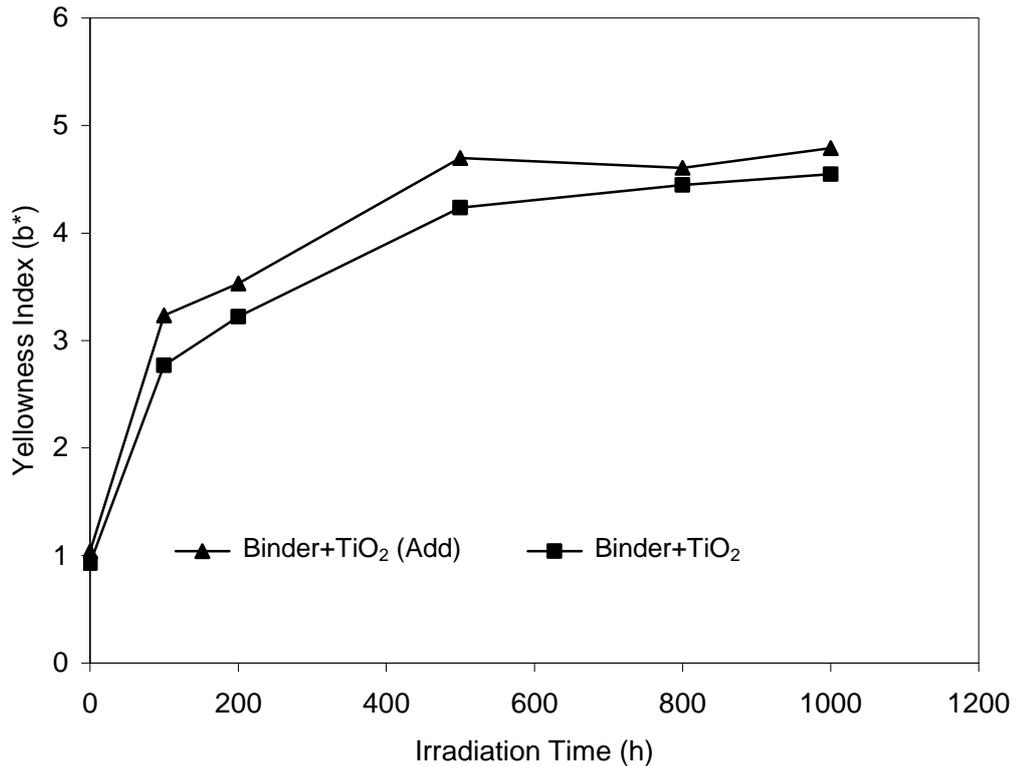
เพื่อศึกษาเพิ่มเติมถึงสาเหตุของความเหลืองที่เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งในสีเคลือบที่มีต่อการเสื่อมสภาพ โดยสารเติมแต่งในสีเคลือบคือ สารช่วยการกระจายตัว, สารกันฟอง, สารป้องกันเชื้อรา, สารเร่งขึ้นและสารป้องกันการจับตัว โดยศึกษาสีเคลือบ 5 ชนิดดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สูตรของสีเคลือบที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของสารเติมแต่งที่มีต่อการเสื่อมสภาพของสีเคลือบ

	Binder + TiO ₂	UV Absorber	HALs	Additive
1	✓	-	-	-
2	✓	-	-	✓
3	✓	✓	✓	-
4	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓✓	✓✓

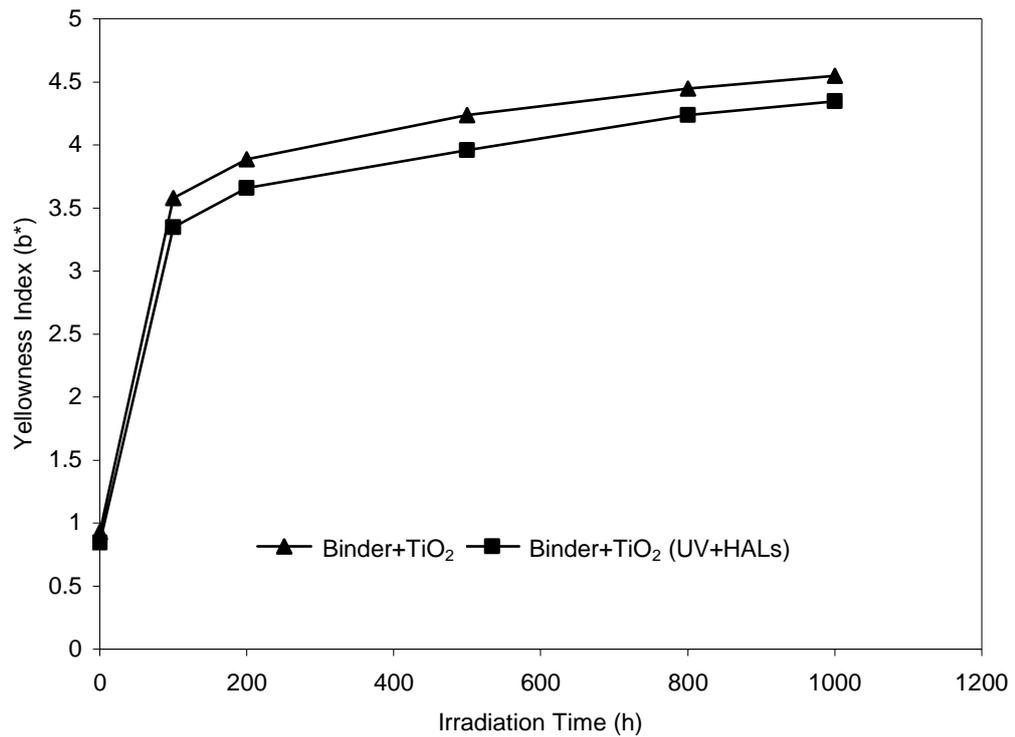
เมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบพบข้อสังเกตว่า

- 1.) สารยึดที่ผสมไททานเนียมไดออกไซด์และสารเติมแต่ง (Binder+TiO₂ (Add)) เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพจะมีความเหลืองมากกว่าสารยึดที่ผสมไททานเนียมไดออกไซด์แต่ไม่มีสารเติมแต่ง (Binder+TiO₂) ดังแสดงในรูปที่ 5.25 แสดงว่านอกจากการเสื่อมสภาพของสารยึดแล้ว สารเติมแต่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้สีเคลือบเกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น



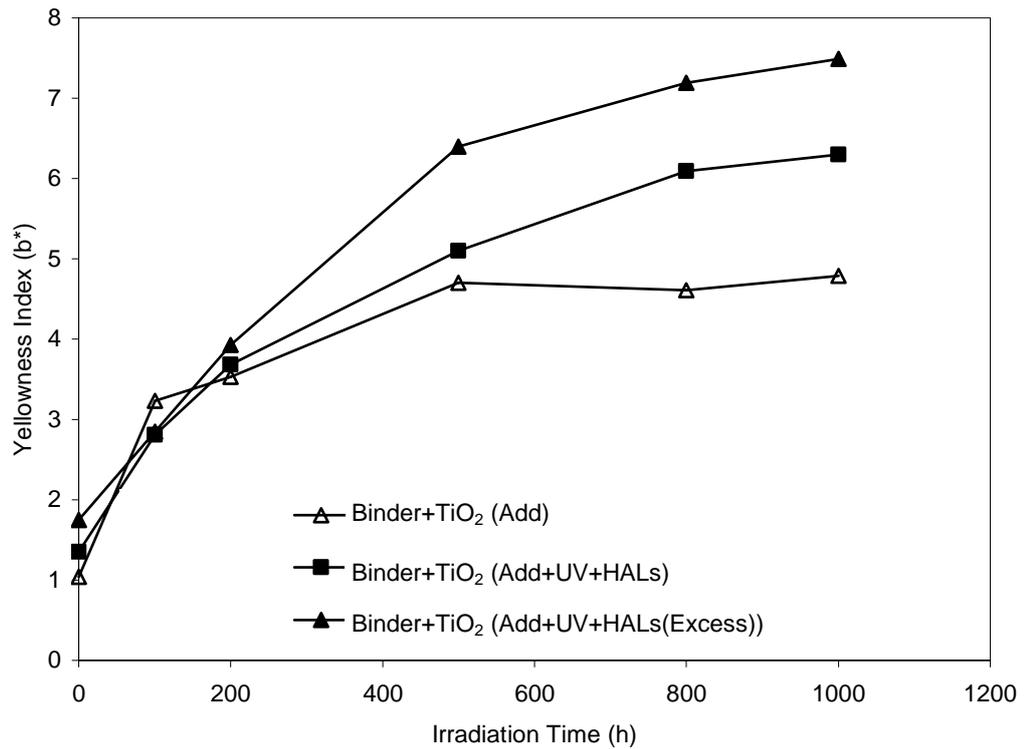
รูปที่ 5.25 ดัชนีความเหลืองของสีเคลือบที่มีและไม่มีสารเติมแต่งที่ผ่านการเร่งสภาพที่เวลาต่างๆ

- 2.) สารยึดที่ผสมไททานเนียมไดออกไซด์ (Binder+TiO₂) มีความเหลืองมากกว่าสารยึดที่ผสมไททานเนียมไดออกไซด์, UV Absorber และ HALs (Binder+TiO₂(UV+HALs)) ดังรูปที่ 5.26 แสดงว่า UV Absorber และ HALs สามารถลดการเสื่อมสภาพของสีเคลือบในกรณีที่มีสารเติมแต่งได้



รูปที่ 5.26 คำนวณความเหลืองของสีเคลือบที่ไม่มีสารเติมแต่งและสีเคลือบที่มี UV Absorber และ HALs ที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ

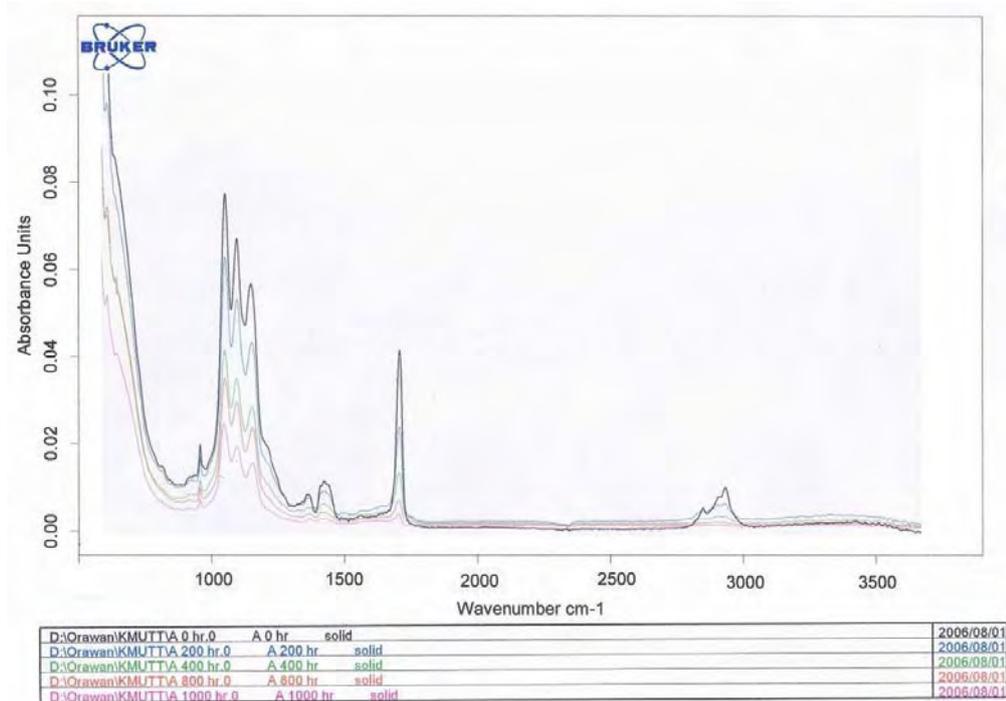
- 3.) จากหัวข้อที่ 2.) พบว่า UV Absorber และ HALs สามารถลดการเสื่อมสภาพของสีเคลือบในกรณีที่ไม่มีสารเติมแต่งได้ แต่เมื่อพิจารณาสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพจะมีความเหลืองมากกว่าสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง แต่ไม่มี UV Absorber และ HALs ดังแสดงในรูปที่ 5.27 เนื่องจากสารเติมแต่งอาจจับตัวกับ UV Absorber และ HALs ทำให้เกิดสีเหลืองขึ้น โดยยิ่งเพิ่มปริมาณ UV Absorber และ HALs ยิ่งทำให้จับตัวกับสารเติมแต่งมากขึ้นทำให้สีเคลือบเกิดความเหลืองเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.27 ดัชนีความเหลืองของสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs, สีเคลือบที่ไม่มีสารเติมแต่งแต่มี UV Absorber และ HALs และสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs ในปริมาณมากกว่าปกติ 2 เท่า ที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ

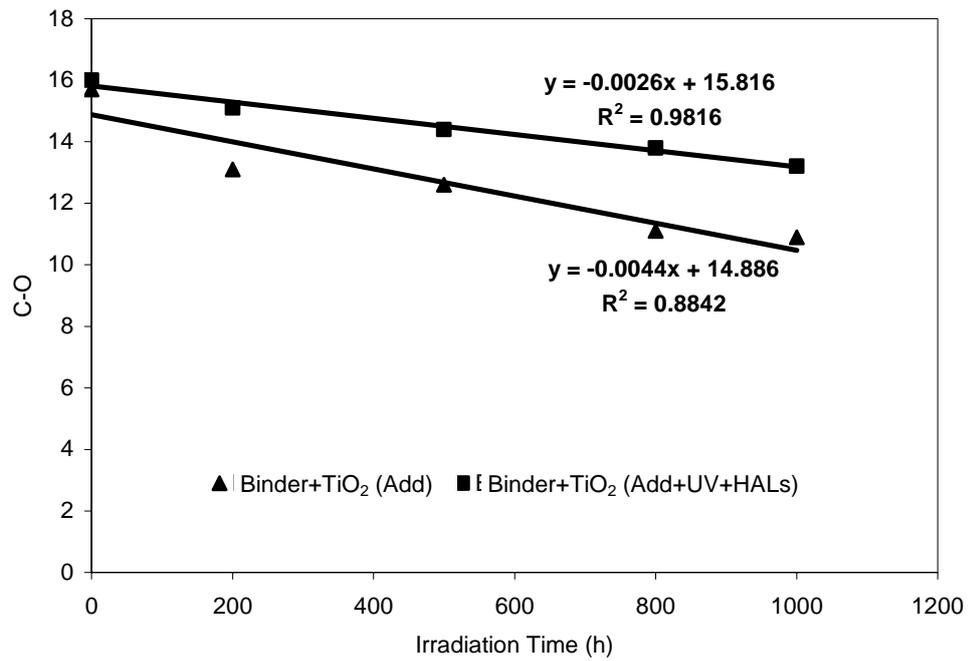
5.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสีเคลือบด้วยเทคนิค FTIR

เมื่อทดสอบสีเคลือบก่อนการเร่งสภาวะด้วยเทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 5.28 พบว่าสีเคลือบมีการดูดกลืนแสงของ หมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่เลขคลื่น 1732 cm^{-1} , พันธะ C-H ของหมู่เมทิลตรงตำแหน่งสายโซ่กิ่งของอะคริลิก ที่เลขคลื่น $1380\text{-}1450\text{ cm}^{-1}$, พันธะ C-O ที่เลขคลื่น $1000\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ และพันธะ C-H ของสายโซ่หลัก ที่เลขคลื่น 2956 cm^{-1}

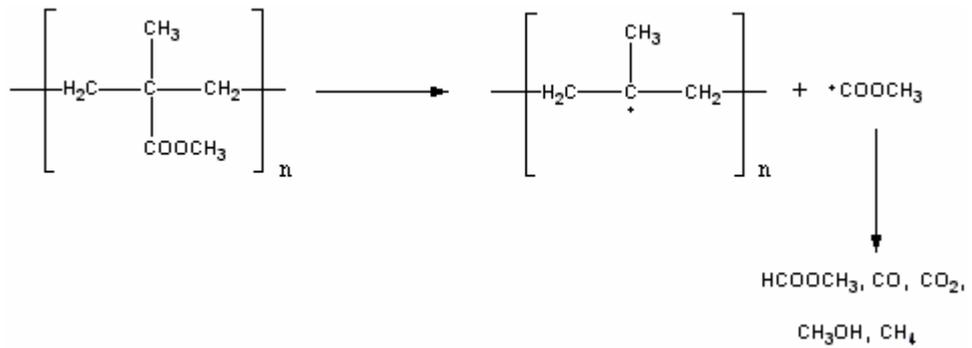


รูปที่ 5.28 FTIR spectra ของสีเคลือบที่ก่อนและหลังผ่านการเร่งสภาวะที่ระยะเวลาต่างๆ

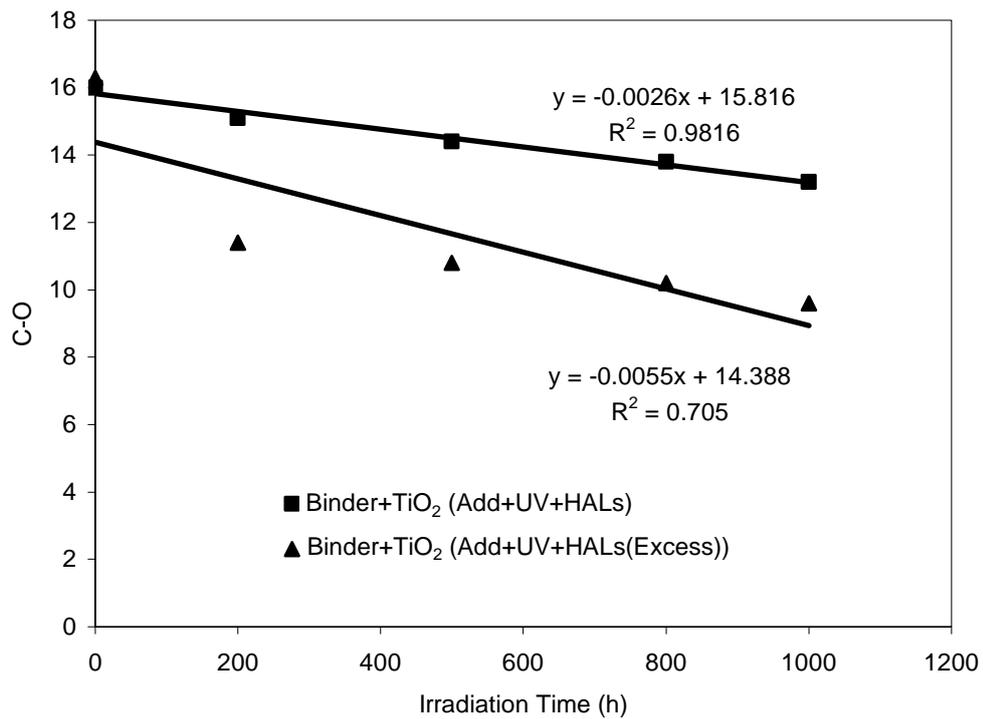
เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการดูดกลืนแสงของพันธะต่างๆ กับการดูดกลืนแสงของพันธะ C-H ของสายโซ่หลัก (เลขคลื่น 2956 cm^{-1}) ของสีเคลือบปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ พบว่าการดูดกลืนแสงของพันธะ C-O (เลขคลื่น $1000\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$) ลดลง เมื่อเวลาในการเร่งสภาวะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.29 เนื่องจากอะคริลิกที่เป็นสารยึดในสีเคลือบเกิดการเสื่อมสภาพโดยการขาดออกของสายโซ่กิ่งได้เป็น CO หรือ CO_2 ดังกลไกที่แสดงในรูปที่ 5.30 ทำให้ปริมาณของพันธะ C-O ลดลงเมื่อเวลาในการเร่งสภาวะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าสีเคลือบที่มีสารเติมแต่งมีการลดลงของพันธะ C-O มากกว่าสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติดังแสดงในรูปที่ 5.29 แสดงว่า UV Absorber และ HALs สามารถลดการเสื่อมสภาพของสีเคลือบได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 5.31 พบว่าสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่ามีการลดลงของพันธะ C-O มากกว่าสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ



รูปที่ 5.29 การดูคลี่แสงของพันธะ C-O ของสีเคลือบปกติ และสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ

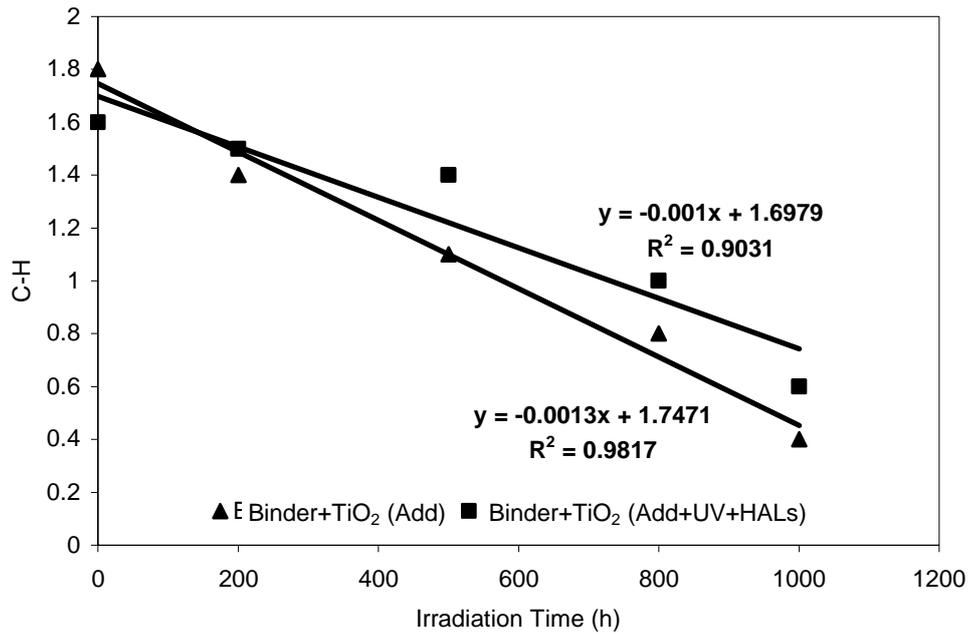


รูปที่ 5.30 กลไกการเสื่อมสภาพของอะคริลิกแบบการขาดออกของสายโซ่กิ่ง [27]

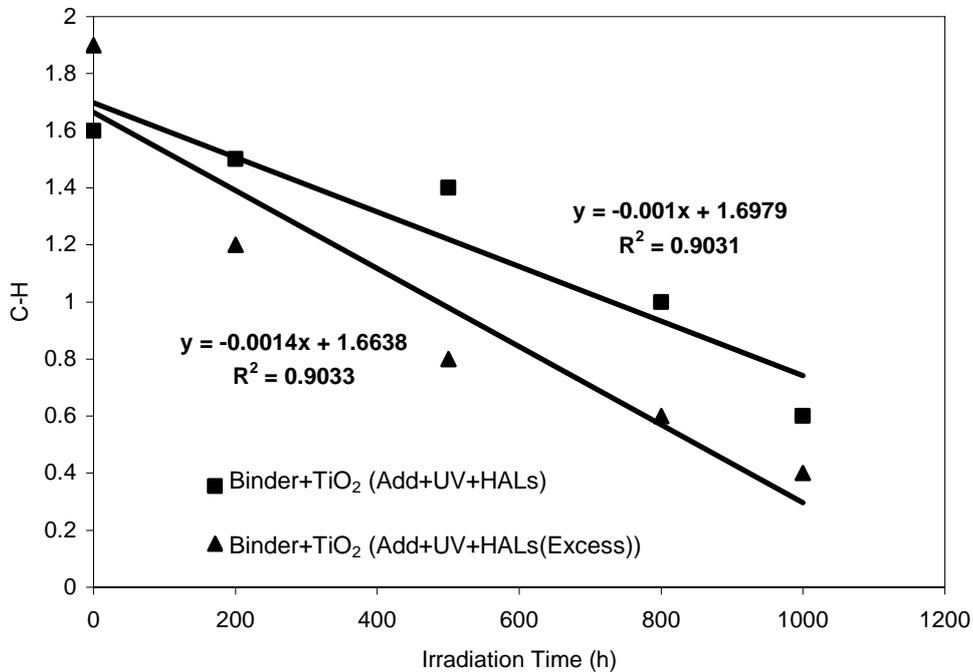


รูปที่ 5.31 การดูคลื่นแสงของพันธะ C-O ของสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนมากกว่าปกติ 2 เท่าที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ

เมื่อพิจารณาการดูคลื่นแสงของพันธะ C-H ของหมู่เมทิลตรงตำแหน่งสายโซ่กิ่งของอะครีลิค (เลขคลื่น 1380-1450 cm^{-1}) ของสีเคลือบปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ พบว่าสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ มีการลดลงของการดูคลื่นแสงของพันธะ C-H น้อยกว่าสีเคลือบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 5.32 ซึ่งการดูคลื่นแสงของพันธะ C-H ลดลงเนื่องจากสายโซ่อะครีลิคเกิดการขาดออกของสายโซ่กิ่งเกิดเป็น CH_4 ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซหลุดออกจากชิ้นงาน ทำให้ปริมาณ C-H ลดลงดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 5.30 แต่สีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่า จะมีการดูคลื่นแสงของพันธะ C-H ลดลงมากกว่าสีเคลือบปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในปริมาณปกติดังแสดงในรูปที่ 5.33

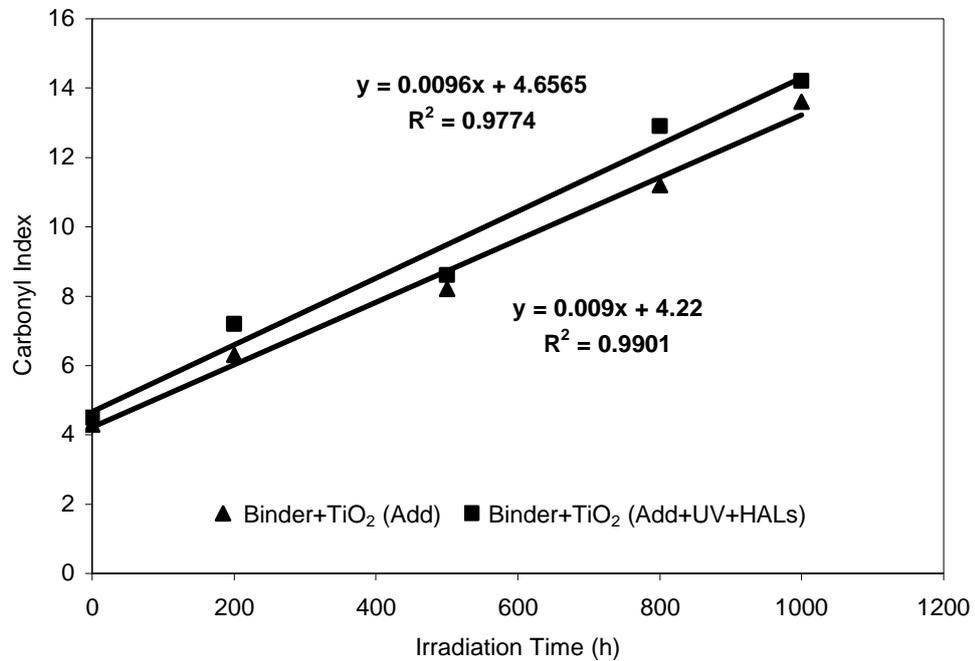


รูปที่ 5.32 การดูคดกลืนแสงของพันธะ C-H ของสีเคลือบปกติ และสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ

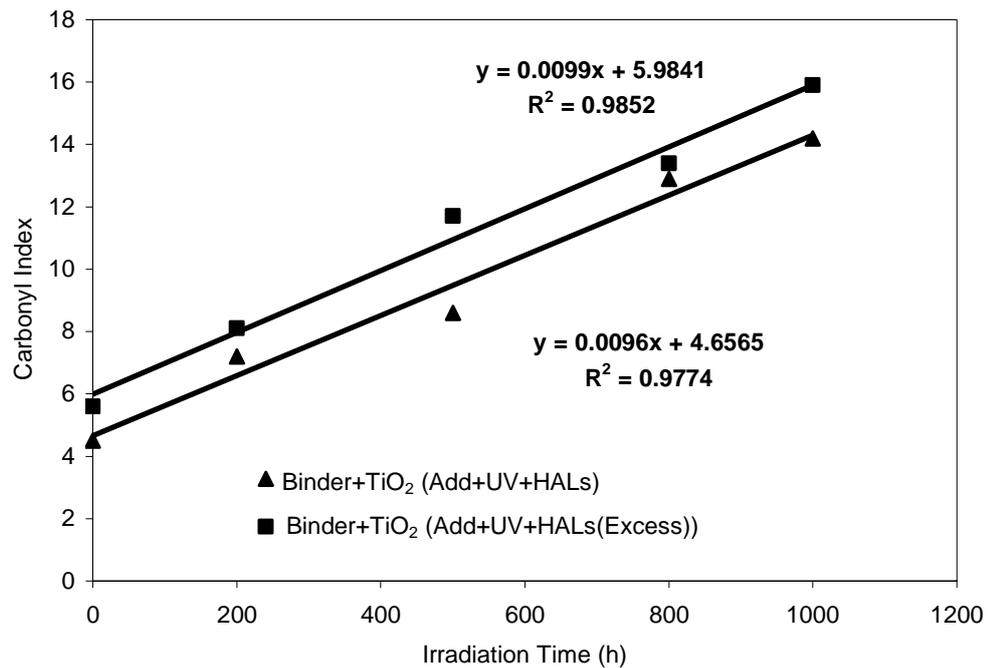


รูปที่ 5.33 การดูคดกลืนแสงของพันธะ C-H ของสีเคลือบที่มี UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่า ที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ

เมื่อพิจารณาดัชนีคาร์บอนิลของสีเคลือบที่มีสารเติมแต่งและสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ พบว่าสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของดัชนีคาร์บอนิลมากกว่าสีเคลือบที่มีสารเติมแต่งดังแสดงในรูปที่ 5.34 โดยดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้สีเคลือบเกิดความเหลืองขึ้น [13] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.3.1 คือ สีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติมีความเหลืองมากกว่าสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง เมื่อพิจารณาสีเคลือบที่มีสารเติมแต่ง, UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่า พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของดัชนีคาร์บอนิลมากกว่าสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในปริมาณปกติ ดังแสดงในรูปที่ 5.35

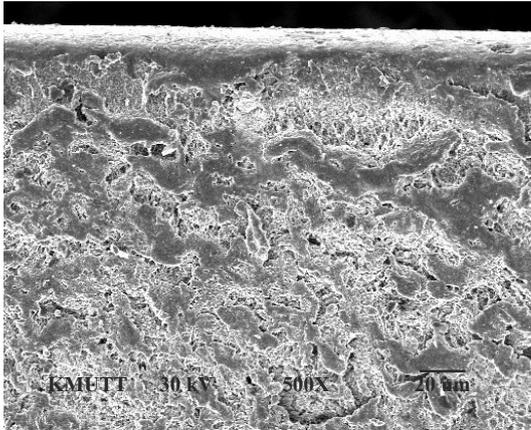


รูปที่ 5.34 ดัชนีคาร์บอนิลของสีเคลือบปกติ และสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติที่เวลาต่างๆ ในการเร่งสภาวะ

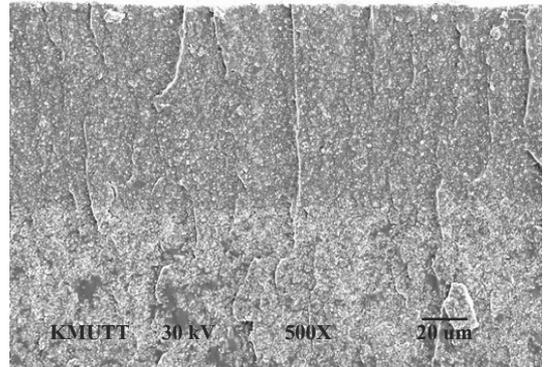


รูปที่ 5.35 ดัชนีคาร์บอนิลของสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่าที่เวลาต่างๆในการเร่งสภาวะ

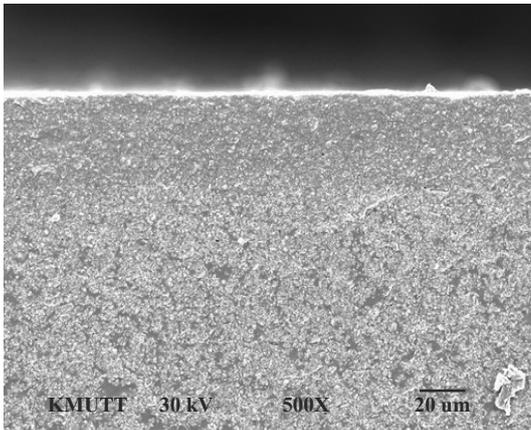
เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ของผิวเคลือบปกติก่อนและหลังการเร่งสภาวะที่ 1,000 ชั่วโมง ของผิวเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติหลังการเร่งสภาวะ และผิวเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs มากกว่าปกติ 2 เท่าหลังการเร่งสภาวะที่ 1,000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.36 พบว่าเนื้อของผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะมีความแน่นขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบก่อนการเร่งสภาวะ เมื่อทดสอบการบวมตัวของสีเคลือบก่อนและหลังการเร่งสภาวะ โดยการแช่ในสารละลายคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbon tetrachloride) และเปรียบเทียบการบวมตัวของสีเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 5.37 พบว่าสีเคลือบก่อนการเร่งสภาวะมีการบวมตัวสูงกว่าสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะ แสดงว่าสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลทำให้สีเคลือบแน่นขึ้นจึงทำให้อัตราการบวมตัวของสีเคลือบลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากกล้อง Scanning Electron Microscope ที่พบว่าสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะมีความแน่นขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบสีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะ ในกรณีสีเคลือบปกติและสีเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs พบว่าการบวมตัวของสีเคลือบทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



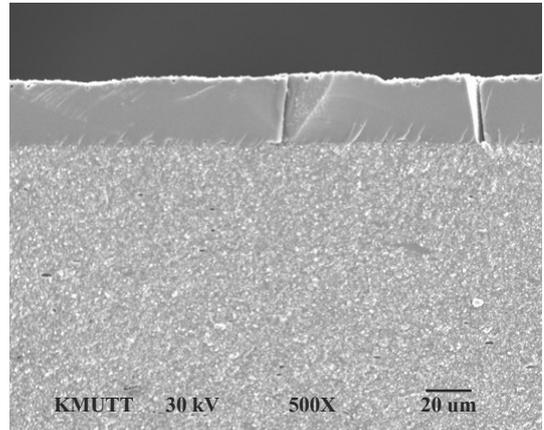
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

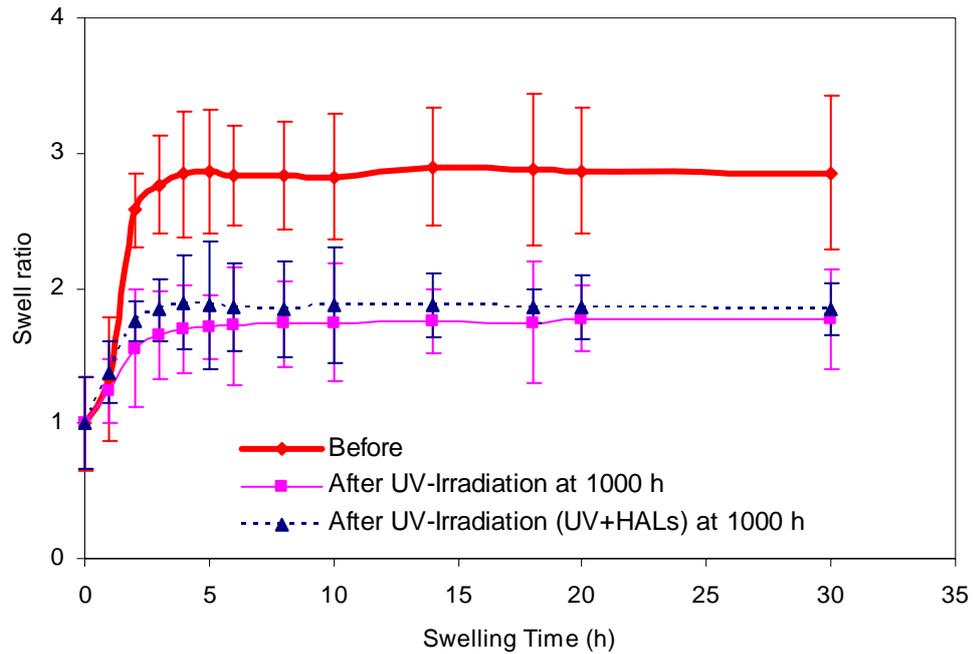
รูปที่ 5.36 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มเคลือบ

(ก) ฟิล์มเคลือบปกติก่อนการเร่งสภาวะ

(ข) ฟิล์มเคลือบปกติที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 1000 ชั่วโมง

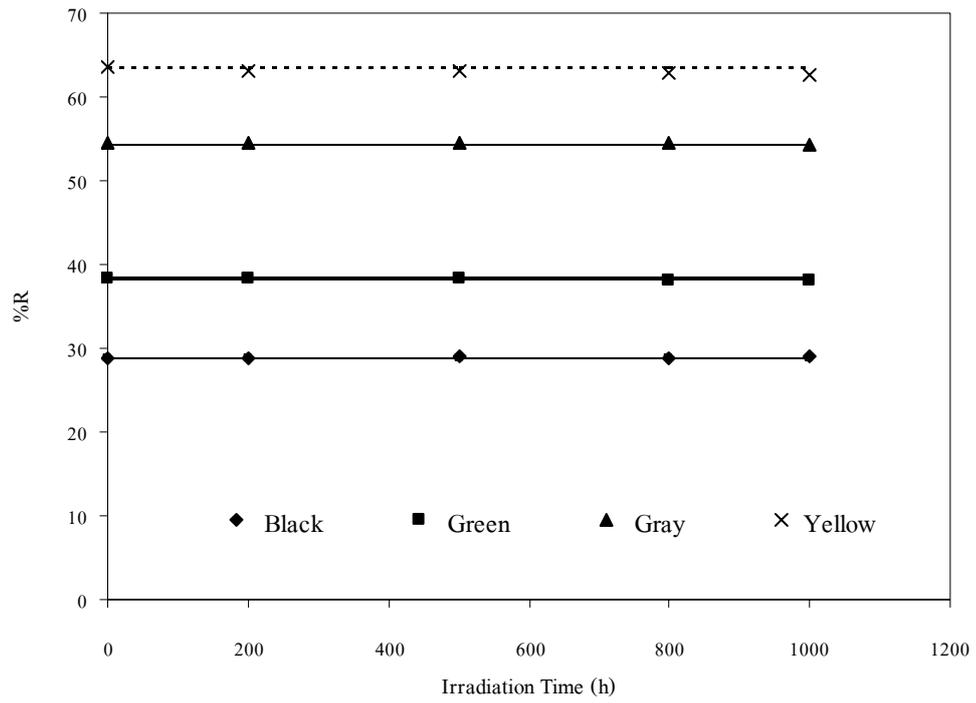
(ค) ฟิล์มเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนปกติหลังผ่านการเร่งสภาวะที่ 1,000 ชั่วโมง

(ง) ฟิล์มเคลือบที่เติม UV Absorber และ HALs ในอัตราส่วนมากกว่าปกติ 2 เท่าหลังผ่านการเร่งสภาวะที่ 1,000 ชั่วโมง



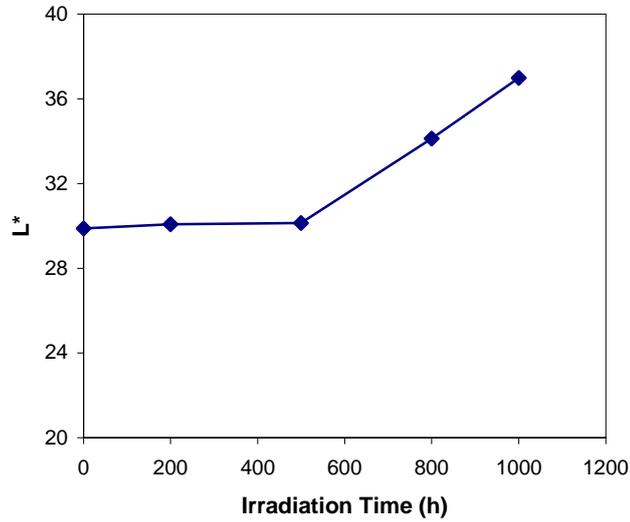
รูปที่ 5.37 การบวมตัวของสีเคลือบที่เวลาต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีดำ, สีเขียว, สีเทาและสีเหลืองที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.38 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบทุกสีที่ผ่านการเร่งสภาวะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เนื่องจากสีเคลือบสีที่มีความเข้มกว่าสีเหลืองที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสื่อมสภาพเช่น สีดำ, สีเขียว, สีเทาและสีเหลือง ทำให้สีเหลืองที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพถูกกลืนด้วยสีของสีเคลือบที่เข้มกว่า ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่สามารถตรวจพบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบโดยการวัดการเปลี่ยนแปลงของสีในช่วงที่ตามองเห็นตามมาตรฐาน CIE-Lab*

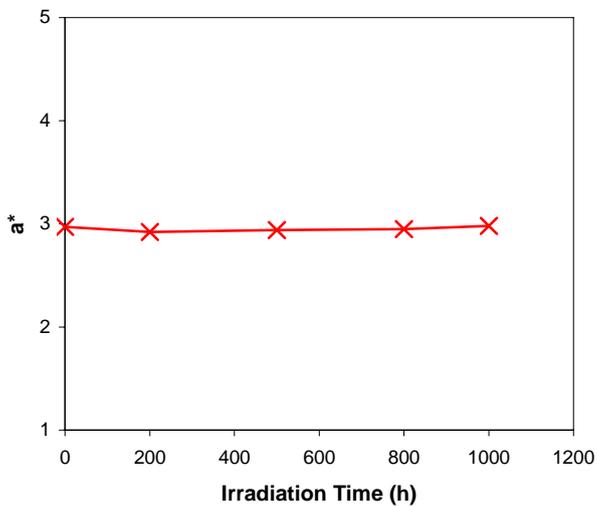


รูปที่ 5.38 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่เวลาในการเร่งสภาวะต่างๆ

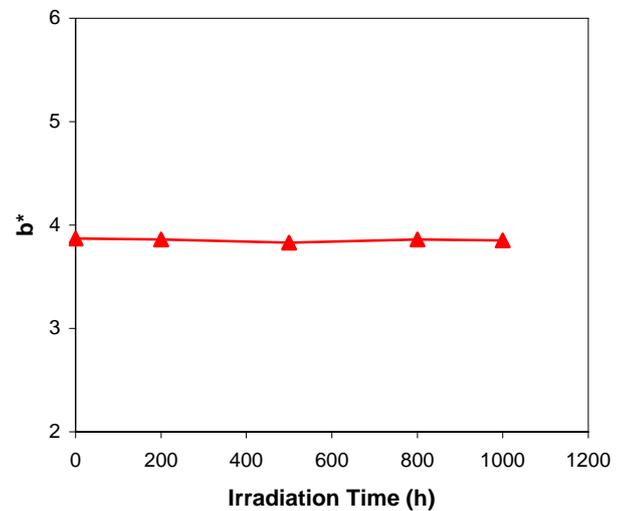
เมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบในช่วงที่ตามองเห็นตามมาตรฐาน CIE-Lab* ของสีเคลือบสีต่างๆที่ผ่านการเร่งสภาวะ พบว่าสีคำมีความสว่างเพิ่มขึ้น (ค่า L^* เพิ่มขึ้น) แต่ไม่มีการเปลี่ยนเป็นเฉดสีอื่น (ค่า a^* และ ค่า b^* เปลี่ยนแปลงน้อยมาก) ดังแสดงในรูปที่ 5.39



(ก)



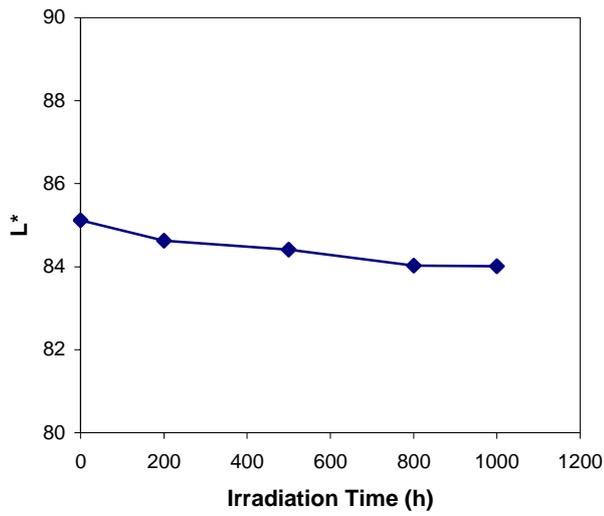
(ข)



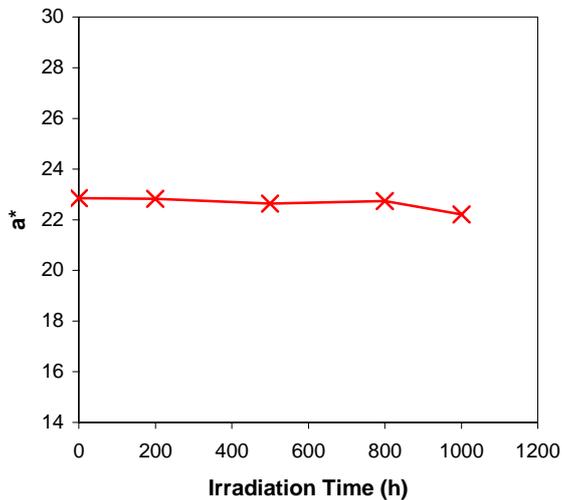
(ค)

รูปที่ 5.39 การเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบสีคำก่อนการเร่งสภาวะและที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง (ก) ค่า L^* (ข) ค่า a^* (ค) ค่า b^*

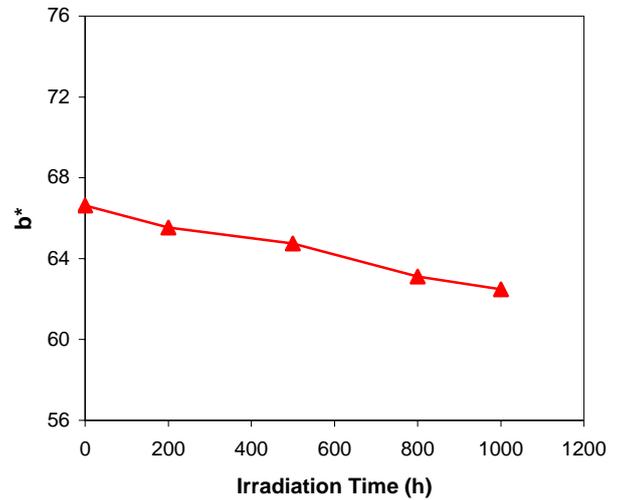
ส่วนสีเหลืองที่ผ่านการเร่งสภาวะพบว่ามีสีซีดลง กล่าวคือมีความสว่างลดลงเล็กน้อย (L^* ลดลง) แต่ความเหลืองลดลงมาก (b^* ลดลง) ดังแสดงในรูปที่ 5.40 ส่วนสีเทาที่ผ่านการเร่งสภาวะมีความสว่างลดลงเช่นกัน (L^* ลดลง) ดังแสดงในรูปที่ 5.41 และสีเขียวที่ผ่านการเร่งสภาวะพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีดังแสดงในรูปที่ 5.42



(ก)

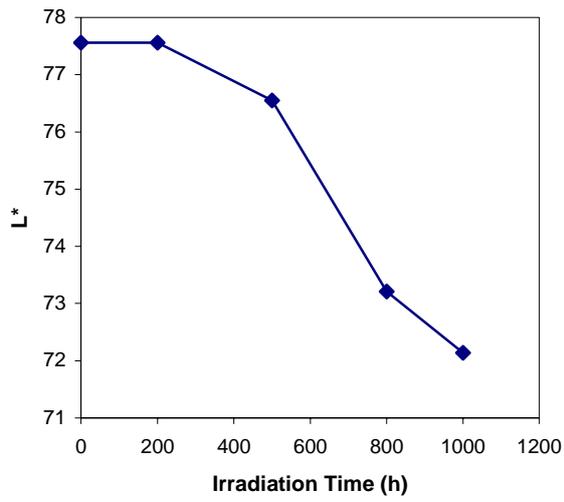


(ข)

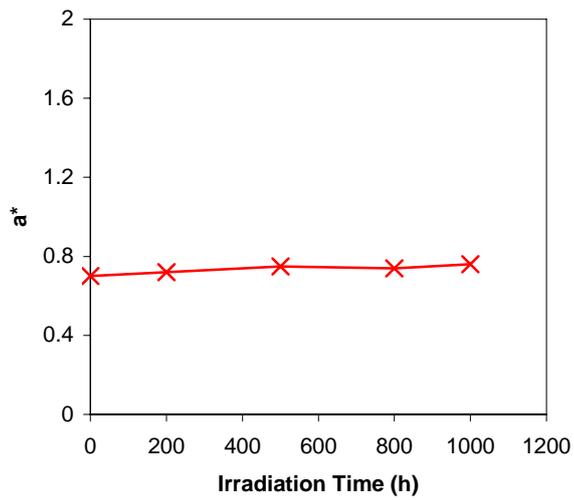


(ค)

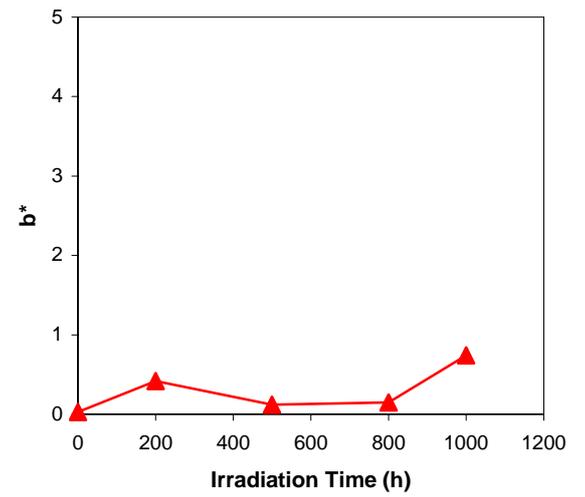
รูปที่ 5.40 การเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบสีเหลืองก่อนการเร่งสภาวะและที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง (ก) ค่า L^* (ข) ค่า a^* (ค) ค่า b^*



(ก)

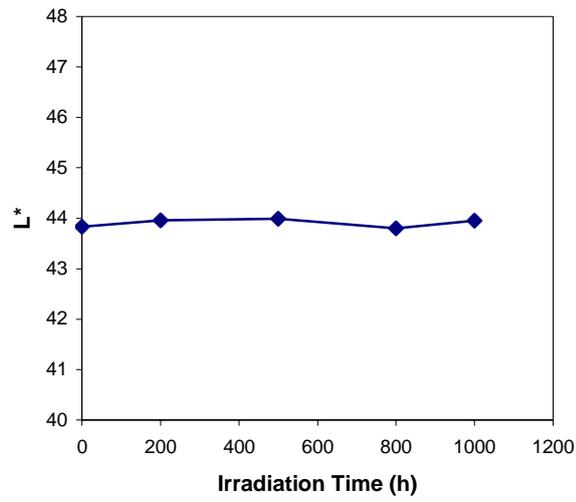


(ข)

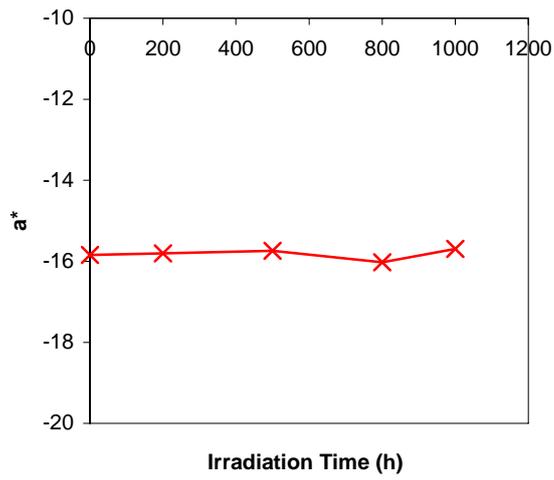


(ค)

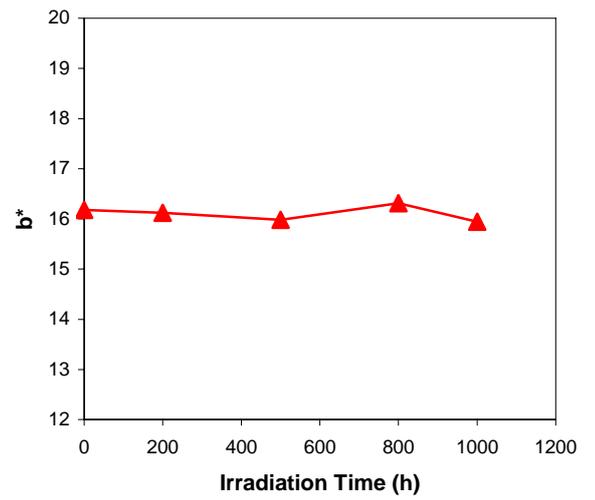
รูปที่ 5.41 การเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบสีเทาก่อนการเร่งสภาวะและที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง (ก) ค่า L^* (ข) ค่า a^* (ค) ค่า b^*



(f)



(ง)



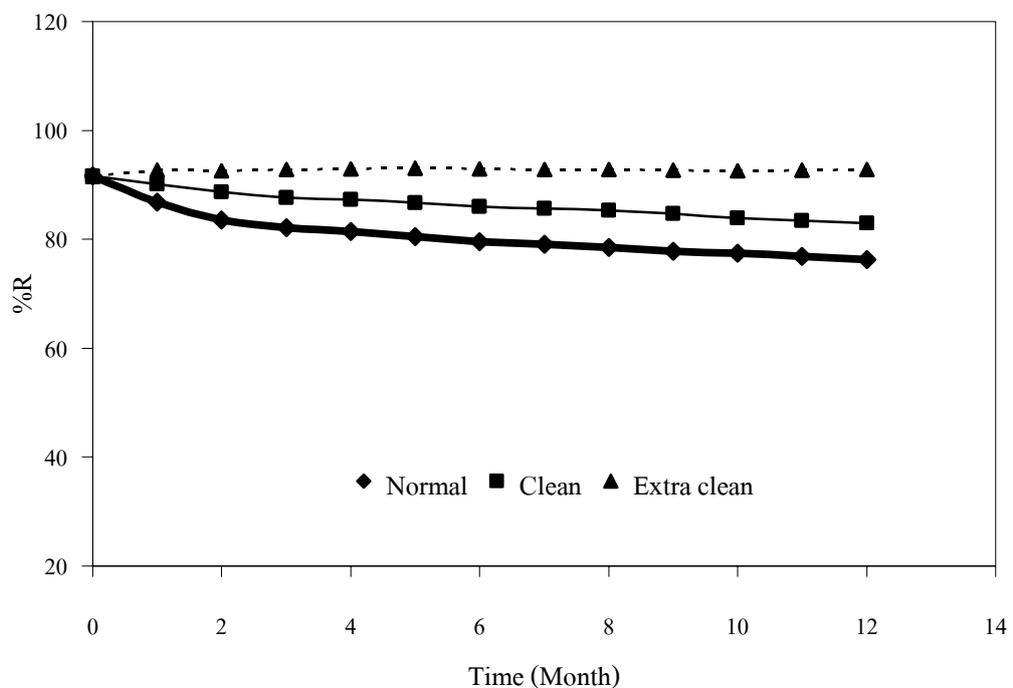
(ค)

รูปที่ 5.42 การเปลี่ยนแปลงสีของสีเคลือบสีเขียวก่อนการเร่งสภาวะและที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ 200, 500, 800 และ 1,000 ชั่วโมง (ก) ค่า L* (ง) ค่า a* (ค) ค่า b*

5.3.3 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริง

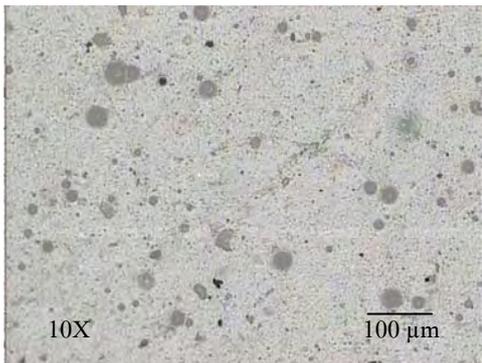
จากการทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบภายใต้การเร่งสภาวะ พบว่าสามารถสังเกตการเสื่อมสภาพของสีขาวได้ชัดเจนที่สุด กล่าวคือมีการเปลี่ยนแปลงสีและค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์อย่างชัดเจนประกอบกับจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมาก ดังนั้นการทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริง จึงทดสอบเฉพาะสีขาว โดยวางชิ้นงานที่เคลือบด้วยสีขาวบนคานฟ้า ไม่มีร่มเงาและเก็บตัวอย่างทุกเดือนจำนวน 3 ชิ้น

จากการทดสอบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบดังแสดงในรูปที่ 5.43 พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่ไม่ได้ทำความสะอาดมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างและมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากปริมาณฝุ่นที่เกาะบนผิวเคลือบทำให้สีเคลือบมีประสิทธิภาพด้อยลง กล่าวคือประสิทธิภาพของสีเคลือบที่ไม่ได้ทำความสะอาดจะขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ เมื่อพิจารณาสีเคลือบที่ผ่านการทำความสะอาด โดยใช้ฟองน้ำและน้ำสบู่พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจากสีเคลือบที่ไม่ได้ทำความสะอาด แต่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ยังคงลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อเปรียบเทียบกับสีเคลือบที่ทำความสะอาดโดยการขัดผิว พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์กลับมีค่าเท่ากับสีเคลือบก่อนการทดสอบ

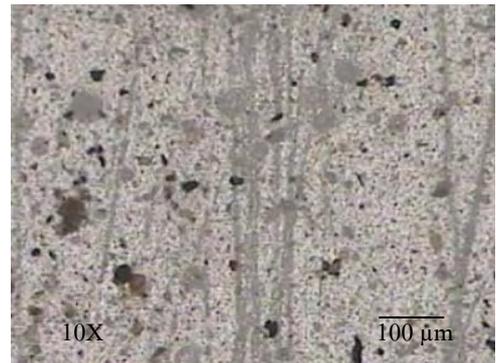


รูปที่ 5.43 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบที่ผ่านการใช้งานจริงที่เวลาต่างๆ

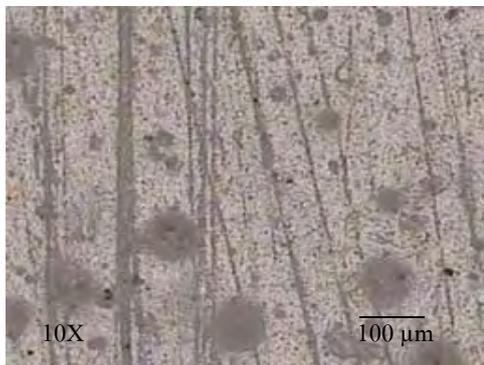
เมื่อพิจารณาสภาพผิวเคลือบด้วยกล้อง Optical Microscope ที่ระยะเวลา 12 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 5.44 พบว่าผิวเคลือบที่ไม่ทำความสะอาดมีสิ่งสกปรกมากเมื่อเทียบกับผิวเคลือบก่อนการทดสอบ และเมื่อใช้ฟองน้ำและน้ำสบู่ทำความสะอาดผิวเคลือบพบว่าสิ่งสกปรกบนผิวเคลือบลดลง แต่เมื่อทำความสะอาดด้วยการขัดผิวโดยใช้ น้ำสบู่และแผ่นขัด (Scotchbright™) จะไม่พบสิ่งสกปรกเหลือบนผิวเคลือบเลย ซึ่งการขัดผิวนอกจากเป็นการทำความสะอาดผิวเคลือบแล้ว ยังเป็นการกำจัดผิวเคลือบที่เสื่อมสภาพให้หลุดไปเป็นผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น



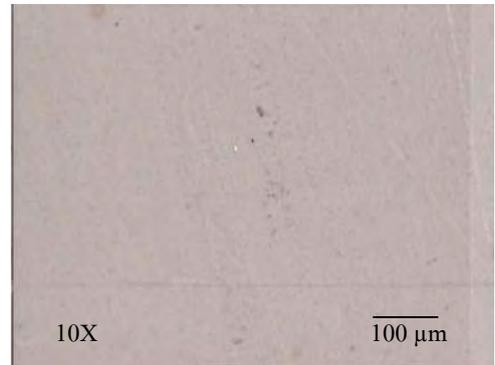
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 5.44 ภาพถ่ายของสีเคลือบ

(ก) ก่อนการทดสอบ

(ข) ผ่านการทดสอบที่เวลา 12 เดือน

(ค) ผ่านการทดสอบที่เวลา 12 เดือนและทำความสะอาดผิวเคลือบด้วยน้ำสบู่และฟองน้ำ

(ง) ผ่านการทดสอบที่เวลา 12 เดือนและขัดผิวเคลือบด้วยน้ำสบู่และแผ่นขัด

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง

6.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

6.1.1 อิทธิพลของชนิดผงสีและความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

ความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรมีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ กล่าวคือค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งที่ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์คงที่ไม่มีการเพิ่มขึ้น แม้ว่าความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรจะเพิ่มขึ้นก็ตาม

6.1.2 อิทธิพลของความหนาสีเคลือบต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

ความหนาของสีเคลือบมีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบ กล่าวคือค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของสีเคลือบเพิ่มขึ้น จนถึงจุดอิ่มตัวค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ไม่มีการเพิ่มขึ้นแม้ความหนาเพิ่มขึ้นก็ตาม ซึ่งความหนาของสีเคลือบที่ทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์อิ่มตัวนั้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรและชนิดของผงสีที่ใช้ โดยสีเคลือบที่มีความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรสูงจะมีจุดอิ่มตัวที่ความหนาค่ากว่าสีเคลือบที่มีความเข้มข้นของผงสีโดยปริมาตรต่ำ

6.1.3 อิทธิพลของไททานเนียมไดออกไซด์ที่ผสมกับผงสีสีดำ

เมื่ออัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีสีดำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบเพิ่มขึ้น แต่อัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีดำที่เพิ่มขึ้นจนถึงที่ 7:1 จึงทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงถึงแม้อัตราส่วนของไททานเนียมไดออกไซด์ต่อผงสีดำจะเพิ่มขึ้นก็ตาม

6.2 การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์กับสีเคลือบทางพาณิชย์

สีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ผลิตได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่าสีเคลือบเชิงพาณิชย์ที่แฉดสี

ใกล้เคียงกัน ยกเว้นสีเคลือบสีแดงและสีฟ้าที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับสีเคลือบทางพาณิชย์

6.3 การเสื่อมสภาพของสีเคลือบ

6.3.1 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบด้วยเครื่องเร่งสภาวะ

สีเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาลดลงเมื่อเวลาในการเร่งสภาวะเพิ่มขึ้น โดยค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบจากนั้นจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์คงที่เมื่อระยะเวลาในการทดสอบนานขึ้น นอกจากนี้การเสื่อมสภาพของสีเคลือบทำให้เกิดการขึ้นเหลือง โดยสีเหลืองที่เกิดขึ้นเกิดจากการเสื่อมสภาพของสารยึดและสารเติมแต่งในสีเคลือบ โดยการเสื่อมสภาพของสารเติมแต่งมีอิทธิพลต่อการขึ้นเหลืองมากกว่าการเสื่อมสภาพของสารยึด และการเติม UV Absorber และ HALs สามารถลดการเสื่อมสภาพของสีเคลือบที่ไม่มีสารเติมแต่งได้ แต่กลับทำให้สีเคลือบที่มีสารเติมแต่งมีความเหลืองมากกว่าสีเคลือบที่มีสารเติมแต่งไม่มี UV Absorber และ HALs เนื่องจาก UV Absorber และ HALs อารวมตัวกับสารเติมแต่งในสีเคลือบทำให้สีเคลือบเกิดการขึ้นเหลืองมากกว่าสีเคลือบที่มีสารเติมแต่งไม่มี UV Absorber และ HALs อีกทั้งการเพิ่มปริมาณ UV Absorber และ HALs มากขึ้นยิ่งทำให้สีเคลือบเกิดการขึ้นเหลืองมากขึ้น

6.3.2 การทดสอบการเสื่อมสภาพของสีเคลือบจากสภาวะการใช้งานจริง

การขัดผิวหน้าของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการใช้งานทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับสีเคลือบที่ไม่เคยผ่านการใช้งาน แสดงว่าการเสื่อมสภาพของสีเคลือบมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะที่ผิวของสีเคลือบเท่านั้น

6.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาอิทธิพลของ UV Absorber และ HALs ต่อสารเติมแต่งแต่ละชนิดที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ UV Absorber และ HALs ที่เหมาะสมกับสารเติมแต่ง
2. ควรศึกษาผลของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบ
3. ควรประเมินศักยภาพด้านการประหยัดพลังงานของสีเคลือบแต่ละสี

เอกสารอ้างอิง

1. คณะอนุกรรมการการพยากรณ์ความต้องการในการใช้ไฟฟ้า, 2547, การพยากรณ์ความต้องการในการใช้ไฟฟ้า, <http://www.eppo.go.th/load/load-forecast.html>, มกราคม
2. Chirarattananon, S. and Taweekun, J., 2002, “A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand”, **Energy Conversion and Management**, Vol. 44, pp. 743-762.
3. อนุสรฯ ศรีสรवल, 2545, การศึกษาวัสดุผิวเคลือบสะท้อนความร้อน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
4. S.Chandra and S.Moalla, 1992, “Energy saving from industrialized housing construction systems and roofing tiles”, **Proc.Energy Efficient Building Association Conf.**, Raleigh, NC, USA.
5. Danny S., Jeffrey K., John R., 2002, “Comparative Evaluation of the Impact of Roofing Systems on Residential Cooling Energy Demand in Florida”, Proceedings of ACEEE 2002 Summer Study, **American Council for an Energy Efficient Economy**, Washington, DC, August 2002.
6. Smith G., 2002, “Coloured paints based on iron oxide and silicon oxide coated flakes of aluminium as the pigment, for energy efficient paint: optical and thermal experiments” **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2003, Vol.79, pp.179–197
7. Degussa Metal Catalyst Cerdec, [Online], Available : Cool Pigment, <http://www.ferro.com>. [2002, October 10].
8. Paul B., Sarah E., 1997, “Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials”, **Journal of Energy and buildings**, Vol.25, pp.149-158.
9. Oren M. and Nayar S., 1986, “Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision”, **Journal of Computer Vision**, Vol 14, pp.227.
10. Smith G., Gentle A. and N. Mronga, 2003, “Coloured paints based on iron oxide and silicon oxide coated flakes of aluminium as the pigment, for energy efficient paint: optical and thermal experiments”, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 79, pp. 179-197.

11. Hong Y., Xiu Y., 2001, "Characterization of Absorptivities to Solar Radiation for Corored Pigments in coating", **Journal of coatings Technology**, Vol.73, pp. 71- 75.
12. Zorica C., Marta K., 1996, "Application of the Kubelka-Munk theory for the determination of the optical properties of solar absorbing paints", **Journal of progress in organic coatings**, Vol.30, pp. 59-66.
13. Norman S., Michele E., Amaya O., Christopher M., John S., Robert B., 2002, "Behaviour of nanoparticle (ultrafine) titanium dioxide pigments and stabilizers on the photooxidative stability of water based acrylic and isocyanate based acrylic coatings", **Journal of Polymer Degradation and Stability**, Vol.78, pp. 467-478.
14. Michael I., Larry L., Andrew A., 2006, "Multiscattering of light by particles", **Journal of Optic**, Cambridge University, Cambridge, England, pp. 124-135.
15. Marta K., Zorica C., 2003, "The influence of paint dispersion parameters on the spectral selectivity of black-pigmented coatings", **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol.80, pp.239-245.
16. Halina K., Alina K., 2000, "Photooxidative degradation of poly(alkyl methalate)s", **European Polymer Journal**, Vol.36, pp.767-777.
17. Chaintore O., Trossarelli M., 2000, "Photooxidative degradation of acrylic and methacrylic polymers", **Journal of Polymer**, Vol.41, pp.1657-1668.
18. อรุษา สรวารี, "การผลิตสีเคลือบ", **สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์)**, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
19. Golden Artist Colors, [Online], Available :
<http://www.goldenpaints.com/justpaint/jp7article1.php>. [2002, October 10]
20. คณะอนุกรรมการเทคนิคคณะที่ 32, 2004, "ข้อกำหนดฉลากเขียวของกระเบื้องมุงหลังคา", **โครงการฉลากเขียวสำหรับสีอีพ็อกซี**, หน้า 5-7.
21. DLM Equipment, **Paint Equipment** [Online], Available :
<http://www.dlmequipment.com/wecbottom.html>, [2002, October 5].
22. Paulo O., **Milling Equipment** [Online], Available :
<http://www.pauloabbe.com/productLines/millingEquipment/BallMills/index.html>. [2004, April 7]
23. Tim B., **Union Process** [Online], Available :
<http://www.unionprocess.com/wetbatprod.html>. [2004, May 2]

24. Paul C., NETZCH Korea. [Online], Available :
http://www.netzsch.co.kr/gnd/basic_m02.asp [2002, July 8].
25. R. Lambourne, 1993, "Paint Process", **Paint and surface Coating : Theory and Practic**,
ELLIS HORWOOD LIMITED, pp.28-131.
26. Dupont [Online], Available : <http://www.dupont.com/tipure/coatings/coattoc.html>, [2000,
November 30].
27. Shimadzu Co.,Ltd, 2006, "การเทียบสี", **เอกสารประกอบการอบรมเครื่อง
Spectrophotometer**, pp.24-28.
28. Ian C., 1999, "Fundamental Aspects of Polymer Degradation", **Polymer Research Group**,
Chemistry Department, University of Glassgow, UK, pp.14-29.

ภาคผนวก ก

DATA SHEET

TI-PURE® R-902 RUTILE TITANIUM DIOXIDE

A fine, dry, white powder with the following general properties:

TYPICAL ANALYSIS*

Titanium Dioxide (TiO ₂)	91% min.
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	4.5% max.
Silicon Dioxide (SiO ₂)	2.0% max.

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES*

Specific gravity	4.0
Bulking value	0.030 gal/lb (0.250 L/kg)
Oil absorption (ave.)	17 lb/100 lb (170 g/kg)
pH	7.5-9.5
% Volatiles @ 221°F (105°C) (Determined at time of packaging)	0.5% max.

*The above tables give typical properties based on historical production performance. Du Pont does not make any express or implied warranty that this product will continue to have these typical properties.

USES

Very good chalk resistance, gloss and gloss retention make Ti-Pure® R-902 particularly suited for exterior industrial and trade sales finishes.

In plastics, Ti-Pure® R-902 combines good weathering and yellowing resistance at a small sacrifice in tinting strength.

*Reg. U.S. Pat. & T.M. Off., Du Pont Co.

In inks, Ti-Pure® R-902 is especially useful in most direct-reinuous formulas where high opacity, brightness and gloss are essential. Its excellent durability and bake resistance are of particular value in metal decorating inks.

Also available as an aqueous slurry—Ti-Pure® R-942.

PERSONAL SAFETY

Health Hazards

In Du Pont tests, dusts of titanium dioxide, including titanium dioxide treated with amorphous silica, produced a response in the lungs of rats comparable to the effects given by inert or nuisance dusts.

Titanium dioxide is regulated as an air contaminant by the U.S. Department of Labor (OSHA) under Title 29 CFR 1910.1000. OSHA has ruled that an employee's exposure to titanium dioxide in any eight-hour work shift of a forty-hour week shall not exceed a Time-Weighted Average of 15 mg/m³ in air.^b

The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) classifies titanium dioxide as a nuisance dust and recommends a Threshold Limit Value, TLV^c, of 10 mg/m³ total dust or 5 mg/m³ respirable dust.

OSHA does not define a specific limit for a titanium dioxide modified with amorphous silica. If Ti-Pure® R-902 is considered as a nuisance dust, the OSHA limit is 15 mg/m³ total dust, 5 mg/m³ respirable dust. Du Pont has elected to observe the ACGIH limit in handling Ti-Pure® R-902.

The information set forth herein is furnished free of charge and is based on technical data that Du Pont believes to be reliable. It is intended for use by persons having technical skill and at their own discretion and risk. Since conditions of use are outside our control, we make no warranty, express or implied, and assume no liability in connection with any use of this information. Nothing herein is to be taken as a license to operate under or a recommendation to infringe any patents.

ROCIMA 363/AC00311PDR/25KG

Hygiene measures: Shower or bathe at the end of working.

Protective measures: Facilities storing or utilizing this material should be equipped with an eyewash station and a safety shower.

Engineering measures: Use only in area provided with appropriate exhaust ventilation.

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

Physical state	viscous liquid
Colour	Off-white to gray
Boiling point/range	100 °C Water
Freezing point	> 100 °C CLEVELAND OPEN CUP CLEVELAND OPEN CUP
Boiling temperature	371 °C Propylene glycol
Lower explosion limit	2,60 %(V)Propylene glycol
Upper explosion limit	12,50 %(V)Propylene glycol
Vapour pressure	at 20 °C Water
Relative vapour density	<1,0Water
Water solubility	Miscible
Relative density	1,10
Evaporation rate	<1,00 Water
Relative volatility	65 - 67 %

The physical data presented above are typical values and should not be construed as a guarantee.

STABILITY AND REACTIVITY

Reactions to avoid	None known.
Materials to avoid	None known.
Stability	Stable under recommended storage conditions..
Decomposition	

TOXICOLOGICAL INFORMATION

Toxicological information
No toxicological data are available for this material.

Active ingredient: Diuron (ISO)	
Oral toxicity	LD50 rat 3.400 mg/kg
Active ingredient: Carbendazim (ISO)	

No.: X*E 00107405 00 Edition 02 Revision 1999-12-20 Page 3/ 4

Material Safety Data Sheet according to 91/155/EEC - ISO 11014-1

FOAMASTER NXZ

9. Physical and chemical properties

Physical state: liquid
 Colour: amber opaque
 Odour: of mineraloil
 pH: (at 20g/l H2O) (20°C) 5.5-7.5
 Flash point: > 140 °C
 Relative density: (20°C) 0.85 - 0.90 g/cm³
 Solubility: emulsifiable in water (20°C)

10. Stability and reactivity

Conditions to avoid:
 none known

Materials to avoid:
 Reacts with strong oxidizing agents

Hazardous decomposition products:
 In case of fire CO, CO₂ will be generated.

11. Toxicological information

Ingestion:

Acute oral toxicity: LD₅₀ >2000 mg/kg body weight (deduced from similar compounds).

12. Ecological information

Persistence and degradability:

Biodegradability according OECD 301 D method (Closed Bottle Test): > 30% BOD 28/CO_D

Aquatic toxicity:

Acute fish toxicity: LC 50 > 1 to 10 mg product/l. Acute bacteria toxicity: EC 0 > 1 to 10 mg product/l.

According to past experience, does not cause any disruptions in biological sewage plants provided it is used properly.

13. Disposal considerations

waste incineration with the approval of the responsible local authority.

ROHM AND HAAS COMPANY

COATINGS ADDITIVES

OROTAN® 731DP

Orotan® 731DP is the free flowing, dry powder version of Orotan® 731A.

As Orotan® 731A is the formaldehyde free replacement for Rohm and Haas Company's widely successful dispersant Orotan® 731, so too, is Orotan® 731DP the formaldehyde free replacement for Orotan® 731SD.

The active dispersant in Orotan® 731DP is physically and chemically equivalent to its predecessor, Orotan®

Orotan® 731DP is an extremely versatile pigment dispersant for acrylic, butadiene/styrene, and vinyl acrylic based coatings. This sodium salt of a carboxylate polyelectrolyte provides many formulating benefits, including:

- Very effective with inorganic pigments
- High efficiency performance
- Superior gloss development

Orotan® 731DP provides good gloss and hiding at economical use levels. In addition, when formulated with a high-performance binder and other high-quality additives, it can provide greater corrosion resistance to coatings formulations.

Orotan® 731DP can be used in a wide range of formulations, including flat primers, low VOC paints, interior and exterior flat, sheen, and semigloss paints, and glossy topcoats. It is a most generally useful dispersant, and can be expected to lend good dispersion, stability, and film properties in a broad array of coating systems.

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES

These properties are typical but should not be considered specifications

Appearance	Pale yellow/white, dry powder
Chemical Type	Anionic
pH (as shipped)	9.5 to 10.5
Solids, %	93
Specific Gravity, @ 25°C	0.65
Water Solubility	Completely soluble

731SD.



Hercules Incorporated
 Aqualon Division
 Hercules Plaza
 1313 North Market Street
 Wilmington, DE 19894-0001
 (302) 594-5000
 www.herc.com

Technical Information

BULLETIN VC-581F
 (Supersedes VC-581E)

NATROSOL FPS® Fluidized Polymer Suspension Latex Paint Thickener

NATROSOL® B hydroxyethylcellulose and NATROSOL® PLUS modified hydroxyethylcellulose water-soluble polymers are well known for their excellent performance as latex paint thickeners. These products have been available for many years in a powdered form. Patented technology has led to the development of fluidized polymer suspension forms of certain Natrosol grades typically used in latex paint manufacture. These liquid products offer performance characteristics parallel to those of specific Natrosol or Natrosol Plus grades but with the following important advantages:

- **Liquid Form:** NATROSOL FPS® thickeners are unique, high-solids liquid suspensions designed for easy handling in conventional paint manufacturing equipment. Because they are liquids, problems such as dusting or lumping, sometimes associated with powdered polymers, are eliminated. They are pourable and pumpable; typical viscosities, as received, are 100-110 KUs.
- **Rapid Dissolving:** Natrosol FPS thickeners are designed to disperse, dissolve, and be fully functional in a matter of minutes when exposed to dilution water and sufficient agitation. No predilution, preactivation, or pH adjustment is required. This significantly reduces preparation time compared with powdered polymers.
- **Aqueous Medium:** Natrosol FPS thickeners contain no organic solvents. Thus, volatile organic compound (VOC) values are not affected. Suspensions have common paint preservatives added to ensure stability prior to use.
- **Thickener Efficiency:** Natrosol FPS has shown increases in thickener efficiency by up to 10% compared with an equivalent amount of powdered Natrosol product. Other paint ingredients may also affect thickener efficiency.

The products and related information provided by Hercules are for **manufacturing use only**. Hercules makes no express, implied, or other representation, warranty, or guarantee concerning (i) the handling, use, or application of such products, whether alone, in combination with other products, or otherwise, (ii) the completeness, definitiveness, or adequacy of such information for user's or other purposes, (iii) the quality of such products, except that such products are of Hercules' standard quality. Users are advised to make their own tests to determine the safety and suitability of each such product or product combination for their own purposes. Read and understand the Material Safety Data Sheet (MSDS) before using this product.



VC-581F
Page 2 of 3

- **Method of Use:** Natrosol FPS® water-soluble polymer suspension can be added at any point during paint manufacture. It may be added to the premix, letdown (prior to latex addition), or to the finished paint for post-adjustment of viscosity. Adding Natrosol FPS directly to the latex is not recommended; latex flocculation may occur due to the high thickener solids of Natrosol FPS and the presence of water in the latex.

Typical Properties^(a)

Physical form	liquid
Color	tan-brown
pH	5.5
Solids, % w/w	40
Density, lbs/gal	9.5
Viscosity, KU as supplied	105
Viscosity, diluted solution	See Table

^(a)Values shown are targets and are not to be construed as product specifications.

	Viscosity	
	HEC	
	Concentration,	Specification Range,
	%	Dry Equivalent, cps
Associative Grades		
<i>Plus 430</i>	1	5,000 - 7,000
<i>Plus 330</i>	1	400 - 900
Bioresistant Grades		
H4B	1	2,600 - 3,300
HB	1	1,800 - 2,300
MB	2	5,500 - 6,500

Packaging/Storage

Natrosol FPS thickeners are available in bulk, semibulk, and drum packages. Natrosol FPS can be stored in stainless steel, fiberglass-reinforced plastic (FRP), or epoxy-lined tanks. Unlined carbon steel tanks should not be used.

Natrosol FPS should be stored at 50°-90°F (10°-32°C). At temperatures above 90°F, the viscosity of the suspensions themselves decreases; below 50°F, they become more viscous. All Natrosol FPS products should be protected from freezing. Should these products become frozen, warm to at least 50°F and thoroughly remix before using.

Storage tanks should be recirculated or periodically agitated to maintain the consistency of Natrosol FPS products. Semibulk bins or drums should not require mixing prior to use, unless they have been in storage for more than 90 days.

ภาคผนวก ข

Designation: E 891 - 87 (Reapproved 1992)

Standard Tables for Terrestrial Direct Normal Solar Spectral Irradiance for Air Mass 1.5¹

This standard is issued under the fixed designation E 891; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

INTRODUCTION

These tables utilize the recently revised (1)² extraterrestrial spectrum of Neckel and Labs (2) and replace the previous standard based on Standard E 490. In addition, refinements were made to absorption and scattering calculations in the computer code (3, 4) used to calculate the spectrum. These refinements consist of a change in the depolarization factor in the Rayleigh scattering calculations, a more accurate sampling technique for calculating scattered irradiance, and a better choice of wavelengths to perform the calculations. Comparisons with the previous standard based on Standard E 490 have shown that approximately a 5 % difference can exist in narrow band widths of the specimen, but for the integrated total little difference is apparent.

scope

1 These tables define an air mass 1.5 solar spectral irradiance distribution for use in all solar applications where standard terrestrial spectral irradiance is required for the direct normal radiation. A similar standard for global irradiance on a 37° tilted surface is given in Standard E 892.

2 These tables are modeled data that were generated using a zero air mass solar spectrum based on the revised extraterrestrial spectrum of Neckel and Labs (1), the BRITE (3) Monte Carlo radiative transfer code, and the 1962 U.S. Standard Atmosphere (5) with a rural aerosol (6, 7, 8). Further details are presented in Appendix XI.

3 The air mass zero (AM0) spectrum that was used to generate the terrestrial spectrum was provided by C. Fröhlich (8) and C. Wehrli (1) and is a revised and extended Neckel and Labs (2) spectrum. Neckel and Labs revised their spectrum employing newer limb-darkening data to convert from radiance to irradiance, as reported by Fröhlich (9), citing the work by Hardrop (10). Comparisons by Fröhlich with calibrated sunphotometer data from Mauna Loa, Hawaii, indicate that this new extraterrestrial spectrum is the best currently available.

4 The development of the terrestrial solar spectrum data is based on work reported by Bird, Hulstrom, and Lewis (4). In computing the terrestrial values using the BRITE Monte Carlo radiation transfer code, the authors cited took 1000 iterations to 2.4500 μm only. We have extended the spectrum to 4.045 μm using sixteen E_{λ} values from the original Standard E 891 - 82. Irradiance values in Standard E 891 - 82 were computed from the extraterrestrial spectrum

represented by Standard E 490. The additional data points were added to account for the solar irradiance in this region that account for approximately 1.5 % of the total irradiance between 0.305 and 4.045 μm . The errors propagated by doing so are insignificant.

1.5 An air mass of 1.5 and a turbidity of 0.27 were chosen for this standard because they are representative of average conditions in the 48 contiguous states of the United States.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

E 490 Solar Constant and Air Mass Zero Solar Spectral Irradiance Tables³

E 772 Terminology Relating to Solar Energy Conversion⁴

E 892 Tables for Terrestrial Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5 for a 37° Tilted Surface⁵

3. Terminology

3.1 Definitions (from Terminology E 772):

3.1.1 *air mass (AM)*—ratio of the mass of atmosphere in the actual observer-sun path to the mass that would exist if the observer were at sea level, at standard barometric pressure, and the sun were directly overhead.

NOTE—(Sometimes called air mass ratio.) Air mass varies with the zenith angle of the sun and the local barometric pressure, that changes with altitude. For sun zenith angle, Z , of 62° or less, and local atmospheric pressure, P , where P_0 is standard atmospheric pressure, $AM = \sec Z (P/P_0)$.

3.1.2 *solar irradiance, direct (E_d)*—solar flux coming from the solid angle of the sun's disk on a surface perpendicular to the axis of that solid angle.

3.1.2.1 *Discussion*—In conventional instruments the acceptance cone includes a plane angle of about 6°.

3.2 Descriptions of Terms Specific to This Standard:

This standard is under the jurisdiction of ASTM Committee G-3 on Properties of Nonmetallic Materials and is the direct responsibility of Subcommittee G03.09.

Present edition approved July 31, 1987. Published December 1987. Originally issued as E 891 - 82. Last previous edition E 891 - 82.

The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 12.02.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 06.01.

3.2.1 *air mass zero (AM0)*—describing solar radiation quantities outside the Earth's atmosphere at the mean earth-sun distance.

3.2.2 *meteorological range*—distance V at which the threshold contrast, ϵ , between a black and white target is 0.02.

$$V = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\epsilon}$$

Therefore, V is a function only of the atmospheric extinction coefficient σ .

3.2.3 *solar irradiance, spectral (E λ)*—solar irradiance per unit wavelength interval at a given wavelength λ . (Units $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$.)

$$E\lambda = dE/d\lambda$$

Significance and Use

4.1 Absorptance, reflectance, and transmittance of terrestrial solar energy are important factors in solar thermal system performance, photovoltaic system performance, materials studies, biomass studies, and solar simulation activities. For each of the optical properties, the initial measurements are normally a function of wavelength, which requires that the spectral distribution of the solar flux be known before the solar weighted property can be calculated. In order to compare the performance of competitive products, a single standard solar spectral irradiance distribution is desirable.

4.2 These tables provide an appropriate standard spectral irradiance distribution to be used in determining relative performance of solar thermal, photovoltaic, and other systems, components, and materials where the direct irradiance component is desired.

5. Solar Spectral Irradiance (Air Mass 1.5)

5.1 Table 1 presents the direct normal spectral irradiance in tabular form from 0.305 to 4.045 μm that is falling on a surface. The sun is at AM 1.5. The first column gives the wavelength (λ) in micrometres; the second gives the $\Delta\lambda$ integrating interval in micrometres; the third gives the direct irradiance in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$; the fourth gives the integrated solar irradiance in the wavelength range from 0.3 μm to λ_i in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; and the fifth gives the fraction of the direct normal solar irradiance in the wavelength range 0 to λ_i . There is an insignificant amount of radiation reaching the earth's surface below 0.3 μm . A plot of the results is shown in the Appendix.

6. Application

6.1 The output per unit area, O_s , of a device or system exposed to solar irradiance is the integral over wavelength of the product of the appropriate spectral response, $R(\lambda)$ (photovoltaic, photochemical, optical absorptance, reflectance, transmittance, etc.), and the solar spectral irradiance, $E\lambda$ as follows:

$$O_s = \int_0^{\infty} R(\lambda)E\lambda d\lambda \quad (1)$$

6.2 The solar response R_s of a device or system is the weighted average spectral response with the solar spectral irradiance as the weighting function as follows:

$$R_s = \frac{\int_0^{\infty} R(\lambda)E\lambda d\lambda}{\int_0^{\infty} E\lambda d\lambda} \quad (2)$$

6.3 Since the spectral response or property and the spectral irradiance are not known as algebraic expressions in general, the integration must be performed as summations so that eqs 1 and 2 become, respectively,

$$O_s = \sum_{i=1}^N R(\lambda_i)E\lambda_i\Delta\lambda_i \quad \text{and} \quad (3)$$

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^N R(\lambda_i)E\lambda_i\Delta\lambda_i}{\sum_{i=1}^N E\lambda_i\Delta\lambda_i} \quad (4)$$

where:

λ_i = wavelength of the i th point out of N for which the spectral data is known.

6.4 *Weighted Ordinate Method*—The summations are performed as indicated in eqs 3 and 4 by using the values of λ_i , $\Delta\lambda_i$, and $E\lambda_i$ given in Table 1. Interpolation between nearby values of the spectral response, $R(\lambda)$, is often required since the wavelengths of the digitally recorded response curves may differ from those given in the table.

6.5 Selected Ordinate Method:

6.5.1 In the selected ordinate method the solar spectral irradiance is divided into m wavelength intervals, each containing $1/m$ of the total solar irradiance, $E_{0-\infty}$ and having a centroid wavelength λ_p . This makes all the products $E\lambda_p\Delta\lambda$ equal to $E_{0-\infty}/m$, allowing them to be factored from the summation. Equations 3 and 4 respectively reduce to the following:

$$O_s = \frac{E_{0-\infty}}{m} \sum_{i=1}^m R(\lambda_i) \quad \text{and} \quad (5)$$

$$R_s = 1/m \sum_{i=1}^m R(\lambda_i) \quad (6)$$

6.5.2 Appropriate values for the centroid wavelengths for 100 and 50 selected ordinates are provided in Tables 2 and 3. For devices with spectral responses that are relatively smooth, the 50-point selected ordinates are adequate. For devices with spectral responses that contain complex structure the 100-point selected ordinate or weighted ordinate method should be used.

7. Bias

7.1 In the spectral region of interest to most solar users (0.3 to 4.045 μm), the BRITE Monte Carlo computer code has not been adequately verified with experimental data. A comparison of the direct normal irradiance resulting from this code has been compared with other rigorous codes. The comparison indicates that the various models agree within $\pm 5\%$ in spectral regions where there is significant radiation present. Almost all of the differences in the results of the rigorous codes can be traced to differences in the molecular absorption coefficients used as input to the codes.

7.2 The direct normal irradiance presented is the same as that measured with a 5.8 field-of-view normal incidence pyrheliometer that allows a small amount of circumsolar (diffuse) radiation to be detected. For the type of atmospheric conditions modeled, this circumsolar radiation adds approximately 1% to the measured direct irradiance.

TABLE 1 Direct Normal Irradiance—Standard Curve

NOTE— λ_1 = wavelength, μm .

E_{λ_1} = direct normal spectral irradiance at wavelength λ_1 (centered at λ_1 and calculated using absorption data with a resolution of 20 cm^{-1}), $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$.

$E_0 - \lambda_1$ = integrated direct normal irradiance in the wavelength range 0 to λ_1 , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

$E_0 - \lambda_n$ = integrated solar irradiance over all wavelengths included in Table 1, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

λ_1	E_{λ_1}	$E_0 - \lambda_1$	F_{λ_1}	λ_1	E_{λ_1}	$E_0 - \lambda_1$	F_{λ_1}
0.3050	3.4	0.02	0.0000	0.9800	549.7	518.10	0.6743
0.3100	15.6	0.07	0.0001	0.9935	630.1	526.06	0.6847
0.3150	41.1	0.21	0.0003	1.0400	582.9	554.26	0.7214
0.3200	71.2	0.49	0.0006	1.0700	539.7	571.10	0.7433
0.3250	100.2	0.92	0.0012	1.1000	366.2	584.69	0.7610
0.3300	152.4	1.55	0.0020	1.1200	98.1	589.33	0.7670
0.3350	155.6	2.32	0.0030	1.1300	169.5	590.67	0.7688
0.3400	179.4	3.16	0.0041	1.1370	118.7	591.68	0.7701
0.3450	186.7	4.08	0.0053	1.1610	301.9	596.73	0.7767
0.3500	212.0	5.07	0.0066	1.1800	406.8	603.46	0.7854
0.3600	240.5	7.34	0.0095	1.2000	375.2	611.28	0.7956
0.3700	324.0	10.16	0.0132	1.2350	423.6	625.26	0.8138
0.3800	362.4	13.59	0.0177	1.2900	365.7	646.96	0.8421
0.3900	381.7	17.31	0.0225	1.3200	223.4	655.80	0.8536
0.4000	556.0	22.00	0.0286	1.3500	30.1	659.60	0.8585
0.4100	656.3	28.06	0.0365	1.3950	1.4	660.31	0.8594
0.4200	690.8	34.80	0.0453	1.4425	51.6	661.57	0.8611
0.4300	641.9	41.46	0.0540	1.4625	97.0	663.06	0.8630
0.4400	798.5	48.66	0.0633	1.4770	97.3	664.46	0.8648
0.4500	956.6	57.44	0.0748	1.4970	167.1	667.11	0.8683
0.4600	990.0	67.17	0.0874	1.5200	239.3	671.78	0.8744
0.4700	998.0	77.12	0.1004	1.5390	248.8	676.42	0.8804
0.4800	1046.1	87.34	0.1137	1.5588	249.3	681.15	0.8866
0.4900	1005.1	97.59	0.1270	1.5780	222.3	685.87	0.8927
0.5000	1026.7	107.75	0.1402	1.5920	227.3	689.01	0.8968
0.5100	1066.7	118.22	0.1539	1.6100	210.5	692.95	0.9019
0.5200	1011.5	128.61	0.1674	1.6300	224.7	697.31	0.9076
0.5300	1084.9	139.89	0.1810	1.6460	215.9	700.83	0.9122
0.5400	1082.4	149.93	0.1951	1.6780	202.8	707.53	0.9209
0.5500	1102.2	160.85	0.2094	1.7400	158.2	718.72	0.9355
0.5700	1087.4	182.75	0.2379	1.8000	28.6	724.33	0.9428
0.5900	1024.3	203.87	0.2653	1.8600	1.8	725.24	0.9439
0.6100	1088.8	225.00	0.2928	1.9200	1.1	725.32	0.9441
0.6300	1062.1	246.51	0.3208	1.9608	19.7	725.74	0.9446
0.6500	1061.7	267.74	0.3485	1.9850	84.9	727.05	0.9463
0.6700	1046.2	288.82	0.3759	2.0050	25.0	728.15	0.9477
0.6900	859.2	387.88	0.4007	2.0358	92.5	729.91	0.9500
0.7100	1002.4	326.49	0.4249	2.0650	56.3	732.14	0.9529
0.7180	816.9	333.77	0.4344	2.1000	82.7	734.57	0.9561
0.7244	842.8	339.08	0.4413	2.1480	76.2	738.39	0.9611
0.7400	971.0	353.23	0.4597	2.1980	66.4	741.95	0.9657
0.7525	956.3	365.27	0.4754	2.2700	65.0	746.68	0.9719
0.7575	942.2	378.82	0.4816	2.3600	57.6	752.20	0.9790
0.7625	524.8	373.69	0.4864	2.4500	19.8	755.68	0.9836
0.7675	830.7	377.08	0.4908	2.4940	17.0	756.49	0.9846
0.7800	908.9	387.95	0.5049	2.5370	3.0	756.92	0.9852
0.8000	873.4	405.77	0.5281	2.9418	4.0	758.34	0.9870
0.8160	712.0	418.46	0.5446	2.9730	7.0	758.51	0.9872
0.8237	660.2	423.74	0.5515	3.0050	6.0	758.72	0.9875
0.8315	765.5	429.30	0.5580	3.0560	3.0	758.95	0.9878
0.8400	799.8	435.95	0.5674	3.1320	5.0	759.25	0.9882
0.8600	815.2	452.10	0.5884	3.1560	18.0	759.53	0.9886
0.8800	778.3	468.04	0.6092	3.2040	1.2	759.99	0.9892
0.9050	630.4	485.65	0.6321	3.2450	3.0	760.08	0.9893
0.9150	565.2	491.62	0.6399	3.3170	12.0	760.62	0.9900
0.9250	586.4	497.38	0.6474	3.3440	3.0	760.82	0.9902
0.9300	348.1	499.72	0.6504	3.4500	12.2	761.62	0.9913
0.9370	224.2	501.72	0.6530	3.5730	11.0	763.05	0.9932
0.9480	271.4	504.45	0.6566	3.7650	9.0	764.97	0.9957
0.9650	451.2	510.59	0.6646	4.0450	6.9	767.20	0.9986
				>4.0450		768.31	1.0000

turbidity used corresponds to a sea-level meteorological range of 23 km.

X1.3 The standard data presented here was generated for a solar zenith angle of 48.19° (AM 1.5) and computed for an

atmosphere with a composition that is estimated to be a reasonable average for the 48 contiguous states of the United States over a period of a year.

X2. COMPUTATIONAL TECHNIQUE FOR TABULATED VALUES DERIVED FROM THE SPECTRAL IRRADIANCE

X2.1 Integrated Irradiance

X2.1.1 The integrated irradiance values $E_{0-\lambda}$ presented in column 4 and used in column 5 of Table 1 were computed using a modified trapezoidal integration technique. More specifically

$$E_{0-\lambda} = E_{0-\lambda_1} + \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{E_{\lambda_{j+1}} + E_{\lambda_j}}{2} \right) \Delta\lambda_j$$

where:

$$\Delta\lambda_j = \lambda_{j+1} - \lambda_j$$

$E_{0-\lambda_1}$ is the contribution prior to the first tabulated wavelength. This is estimated as half of the first trapezoidal interval as:

$$E_{0-\lambda_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{\lambda_2} + E_{\lambda_1}}{2} \right) (\lambda_2 - \lambda_1)$$

Similarly, $E_{\lambda_N-\infty}$, the total irradiance beyond the last tabu-

lated wavelength λ_N is estimated as

$$E_{\lambda_N-\infty} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{\lambda_N} + E_{\lambda_{N-1}}}{2} \right) (\lambda_N - \lambda_{N-1})$$

Leading to an expression for the solar irradiance,

$$E_{0-\infty} = E_{0-\lambda_N} + E_{\lambda_N-\infty}$$

X2.2 Selected Ordinates

X2.2.1 Wavelength values were derived for the selected ordinates by an area interpolation procedure. The selected ordinate wavelength was derived from:

$$F_k = F_{i+1} - \frac{\Delta F}{\Delta \lambda_i} \Delta \lambda_k$$

where:

$$F_i = E_{0-\lambda_i} / E_{0-\infty}$$

23 KM VIS RURAL AEROSOL (ALB=.2, AM1.5)

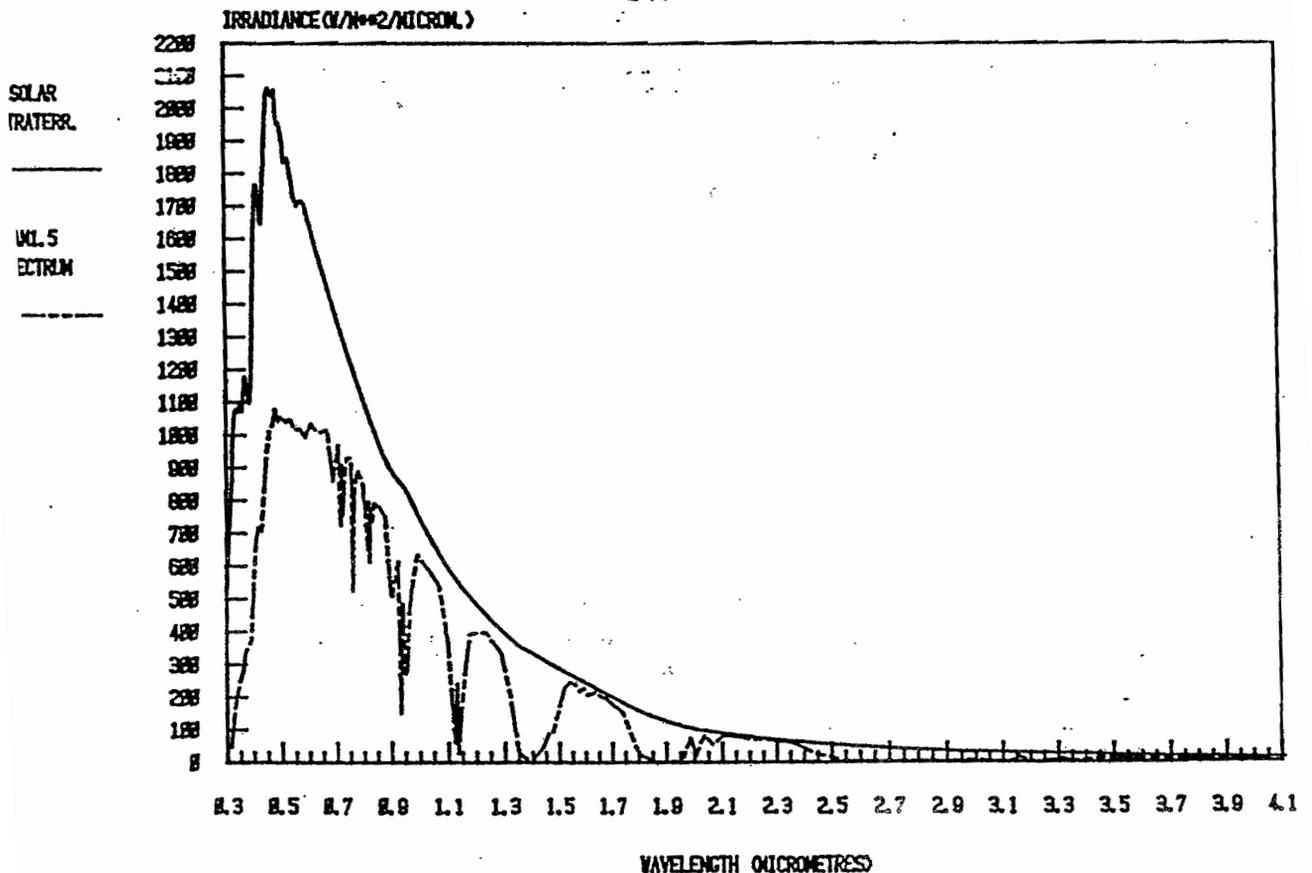


FIG. X3 Plot of Direct Normal Irradiance-USSTD Atmosphere

E 891

$\lambda_k = \lambda_{i+1} - \lambda_i$ and
 $F_i < F_k < F_{i+1}$.

Compute λ_k (the wavelength at midpoint of the equal energy interval) from the following equation:

$$\lambda_k = \lambda_i + \left[\frac{E_{0-\lambda_k} - E_{0-\lambda_i}}{E_{0-\lambda_{i+1}} - E_{0-\lambda_i}} \right] (\lambda_{i+1} - \lambda_i)$$

where:

$$\lambda_i < \lambda_k < \lambda_{i+1}, \text{ and } E_{0-\lambda_k} = F_k E_{0-\lambda_i}$$

The value of F_k appropriate for the k_{th} selected ordinate given by $F_k = (2K - 1)/2m$.

where:

m = number of elected ordinate points desired (50, or 100)

REFERENCES

- 1) Neckel and Labs, Extraterrestrial Spectrum Provided by Fröhlich, C. and Wehrli, C., World Radiation Center, Davos, Switzerland. (Personal Communication with Richard Bird, Solar Energy Research Institute, Golden, CO, 1981.)
- 2) Neckel, H. and Labs, D., Improved Data of Solar Spectral Irradiance From 0.33 to 1.25 μm , Solar Physics, Vol 74, 1981.
- 3) Bird, R. E. and Hulstrom, R. L., "Application of Monte Carlo Techniques to Isolation Characterization and Prediction," Solar Energy Research Institute, July 1979.
- 4) Collins, D. G., Blattner, W. G., Wells, M. B., and Horak, H. G., "Backward Monte Carlo Calculations of Polarization Characteristics of the Radiation Emerging from Spherical-Shell Atmospheres," *Applied Optics*, Vol 11, November 1972, pp. 2684-2696.
- 5) McClatchey, R. A., Fenn, R. W., Selby, J. E. A., Volz, F. E., and Garing, J. S., "Optical Properties of the Atmosphere (Third Edition)," Air Force Cambridge Research Laboratories, August 1972.
- 6) Shettle, E. P. and Fenn, R. W., "Models of Atmospheric Aerosols and Their Optical Properties," AGARD Conference Proceedings No. 183, *Electromagnetic Wave Propagation Panel Symposium*, Lyngby, Denmark, Oct. 27-31, 1975.
- 7) Selby, J. E. A., Kneizys, F. X., Chetwynd, J. H., and McClatchey, R. A., "Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 4," Air Force Geophysics Laboratory, Feb. 28, 1976.
- 8) Selby, J. E. A., Shettle, E. P., and McClatchey, R. A., "Atmospheric Transmittance From 0.25 to 28.5 μm : Supplement LOWTRAN 3B (1976)," Air Force Geophysics Laboratory, N 1, 1976.
- 9) Fröhlich, C., "Photometry and Solar Radiation," Presented at Annual Meeting of Schweiz. Gesellschaft für Astrophysik, Astronomie, Nov. 1, 1980.
- 10) J. Hardrop, "The Sun Among the Stars—III," Solar Distribution 16 Northern G-Type Stars and Solar Flux Calibration, *Astronomy and Astrophysics*, Vol 91, 1980.
- 11) R. E. Bird, R. L. Hulstrom, and L. J. Lewis, "Terrestrial Solar Spectral Data Sets," *Solar Energy*, Vol 30, 1983.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials¹

This standard is issued under the fixed designation G 7; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

Scope

1.1 This practice covers procedures to be followed for direct exposure of nonmetallic materials to the environment. When originators of a weathering test have the actual exposure conducted by a separate agency, the specific conditions for the exposure of test and control specimens should be clearly defined and mutually agreed upon between parties.

1.2 For exposures behind glass, refer to Practice G 24.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The inch-pound units given in parentheses are for information only.

1.4 This practice is technically equivalent to the parts of ISO 877 that describe direct exposures of specimens to the environment.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

Referenced Documents

ASTM Standards:

1 Terminology Relating to Conditioning²

24 Test Method for Transfer of Calibration from Reference to Field Pyranometers³

33 Test Method for Calibration of Reference Pyranometers with Axis Vertical by the Shading Method³

41 Test Method for Calibration of Reference Pyranometers with Axis Tilted by the Shading Method³

Practice for Conducting Exposures to Daylight Filtered Through Glass²

Terminology Relating to Natural and Artificial Weathering Tests of Nonmetallic Materials²

ASTM Adjunct:

Test Rack⁴

ISO Standards:

ISO 877 Plastics—Methods of Exposure to Direct Weathering; to Weathering Using Glass-Filtered Daylight, and to Intensified Weathering by Daylight Using Fresnel Mirrors⁵

3. Terminology

3.1 *Definitions*—The definitions given in Terminology E 41 and Terminology G 113 are applicable to this practice.

4. Significance and Use

4.1 The relative durability of materials in natural exposures can be very different depending on the location of the exposure because of differences in ultraviolet (UV) radiation, time of wetness, temperature, pollutants, and other factors. Therefore, it cannot be assumed that results from one exposure in a single location will be useful for determining relative durability in a different location. Exposures in several locations with different climates which represent a broad range of anticipated service conditions are recommended.

4.2 Because of year-to-year climatological variations, results from a single exposure test cannot be used to predict the absolute rate at which a material degrades. Several years of repeat exposures are needed to get an "average" test result for a given location.

4.3 Solar ultraviolet radiation varies considerably as a function of time of year. This can cause large differences in the apparent rate of degradation in many polymers. Comparing results for materials exposed for short periods (less than one year) is not recommended unless materials are exposed at the same time in the same location.

4.4 Exposure periods may be defined in terms of total solar or solar-ultraviolet radiant energy, or both. This can reduce variability in results from separate exposures. However, an inherent limitation in solar-radiation measurements is that they do not reflect the effects of temperature and moisture, which are often as important as solar radiation.

4.5 The design of the exposure rack, the location of the specimen on the exposure rack, and the type or color of adjacent specimens can affect specimen temperature and time of wetness. In order to minimize variability caused by these factors, it is recommended that test specimens, control specimens, and any applicable weathering reference material be placed on a single test panel or on test panels placed adjacent to each other during exposure.

4.6 It is strongly recommended that at least one control

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G-3 on Durability of Nonmetallic Materials and is the direct responsibility of Subcommittee G03.02 on Environmental Testing.

² Edition approved Dec. 10, 1996. Published February 1997. Originally G 7 - 69T. Last previous edition G 7 - 89.

³ Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁴ Book of ASTM Standards, Vol 12.02.

⁵ Available from ASTM Headquarters, 100 Barr Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428.

⁵ Available from the American National Standards Institute (ANSI), 1430 Broadway, New York, NY 10018.

material be part of any exposure evaluation. The control material should meet the requirements of Terminology G 113, and should be of similar composition and construction compared to test specimens. It is preferable to use two control materials, one with relatively good durability and one with relatively poor durability. Unless otherwise specified, use at least two replicate specimens of each test and control material being exposed. Control materials included as part of a test shall be used for the purpose of comparing the performance of test materials relative to the controls.

5. Test Sites, Location of Test Fixtures, and Exposure Orientation

5.1 Test Sites—Exposures can be conducted in any type of climate. However, in order to get more rapid indications of outdoor durability, exposures are often conducted in locations that receive high levels of solar radiation, temperature, and moisture. Typically, these conditions are found in hot desert and subtropical or tropical climates. Known attributes of the use environment should be represented by the locations selected for outdoor durability evaluation. For example, if the use environment for the product being evaluated will include freeze/thaw cycling, specimen exposure in a northern temperature climate is recommended. In addition, exposures are often conducted in areas where specimens are subjected to salt air (seashore) or industrial pollutants.

5.1.1 Unless otherwise specified, test fixtures or racks shall be located in cleared areas. The area beneath and in the vicinity of the test fixtures should be characterized by low vegetation and by ground cover typical of the climatological area where the exposures are being conducted. In desert areas, the ground is often gravel to control dust and in most temperate areas, the ground cover should be low-cut grass. The type of ground cover at the exposure site shall be stated in the test report. If test fixtures are placed on a slope, specimens may be subjected to different environmental conditions than at ground level. These differences affect test results.

The lowest row of specimens on a test fixture or rack shall be positioned at a height above the ground to avoid contact with vegetation and to prevent damage that might occur during area maintenance. A minimum height of 0.45 in. (11.5 mm) above the ground is recommended.

Test fixtures shall be placed in a location so that there is no shadow on any specimen when the sun's angle of elevation is greater than 20°.

Exposure Orientation—Unless otherwise specified, test racks shall be oriented so that specimens face the sun. Specimens can be exposed at a number of different orientations or "exposure angles" in order to simulate different conditions of the material being evaluated. Typical exposure angles are as follows:

Latitude Angle—Exposure rack is positioned so that the top surface of specimens are at an angle from the horizontal that is equal to the geographical latitude of the site.

45°—Exposure rack is positioned so that the specimens are at an angle of 45° from the horizontal. This is the most commonly used exposure orientation.

90°—Exposure rack is positioned so that the ex-

posed specimens are at an angle of 90° from the horizontal.

5.4.4 5°—Exposure rack is positioned so that the exposed specimens are at an angle of 5° from the horizontal. This angle is preferred over horizontal exposure to avoid standing water on specimens being exposed. This exposure orientation typically receives the highest levels of solar radiation during mid-summer and is used to test materials that would normally be used in horizontal or nearly horizontal applications.

NOTE—Exposure angles which are less than the site latitude typically receive more ultraviolet radiation in climates with diffuse sky conditions.

5.4.5 Any other angle that is mutually agreed on by interested parties may be used. In some instances, exposure facing directly away from the equator or some other specific direction may be desired. The test report shall contain the exact angle and specimen orientation of any exposure condition outside of those described in 5.4.1 through 5.4.4.

5.5 Specimen Backing—Three types of specimen backing can be used. Comparisons between materials should only be made with exposures conducted with the same specimen backing.

5.5.1 Unbacked Exposures—Specimens are exposed so that the portion of the test specimen being evaluated is subjected to the effects of the weather on all sides.

5.5.2 Backed Exposures—Specimens are attached to a solid substrate so that only the front surface is exposed. Surface temperatures of specimens in backed exposures will be higher than for specimens subjected to unbacked exposures. In some cases, the substrate is painted black, which produces significant differences in surface temperature compared to exposures conducted on unpainted substrate. This can cause large differences in degradation rates when compared to backed exposures conducted on unpainted substrates.

5.5.3 Black Box Exposure—Specimens are attached to the front face of a black painted aluminum box (see 6.2.3). The specimens form the top surface of the box. If there are not enough test specimens to completely cover the top surface, the open areas shall be filled with black painted sheet metal panels so that the box is completely closed.

6. Construction of Test Fixtures (Exposure Racks)

6.1 Materials of Construction—All materials used for test fixtures shall be noncorrodible without surface treatment. Aluminum Alloys 6061T6 or 6063T6 have been found suitable for use in most locations. Properly primed and coated steel is suitable for use in desert areas. Monel has been found suitable in highly corrosive areas. Untreated wood is acceptable in desert areas but may pose maintenance problems in other areas. (See Fig. 3.)

6.1.1 For backed exposures (see 6.2.2 and Fig. 4), use exterior-grade plywood to form a solid surface to which specimens are directly attached. Replace the plywood when there is any evidence of delamination or fiber separation. Medium-density overlay (MDO) or high-density overlay (HDO) plywood are satisfactory substrates and require less frequent replacement than plywood with no overlay. The edges of the plywood should be sealed with a durable paint to prevent delamination.

6.2 Test Fixture Design—Test racks shall be constructed

G 7

to hold specimens or specimen holders of any convenient width and length. Racks shall be constructed so that any contamination from specimens higher on the fixture cannot fall down onto specimens in lower positions. Test racks could be designed to provide backed or unbacked exposures, whichever best simulates end-use conditions.⁶

6.2.1 Unbacked Exposures—Test racks shall be constructed so that most of the test specimen is exposed to the effects of the weather on all sides. Specimens are attached to the test fixture at the top or bottom, or both, using clamping devices, properly spaced slots, or mechanical fasteners. The method of attachment shall not prevent expansion and contraction of specimens caused by temperature or moisture. Clamping or fastening devices for attaching specimens to the test fixture shall be made of a material that will not corrode or degrade and contaminate the specimens. Aluminum, properly galvanized steel, or stainless steel fasteners are recommended.

6.2.2 Backed (Insulated) Exposures—Test racks shall be constructed so that specimens are attached to a plywood substrate. The thickness of the plywood and type of coating shall be agreed upon by all interested parties and must be reported.

6.2.3 Black Box Exposures—An aluminum box 0.23 m (9 in) deep with the outside surface painted black. The top surface is open and fitted with mounting strips to hold specimens firmly in place. Two types of black boxes are in common usage. One measures approximately 1.5 m (5 ft) long and 1.8 m (6 ft) wide and the other measures 1.7 m (5.5 ft) long and 3.7 m (12 ft) wide. Figure 1 shows the design and dimensions for an acceptable black box. Figure 2 shows a black box in use.

Instrumentation^{7,8,9}

Instruments for determining climatological data during the exposure period should be operated in the immediate vicinity of the test racks. Data obtained shall be reported if requested as part of the results of a test.

Instruments for recording the following are recommended:

Ambient Temperature (Daily Maximum and Minimum)—Instruments used for recording ambient temperature shall include a thermocouple (Type T or J), a thermistor, or a resistance temperature device (RTD). Any instrument used shall have a calibration traceable to the National Institute for Standards and Technology (NIST) and must be calibrated no less than every twelve months. Instruments shall be housed inside a white ventilated enclosure.

Relative Humidity (Daily Maximum and Minimum)—Instruments used for recording relative humidity shall have a calibration traceable to NIST. Instruments shall be housed inside a white ventilated enclosure.

⁶ Drawings for an acceptable test rack may be obtained from ASTM Request Adjunct No. 12-700070-00. For further information on instrumentation, see either *Symposium on Instrumentation*, ASTM STP 133, or Sereda, P. J., "Measurement of Solar Radiation," *ASTM Bulletin*, No. 228, 1959, pp. 61-63.

⁷ *Meteorological Instruments and Methods of Observation*, 5th ed., Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, 1957.

⁸ Calibrations can usually be obtained from the manufacturer of the instrument.

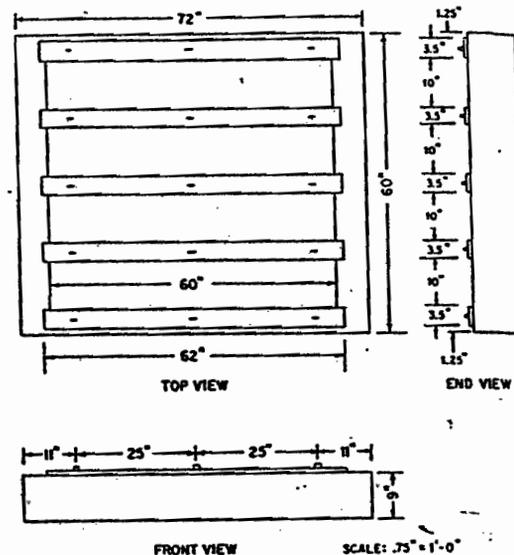


FIG. 1 Black Box

7.2.3 Total Solar Radiation—For measurement of total solar radiation, use a pyranometer meeting either WMO First Class or Second Class specification. Calibrate the pyranometer at the tilt-angle at which it will be used in suitable radiometric units, preferably in watts per square metre per volt ($\text{Wm}^{-2}\text{V}^{-1}$). Calibrate the pyranometer against an instrument traceable to the WRR (World Radiometric Reference) at least annually. Perform this comparison either by comparison to a suitable reference pyranometer in accordance with Test Method E 824 or by the direct shading disk calibration in accordance with Test Method E 941 (for axis vertical and tilted respectively). If at tilt calibrations are not available, correct for tilt angle effects in accordance with the instructions provided by the radiometer manufacturer. If requested, a certificate of calibration shall be provided with all total solar irradiance measurements.

7.2.4 Total Solar Ultraviolet Radiation—For measurement of total solar ultraviolet radiation, use a radiometer that measures ultraviolet radiation in the wavelength region from 300 to 385 nm. The total solar ultraviolet radiometer shall be calibrated against a standard source of spectral irradiance traceable to NIST, or other national standards laboratory, at least annually. The calibration shall be in suitable radiometric units, preferably in watts per square metre per volt ($\text{Wm}^{-2}\text{V}^{-1}$). If requested, a certificate of calibration shall be provided with all total solar ultraviolet irradiance measurements.

7.2.5 Narrow-Band Solar Ultraviolet Radiation—Narrow-band radiometers can be used to measure specific wavelength bands of solar ultraviolet radiation. Unless otherwise specified, (for example, when measuring solar UV radiation with a wavelength greater than 315 nm), narrow-band UV radiometers shall, when used to time or monitor outdoor exposure testing, have response functions in the UV-B region defined as 280 to 315 nm. The narrow-band radiometers shall be calibrated against a standard source of spectral irradiance at least annually. The calibration shall be in

G 7

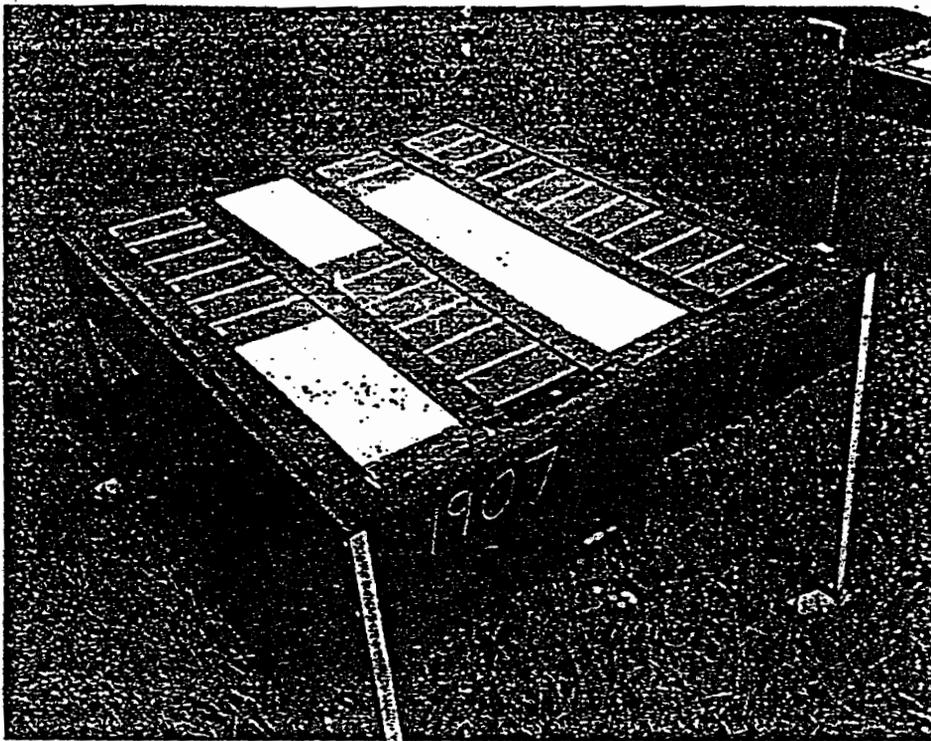


FIG. 2 · Black Box In Use

ble radiometric units, preferably in watts per square meter per volt ($\text{Wm}^{-2}\text{V}^{-1}$). If requested, a certificate of radiation shall be provided with all narrow band solar violet irradiance measurements.

Procedure

Prepare test specimens according to standards or procedures relevant to the materials being evaluated. Identify each specimen with a unique mark that will not be destroyed or become illegible during the exposure.

If nondestructive testing is used, measure the desired properties on all test and reference and control specimens before exposure. If destructive testing is done, measure the value of the desired property on a separate set of specimens. If destructive tests are used, separate sets of specimens should be used for each exposure period desired.

Select one of the following methods for defining the duration of exposure:

Calendar Basis—Expose specimens for a specified number of days, months, or years. The report shall indicate the exact dates of the exposure.

Radiant Exposure Basis—Expose specimens until a specified level of solar radiant exposure has been achieved. Spherical radiation measurements (direct plus scattered radiation) as the basis for determining the radiant exposure. The wavelength region in which the solar energy is measured must be specified. The instruments used to measure radiant energy shall meet the requirements of 7.2.3 and 7.2.5. The report shall indicate the radiant energy, the wavelength region in which it was measured, and exact dates, if applicable, of the exposure.

Deterioration Basis—Expose specimens until a

specified physical change has occurred. Examples are degree of shrinkage, color change, blistering, gloss loss, or loss of strength. The report shall indicate the property used as a basis for defining the exposure, the method used to measure the property, the initial and final values of the desired property, and the exact dates of the exposure.

8.3.4 Based on Property Change in Weathering Reference Material—With this procedure, a weathering reference material shall be exposed with the test specimens. Expose until a specified change has occurred in the weathering reference material. The report shall describe the weathering reference material used, the property used as a basis for defining the exposure, the method used to measure the property, the initial and final values of the measured property of the weathering reference material, and the exact dates of the exposure.

9. Report

9.1 Report the following information with any reference to exposures conducted according to this practice:

9.1.1 Complete description of the test specimens and any control materials used, including:

9.1.1.1 Composition, including description of substrate to which specimens such as paints, coatings, graphic tapes, and so forth, are applied, and

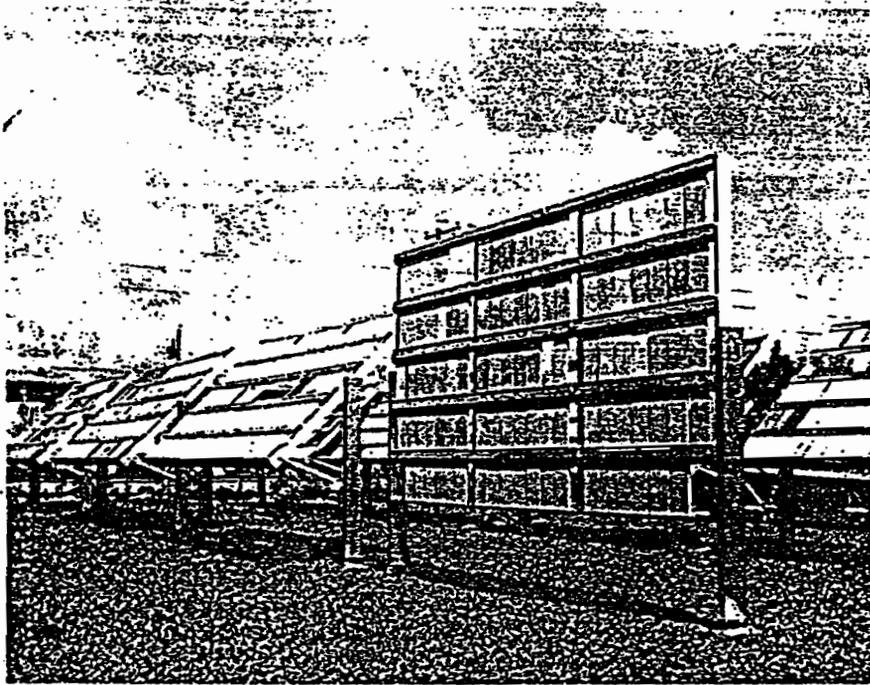
9.1.1.2 Method of preparation (reference applicable standards here),

9.1.2 Location of exposure (including whether specimens were exposed at ground level, on a rooftop, and so forth),

9.1.3 Ground cover in area of test racks,

9.1.4 Angle at which exposure conducted,

G 7



NOTE—Detailed drawings of this test rack may be obtained from ASTM Headquarters, 100 Barr Harbor Dr., W. Conshohocken, PA 19428. Request Adjunct No. 0070-00.

FIG. 3 Typical Exposure Rack

7.1.5 Type of exposure (unbacked, backed, or black box). If backed exposure is used, include thickness and type of backing and, if painted, the color of paint used.

7.1.6 Date exposure started and date exposure completed.

7.1.7 If required, solar radiant exposure determined according to 7.2.3 through 7.2.5, including wavelength in micrometers and radiant energy measured. If required, include a

certificate of calibration for the radiometer used, with this information, and

9.1.8 If used, details of any specimen treatment such as washing conducted during the exposure. This shall include description of the treatment used and the frequency of treatment.

9.1.9 If required, the following climate information:

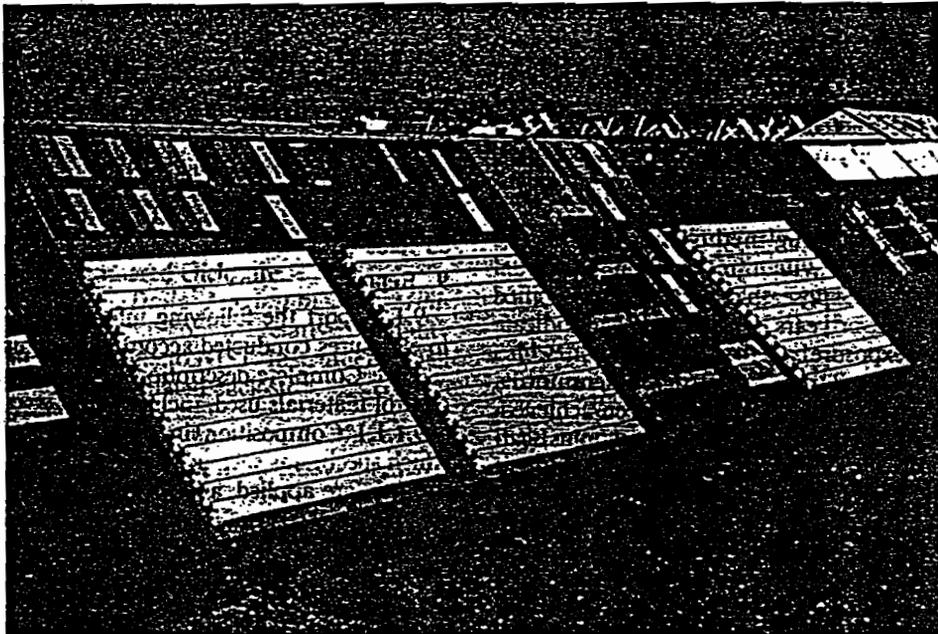


FIG. 4 Backed Exposure Rack

90117 5 1

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

Designation: G 53 - 96

Standard Practice for Operating Light- and Water-Exposure Apparatus (Fluorescent UV-Condensation Type) for Exposure of Nonmetallic Materials¹

This standard is issued under the fixed designation G 53; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

pe

This practice covers the basic principles and operating procedures for using fluorescent ultraviolet (UV) and condensation apparatus to simulate the deterioration caused by light and water as rain or dew.

This practice is limited to the method of obtaining, installing, and controlling the conditions and procedures of use. It does not specify the exposure conditions best for the material to be tested. Specimen preparation and evaluation of the results are covered in ASTM test methods or specifications for specific materials.

The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

Referenced Documents

ASTM Standards:

Method for Calibration of Thermocouples by Comparison Techniques²

Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method³

Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials⁴

IEEE Standard:

Recommendations for the Integrated Irradiance and Spectral Distribution of Simulated Solar Radiation for Testing Purposes⁵

Terminology

Description of Terms Specific to This Standard:

Irradiance—the radiation incident on a surface in W/m^2 . Irradiance is the total of the incident radiation at all wavelengths. Forty watt fluorescent lamps of

the UV-B and UV-A types generate similar amounts of irradiance. However, since this irradiance is distributed over different wavelengths, the photochemical effects caused by these different lamps vary greatly. Therefore, irradiance should not be used to compare UV light sources.

3.1.2 spectral irradiance—distribution of irradiance as a function of wavelength. It is expressed in W/m^2 per wavelength band. The spectral irradiance of sunlight is often shown as W/m^2 per 10 nm band. The spectral irradiance of fluorescent UV lamps should be shown in bands 1 or 2 nm wide. Spectral irradiance is the proper method for comparing light sources with different energy distributions.

3.1.3 spectral energy distribution (SED)—general term for the characterization of the amount of radiation present at each wavelength. SEDs can be expressed by power in watts or irradiance in W/m^2 , or energy in joules. The shape of the SED would be identical in all of these units. Fluorescent lamps are frequently described by relative SEDs which show the amount of radiation at each wavelength as a percentage of the amount of radiation at the peak wavelength. Figure 1 is a relative SED.

3.1.4 ultraviolet regions—CIE Publication No. 20 (1972) divides the ultraviolet spectrum into three regions: UV-A, radiation in wavelengths between 315 nm and 400 nm; UV-B, radiation in wavelengths between 280 nm and 315 nm; and UV-C, radiation in wavelengths shorter than 280 nm.

3.1.5 fluorescent UV lamp—lamp in which radiation at 254 nm from a low-pressure mercury arc is transformed to longer wavelength UV by a phosphor. The spectral energy distribution of a fluorescent UV lamp is determined by the

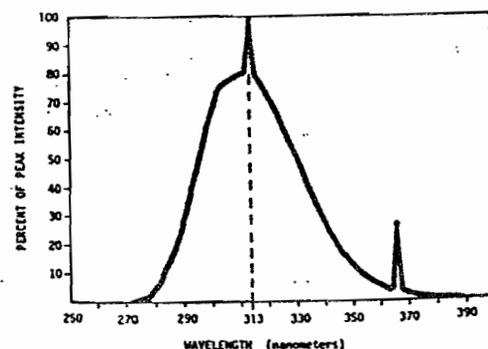


FIG. 1 Typical Relative SED of UV-B Lamp

This standard is under the jurisdiction of ASTM Committee G-3 on Durability of Materials, and is the direct responsibility of Subcommittee G03.03 on Controlled Environmental Tests.

Revision approved Jan. 10, 1996. Published April 1996. Originally approved as G 53-77. Last previous edition G 53-95.

Replaces ASTM Standards, Vol 14.03.

Replaces ASTM Standards, Vol 14.02.

Replaces ASTM Standards, Vol 06.01.

ASTM International, U.S. National Committee, CIE, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.

ion spectrum of the phosphor and the UV transmission glass tube.

Summary of Practice

Specimens are alternately exposed to ultraviolet light and to condensation alone in a repetitive cycle. The UV source is an array of fluorescent lamps, with emission concentrated in the UV range.

Condensation is produced by exposing the test surface to a saturated mixture of air and water vapor, while the reverse side of the test specimen is exposed to the cooling effect of ambient room air.

The exposure condition may be varied by selection of fluorescent UV lamp; the timing of the UV and condensation exposure; the temperature of UV exposure; the temperature of condensation exposure and, in the apparatus; the irradiance level.

Significance and Use

The use of the apparatus under this practice is to simulate the deterioration caused by water as well as the ultraviolet energy in sunlight. It is not to simulate the deterioration caused by localized phenomena, such as atmospheric pollution, biological, and salt water exposure.

Variation in results may be expected when operating conditions are varied within the accepted limits of this practice. Therefore, no reference shall be made to results of this practice unless accompanied by a report of the specific operating conditions in conformance with 11.

A report correlating results from use of this practice with a period of natural weathering shall specify in detail the conditions of natural exposure, since sunlight and its effects upon materials exposed to the weather will vary from year to year and also vary with location, latitude, time of day, temperature, proximity to water sources, etc.

Practice G 7 lists the information required to describe a test method of outdoor exposure.

Relationships established and reported in conformance with 5.3 shall not be extrapolated to other test methods permitted by this practice, to other conditions of exposure, or to materials other than those tested.

5

Chamber. The apparatus employed constructed of corrosion-resistant materials enclosing eight fluorescent lamps, a heated water pan, test specimen racks, and a controller for controlling and indicating operating times and shall conform to either Type A or Type B (see 6.1) of the irradiance level.

A⁶. An exposure apparatus where the lamps are mounted in two banks of four lamps each as shown in Fig. 2. Lamps in each bank shall be mounted parallel to each other on 70 mm centers.

Test specimens shall be mounted in stationary

⁶ Lamps from Q-Panel Co., 26200 First St., Cleveland, OH and the Electric Devices Co., 4114 N. Ravenswood Ave., Chicago, IL, have been found satisfactory.

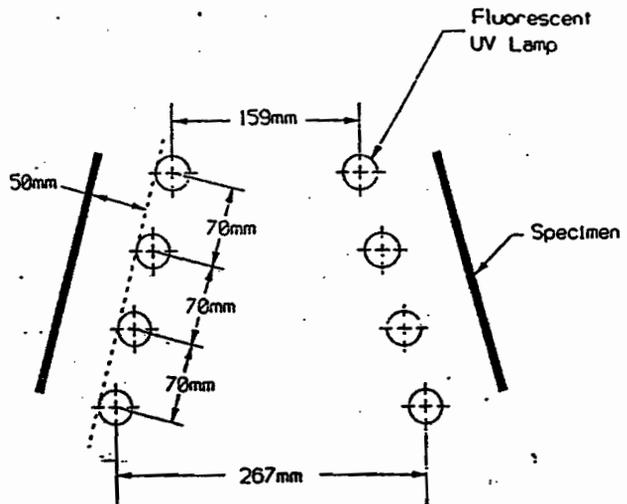
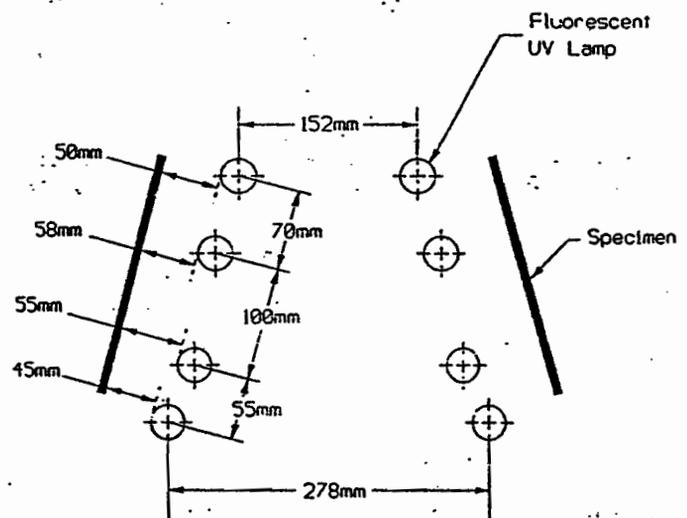


FIG. 2 Lamp Placement Schematic—Type A Exposure Apparatus Cross Section



NOTE—Enclosure for apparatus not shown in Figs. 2 and 3.

FIG. 3 Lamp Placement Schematic—Type B Exposure Apparatus Cross Section

specimen racks with the plane of the test surface parallel to the plane of the lamps at a distance of 50 mm from the nearest surface of the lamps, as shown in Fig. 2.

6.1.2 Type B⁷: An exposure apparatus, as shown in Fig. 3, which is equipped with a radiometer and readout device capable of measuring and controlling the amount of radiant exposure received by the test specimens.

6.1.2.1 The lamps shall be mounted in two bands of four lamps each as shown in Fig. 3.

6.1.2.2 The distance between the test specimen and the light source varies, depending upon where in the sample mounting area the specimen is placed.

6.2 Lamps, shall be medium bipin fluorescent UV lamps with a length of 1220 mm, and a nominal rating of 40 W

⁷ Apparatus and lamps from Suga Test Instruments Co. Ltd. 4-14 Shinjuku 5-chome, Shinjuku-ku, Tokyo, 160, Japan, have been found satisfactory.

Calibration and Standardization

The thermometer or thermocouple which indicates temperature shall be calibrated by immersing the sensing element and a liquid-in-glass thermometer in water heated to approximately 70°C and comparing the two temperatures as noted in E 220.

The formation of condensation may be observed by clear glass or plastic blanks in the specimen holders or the large sheet of plastic may also be used for this purpose. The condensate that forms on a given area during a period of condensation may be collected and then measured. The fading and other changes caused by the fluorescent lamps may be observed by exposing lightfastness test in the apparatus using UV alone without condensation.

The AATCC Blue Wool Lightfastness reference standards⁷ may be used to measure the changes caused by the L2 Blue Wool has been found satisfactory for fluorescent UV lamps.

Other lightfastness reference materials may be used for calibration.

Reference standards for calibrating the operation of the apparatus in alternate exposure to UV light and condensation may be prepared from painted metal, plastics, or other materials.

Painted metal specimens produced by the coil-coating process have been found suitable for such reference standards.

In addition, for Type B apparatus, the irradiance measurement system shall be calibrated to the manufacturer's specifications once a year. The radiometer shall be recalibrated annually using fluorescent UV lamps having a different spectral power distribution.

Operation

Insert the test specimens in the specimen racks with the faces facing the lamp. When the test specimens do not completely fill the racks, fill the empty spaces with blank material to maintain the test conditions within the chamber. Operate the apparatus under the selected test conditions. Operate continuously through the cycle, except for servicing the instrumentation of specimens.

Under these test conditions may be used. If no conditions are specified, the following cycle and temperatures are recommended: 4 h UV at 60°C, 4 h Condensation at 50°C.

Earlier versions of this practice recommended a condensation temperature of 40°C in 9.3. When operating in room conditions in compliance with those set forth in 6.10, a 40°C condensation temperature will result in inadequate condensation. Therefore, a 50°C condensation temperature is now suggested.

The test temperature that can be maintained within the limits specified in 6.9.1 and 6.9.2 may be used. UV test temperatures of 50°C, 60°C, and 70°C are widely used. A test temperature of 50°C is commonly used. The following time cycles are widely used: 4 h UV/4 h CON, 3 h UV/4 hr CON. Use UV and condensation for at least 2-h duration to allow sufficient time to stabilize the specimen.

The severity of the UV exposure is influenced by test conditions and time cycles. Photochemical reaction begins when the UV lamps are turned on. The rate of UV exposure is proportional to the time of UV exposure or

the temperature of UV exposure, or both. UV exposures at temperatures higher than those expected in the service environment can cause abnormal thermal degradation.

9.3.4 Water reactions during condensation exposure are affected by the permeability of the specimen and require time to initiate. The rate of water degradation is increased by increased temperature. However, long hot condensation exposures can cause abnormal degradation. Four-hour condensation exposures are often used for paints on metals, while condensation exposures of 20 h duration may be used on wood.

9.4 Maintenance—Periodic maintenance is required to maintain uniform exposure conditions.

9.4.1 Control of Irradiance—Because fluorescent UV lamps, like all gas discharge lamps, have a progressive drop in radiation output with continued use, provision shall be made to compensate for lamp aging.

9.4.1.1 Type A—After 400 to 450 h of lamp operating time, replace one lamp in each bank of lamps, and rotate the other lamps as shown in Fig. 5. This procedure provides a useful lamp life of 1600 to 1800 h.

9.4.1.2 Type B: operate the apparatus using the irradiance level of 20 W/sq. m (270 nm – 700 nm) which is equivalent to Type A apparatus. For other lamps having different spectral power distributions, the equivalent irradiance level can be obtained from the manufacturer. Other irradiance levels specified upon agreement between concerned parties may be used. Provision is made in the apparatus to compensate for lamp aging.

9.4.1.3 To ensure uniform irradiation, pre-aged lamps must be used in the apparatus. Such lamps shall be supplied by the manufacturer.

9.4.1.4 Discard and replace all eight lamps simultaneously after 1600 hours of light-on time. If the lamps are operated at a higher irradiance level than recommended by the manufacturer, the lamp life will be shortened.

9.4.2 Drain water and clean water pan when conducting lamp replacement and rotation procedure. Scum on the top of the water can inhibit water vaporization.

9.5 Sample Rotation—The samples' positions within the test area should be rotated on a regular basis in order to minimize any effects from horizontal or vertical variations in UV or temperature. The sample rotation sequence should provide that all samples spend approximately the same

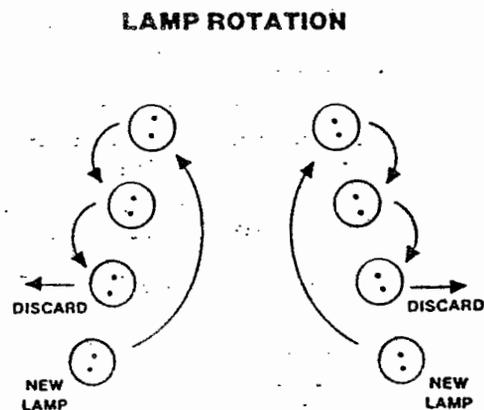


FIG. 5 Lamp Rotation

ASTM G 53

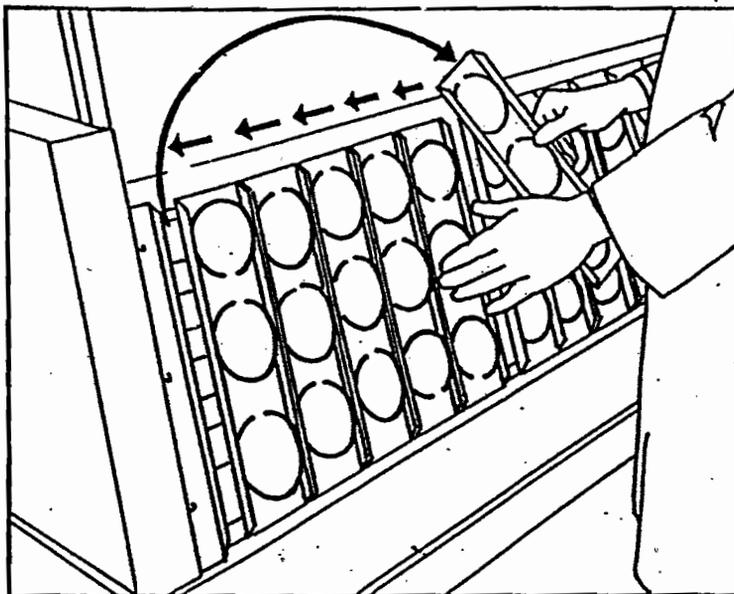


FIG. 6 Daily Horizontal Sample Rotation

...ent of exposure time near the center of the exposure and near the edges of the exposure area. The following sequence is recommended:

1. *Horizontal Rotation*—Once a day rotate the extreme left hand and extreme right hand samples into the center as shown in Fig. 6.

2. *Vertical Rotation*—Rotate the samples vertically so that each sample spends the same amount of exposure time in each vertical position in the sample holder. For instance, if samples are stacked vertically in each sample holder, the top and bottom sample should switch places periodically through the test method. If four samples are stacked vertically, then the samples should be repositioned vertically

three times during the test method.

9.5.3 Other sample rotation sequences may be used in agreement.

9.6 Inspect specimens daily in tests with a length of week or less. Tests for longer periods should be inspected weekly.

9.6.1 A permanent record of degradation at various times may be obtained by using three replicate specimens and removing the replicates sequentially at intervals equal to one third of the test length.

9.7 Conclude the test when either a mutually agreed-upon number of total test hours or a mutually agreed-upon change has occurred in the test specimen or a standard test spe

REPORT FORM ASTM PRACTICE G-53 FLUORESCENT-UV / CONDENSATION TEST
 TEST No.: _____ Date: _____ By: _____

APPARATUS Type and Model			TEST TIME _____ hrs.	
LAMP	MANUFACTURER	TYPE	PEAK EMISSION _____ nm	LOW CUT-OFF (1% of peak) _____ nm
CYCLE _____ hrs UV at _____ °C. / _____ hrs COND at _____ °C.				
SPECIAL TEST CONDITIONS				
START DATE:	END DATE:	TIMER HRS. START	TIMER HRS. STOP	LAMP SERVICE at _____ hrs.
SPECIMEN SIZE			Rotated <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No	
MATERIAL				
PROPERTIES TO BE MEASURED		MEASURING PROCEDURE (ASTM Spec., etc.)		
1. _____				
2. _____				
3. _____				

FIG. 7 Sample Report Form

G 53

For convenience in inspecting and concluding tests during normal working hours, the following test durations are recommended:

96 h = 4 days	672 h = 4 weeks
168 h = 1 week	1008 h = 6 weeks
336 h = 2 weeks	1512 h = 9 weeks
504 h = 3 weeks	2016 h = 12 weeks

Interpretation of Results

0.1 This practice is intended to simulate the deterioration caused by natural weathering. However, the rate of radiation in natural weathering varies from year to year. Laboratory accelerated weathering is more consistent in rate. Therefore, in comparing natural and laboratory weathering should not attempt to predict the number of hours of laboratory exposure that might equal a year of natural weathering. Even if the details of the natural exposure are reported as required by 5.3, any time to time comparison would apply only to a given year at a particular site.

2 It is possible to correlate the deterioration resulting a period of natural weathering, such as 1 year, to the deterioration resulting from a period of laboratory accelerated weathering. Spearman rank correlation, which is discussed in most basic statistical texts, has proved to be a good method for this. A minimum of seven variables must be measured by both test methods to obtain statistical validity of Spearman rank correlation. Ranking 10 to 15 variables by both methods will improve the reliability of such correlation.

It is frequently not possible to predict how many hours or weeks of accelerated testing will yield the best correlation to some period of outdoor testing. Therefore, laboratory tests should be measured periodically, such as weekly or biweekly, so that the correlation coefficient may be determined at several points during the accelerated test.

Report

Report the following information:

1. Manufacturer and model of fluorescent UV radiation apparatus,

2. Manufacturer's designation for the fluorescent UV radiation wavelength (nm) at which peak emission occurs, and short wavelength at which 1% of peak emission occurs (for example, FS-40 313/280 nm),

3. Cycle of UV exposure time and temperature, and radiation time and temperature (for example 4 h UV/CON/50°C),

4. Total exposure time,

5. Special conditions of test, such as rotation of test specimens, and

6. A sample report form is shown in Fig. 7.

Repeatability and Bias

Repeatability:

The repeatability and reproducibility of results from exposures conducted according to this practice with the materials being tested, the material

property being measured, and the specific test conditions and cycles that are used. In round-robin studies⁸ conducted by ASTM subcommittee G3.03, the 60° gloss values of replicate PVC tape specimens exposed in different laboratories using identical test devices and exposure cycles showed significant variability. The variability shown in these round-robin studies restricts the use of "absolute standards" such as requiring a specific property level after a specific exposure period.

12.1.1.1 If a standard or specification for general use requires a definite property level after a specific time or radiant exposure in an exposure test conducted according to this practice, the specified property level shall be based on results obtained in a round-robin that takes into consideration the variability due to the exposure, and the test method used to measure the property of interest. The round-robin shall be conducted according to Practice E 691 and shall include a statistically representative sample of all laboratories or organizations who would normally conduct the exposure and property measurement.

12.1.1.2 If a standard or specification for use between two or three parties requires a definite property level after a specific time or radiant exposure in an exposure test conducted according to this practice, the specific property level shall be based on statistical analysis of results from at least two separate, independent exposures in each laboratory. The design of the experiment used to determine the specific property level shall take into consideration the variability due to the exposure, and the test method used to measure the property of interest.

12.1.2 The same round-robin studies demonstrated that the gloss values for a series of materials could be ranked with a high level of reproducibility between laboratories. Where reproducibility in results from an exposure test conducted according to this practice have not been established through round-robin testing, performance requirements for material shall be specified in terms of comparison (ranked) to a control specimen. The control specimen shall be exposed simultaneously with the test specimen(s) in the same device. The specific control material used shall be agreed upon by the concerned parties. Expose replicates of the test specimen and the control specimen so that statistically significant performance difference can be determined.

12.2 Bias:

12.2.1 Bias can not be determined because no acceptable standard weathering reference materials are available.

13. Keywords

13.1 condensation; cycles; environmental; exposure; fluorescent; light; nonmetallic; simulation; ultraviolet; weathering test

⁸ Fischer, R. M., "Results of Round Robin Studies of Light- and Water-Exposure Standard Practices," *Accelerated and Outdoor Durability Testing of Organic Materials*, ASTM STP 1202, Warren D. Ketola and Douglas Grossman, Eds, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993.

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. LAMP APPLICATIONS

A variety of lamps can be used in fluorescent condensation devices. The particular application determines which lamp should be used. The lamps discussed in this appendix differ in the total amount of UV energy

emitted and in their wavelength spectrum. Differences in lamp energy or spectrum may cause significant differences in test results. Consequently it is extremely important to report lamp type in accordance with 11.1.2.

X2. DIRECT EXPOSURES

UV-B Lamps:

The UV-B region (280–315 nm) includes the wavelengths found in sunlight at the earth's surface responsible for most polymer damage. UV-B lamps are commonly used lamps in fluorescent UV-condensation tests. For most applications, they produce the fastest degradation. There are two commonly available UV-B lamps that meet the requirements of 6.2.1. They emit different amounts of total energy, but both peak and produce the same UV wavelengths in the same proportions. In tests utilizing the same cycles and durations, shorter times to failure are observed when a higher UV irradiance is used. Furthermore, the same cycles and temperatures with these two lamps exhibit differences in ranking of materials, due to the proportion of UV to moisture and temper-

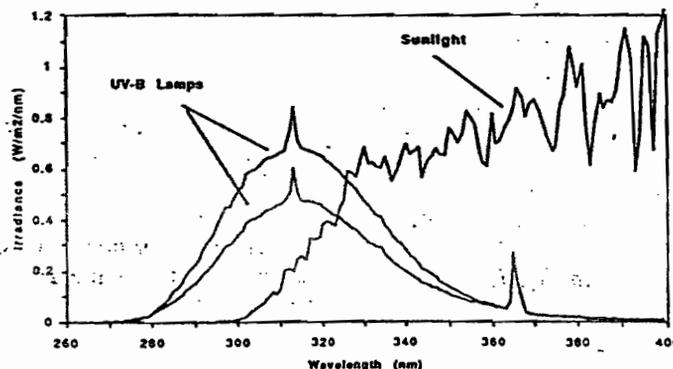
ature. UV-B lamps emit UV below the normal spectrum. This short wavelength UV can produce more degradation and often causes degradation by

mechanisms that do not occur when materials are exposed to sunlight. This may lead to anomalous results. Figure X2.1 shows the spectral power distribution (SPD) of typical UV-B lamps compared to the SPD of noon, summer sunlight.

X2.2 UV-A Lamps:

X2.2.1 For certain applications, the longer wavelength spectrum emitted by UV-A lamps is useful. Because UV-A lamps typically have little or no UV output below 300 nm (which is considered the "cut-on" wavelength for terrestrial sunlight), they usually do not degrade materials as rapidly as UV-B lamps, but they may allow enhanced correlation with actual outdoor weathering. Tests using UV-A lamps have been found useful for comparing different polymers, textiles and UV stabilizers. Figure X2.2 illustrates the SPD of one commonly used type of fluorescent UV-A lamp compared to noon, summer sunlight. This lamp has a peak emission at 340 nm.

X2.2.2 The other commonly used type of UV-A lamp has a peak at 351 nm, and is mostly used for behind glass simulations because it lacks some of the short UV-B wavelengths found in sunlight. UV-A lamps with different SPD's can produce very different test results.



The SPD's shown in this appendix are representative SPD's only, and are not meant to be used to calculate or estimate total radiant exposure for tests in fluorescent UV. Sunlight was measured using a spectroradiometer with a double grating monochromator (1 nm band pass) with a quartz cosine receptor. Sunlight was measured at noon at the summer solstice with a clear sky, with the spectroradiometer on an equatorial follow-the-sun mount. The fluorescent UV SPD's were measured in the plane in the center of the allowed sample area.

FIG. X2.1 Typical UV-B Lamps versus Sunlight

9217 G 53

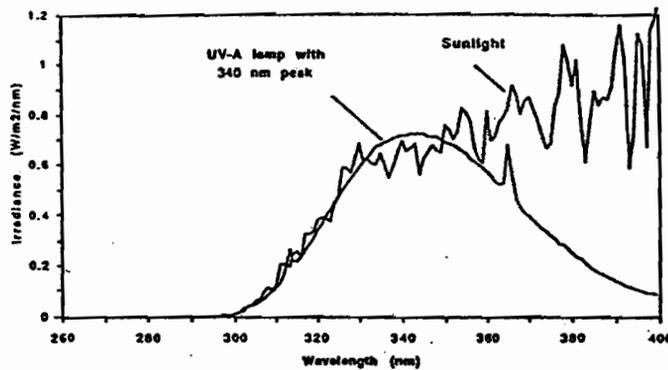


FIG. X2.2 UV-A Lamp with 340 nm Peak versus Sunlight

X3. SIMULATIONS OF EXPOSURES TO SUNLIGHT BEHIND GLASS

For simulations of behind glass exposure applications UV-A lamps are recommended.

Filtering Effect of Glass—Glass of any type acts as a filter of the sunlight spectrum. Ordinary glass is essentially transparent to light above about 370 nm. However, the effect becomes more pronounced with decreasing wavelength. The shorter, more damaging UV-B wavelengths are most greatly affected. Window glass completely filters out the most damaging wavelengths below about 310 nm. In the series of illustrations, only one type of window glass is

used in the accompanying graphs. It should be noted that glass transmission characteristics will vary due to manufacturer, production lot, thickness, or other factors.

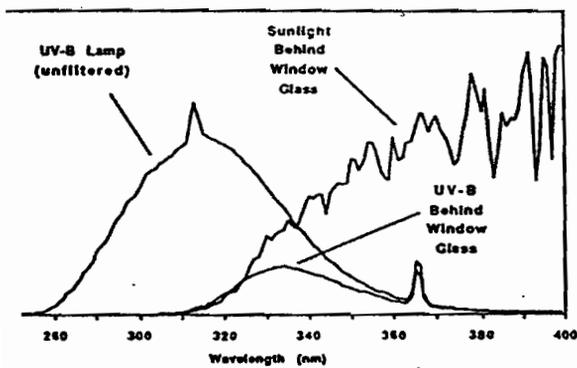
X3.3 UV-B Lamps:

X3.3.1 Most of the emission of UV-B lamps is in the shorter wavelengths that are filtered very efficiently by glass. Because of this, very little energy from this type of lamp will reach specimens mounted behind glass in the test chamber. Figure X3.1 shows a UV-B lamp unfiltered, a UV-B lamp through window glass, and sunlight through window glass. Window glass filters out 80% of the total energy from UV-B lamps. As a result of attenuating the short wavelengths, sunlight also shifts the peak spectrum toward the longer wavelengths. The short wavelength cut-on for both sunlight through glass and the UV-B through glass is at about 310 nm, depending on the glass lot.

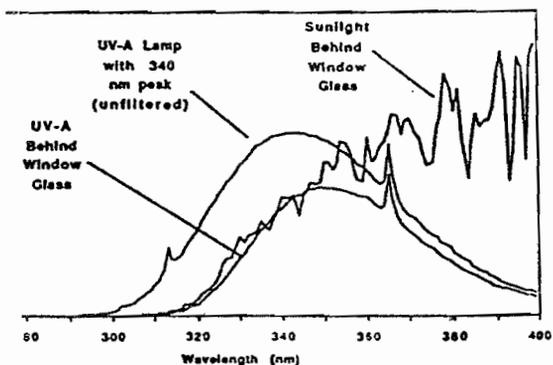
X3.3.2 UV-B lamps should not be used to test materials that are exposed to sunlight through glass. *Unfiltered* exposure to UV-B lamps is much too severe a test when compared to sunlight through glass.

X3.4 UV-A Lamps:

X3.4.1 Most of the energy emitted from UV-A lamps is able to pass through typical window glass. Figure X3.2 compares the SPD's for sunlight filtered through a typical window glass, a UV-A lamp with a peak output of 340 nm and the same UV-A lamp filtered by the same window glass.



Sunlight Behind Glass versus UV-B Lamp and UV-B Lamp Behind Glass



Sunlight Behind Glass versus 340 nm Lamp and 340 nm Lamp Behind Glass

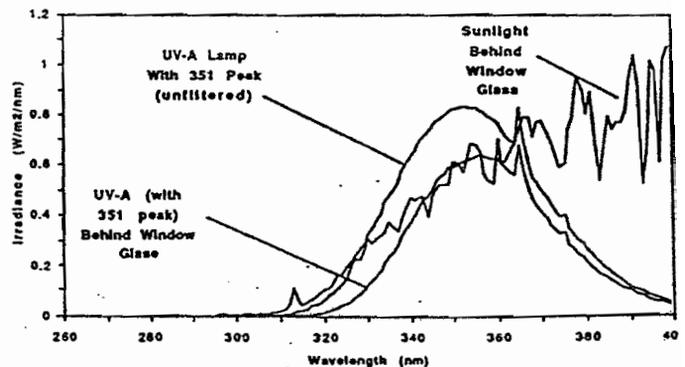


FIG. X3.3 Sunlight Behind Glass versus 351 nm Lamp and 351 nm Lamp Behind Glass

X3.4.2 Figure X3.3 compares the SPD's for sunlight filtered through a typical window glass, a UV-A lamp with a peak output of 351 nm, and the same UV-A lamp filtered by the same window glass.

X3.4.3 For many applications, exposure to unfiltered

UV-A lamps with a peak output at 351 nm provides simulation for sunlight filtered through typical window glass. If specimens must be exposed behind glass in the test chamber, tests using lamps with a peak emission at 351 nm are recommended.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

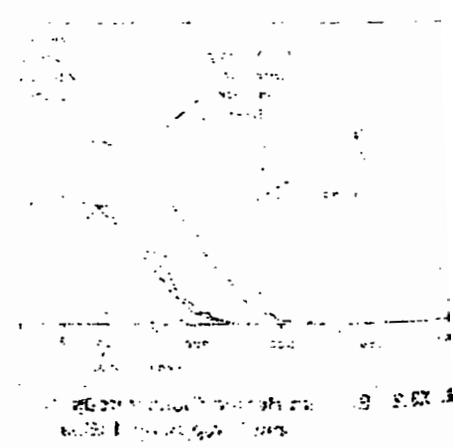


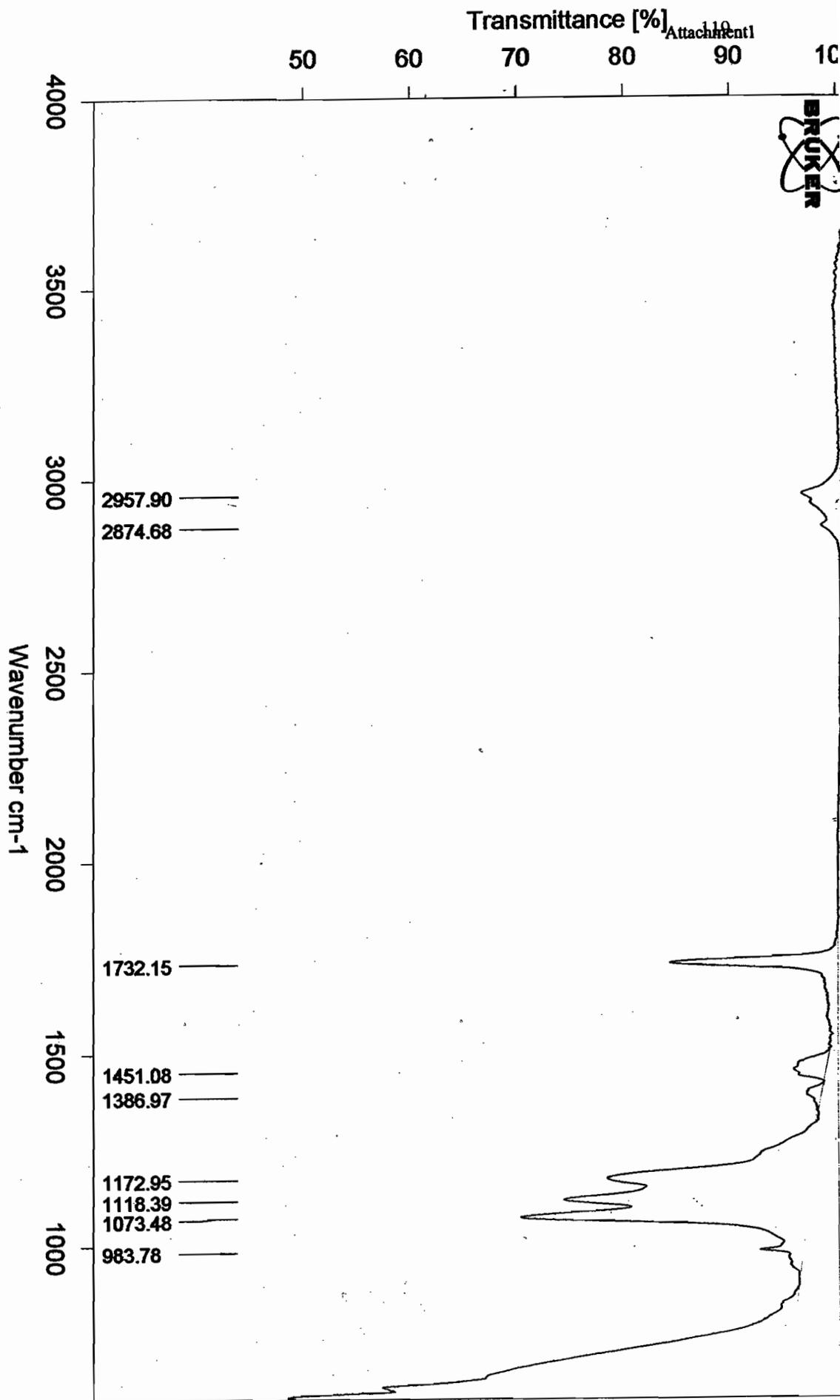
FIGURE X3.3—Spectral Power Distributions of Sunlight Filtered Through Typical Window Glass, a UV-A Lamp with a Peak Output at 351 nm, and the Same UV-A Lamp Filtered by the Same Window Glass.

ภาคผนวก ก

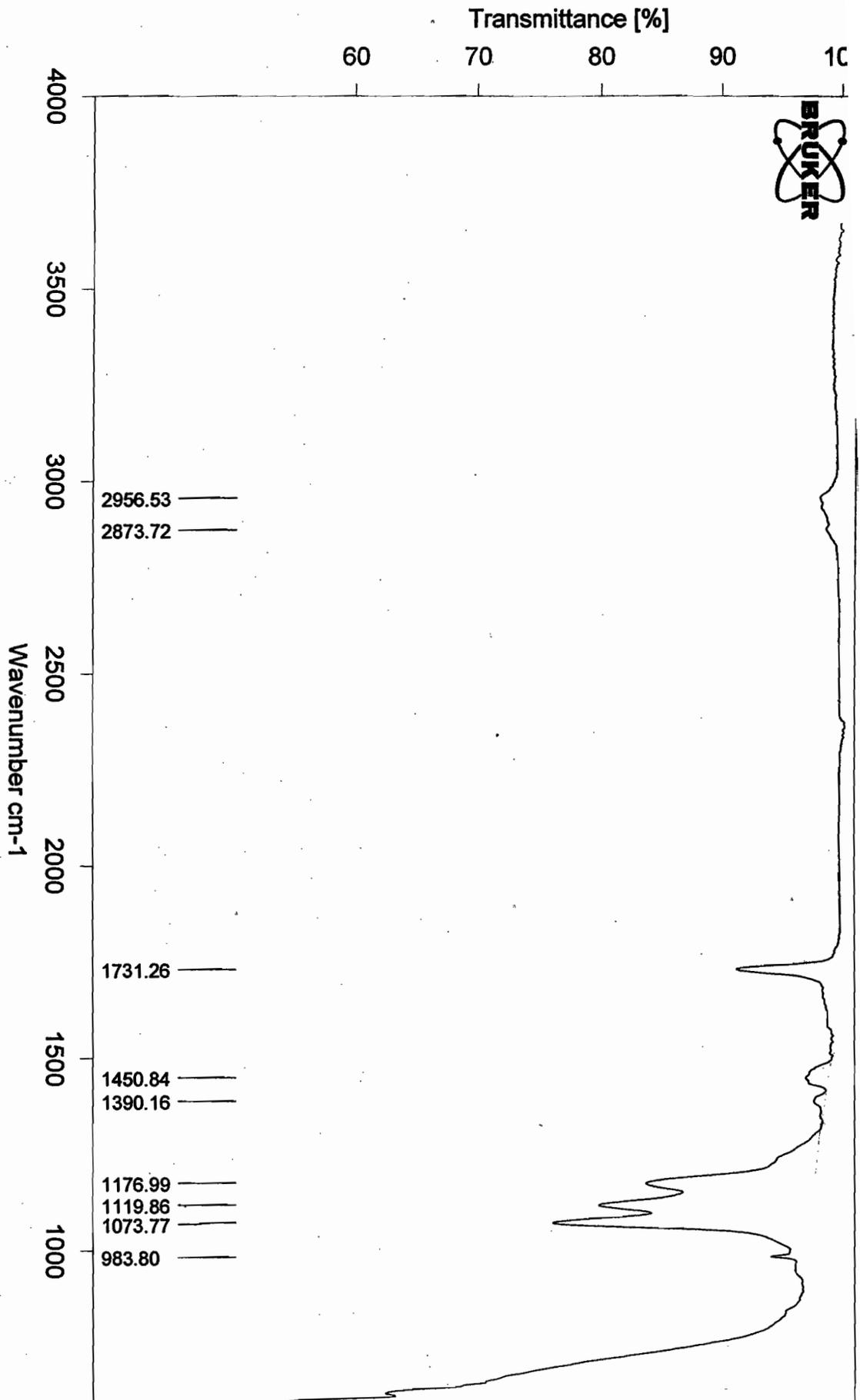
D:\Orawan\KMUTTVA 0 hr:0

A 0 hr

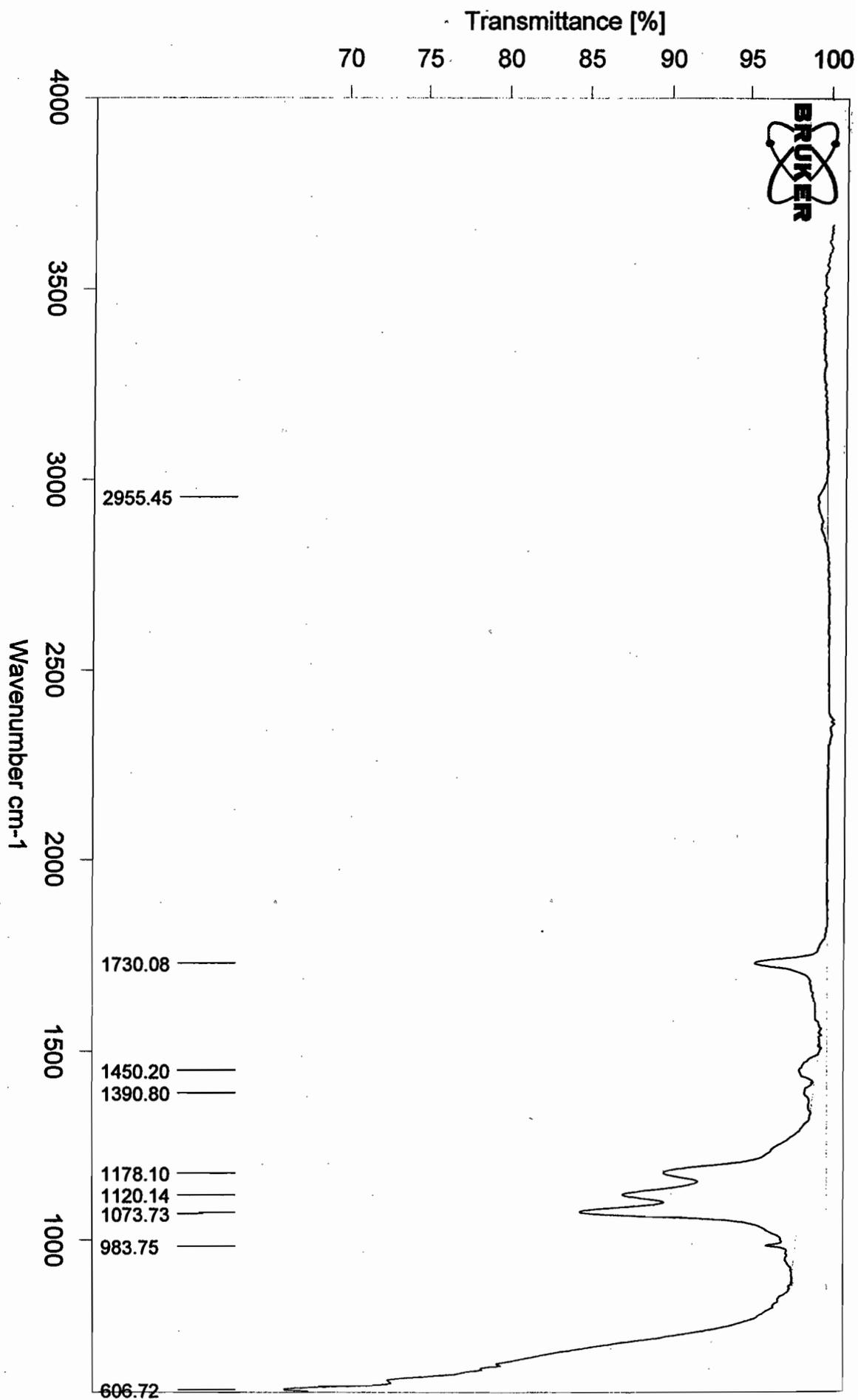
solid



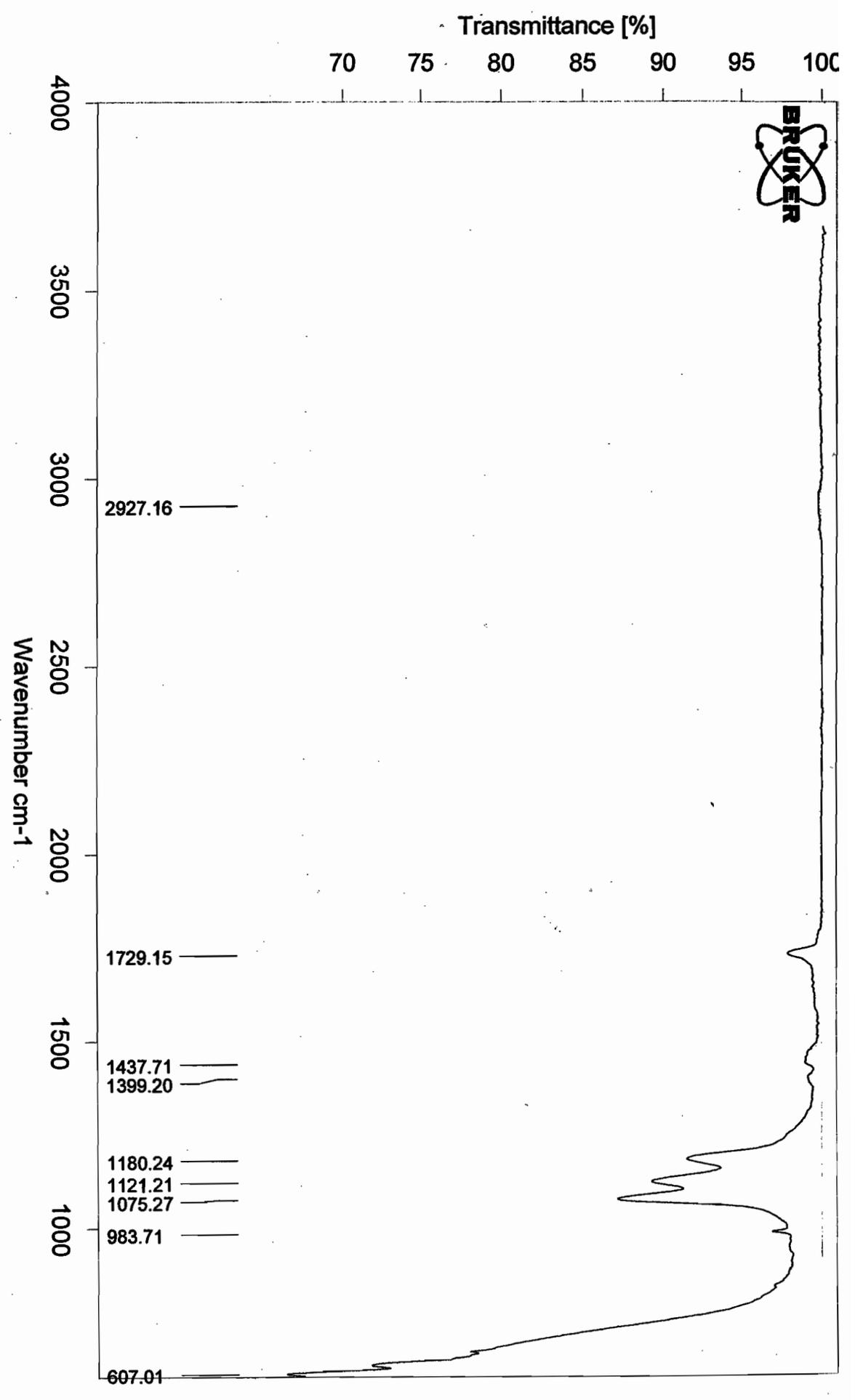
D:\Orawan\KMUTTA 200 hr.0 A 200 hr solid

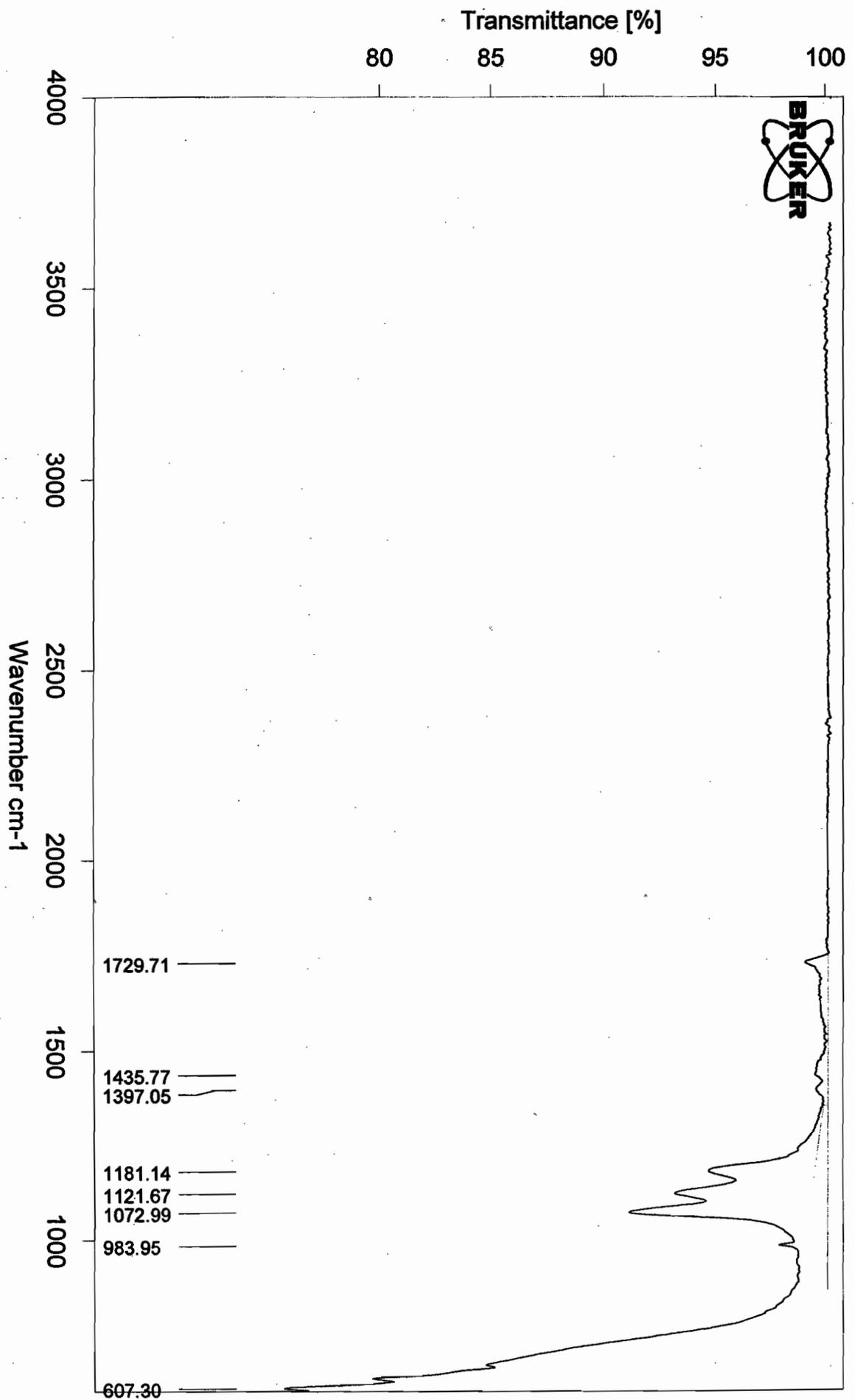


D:\Orawan\KMUTTA 400 hr.0 A 400 hr solid

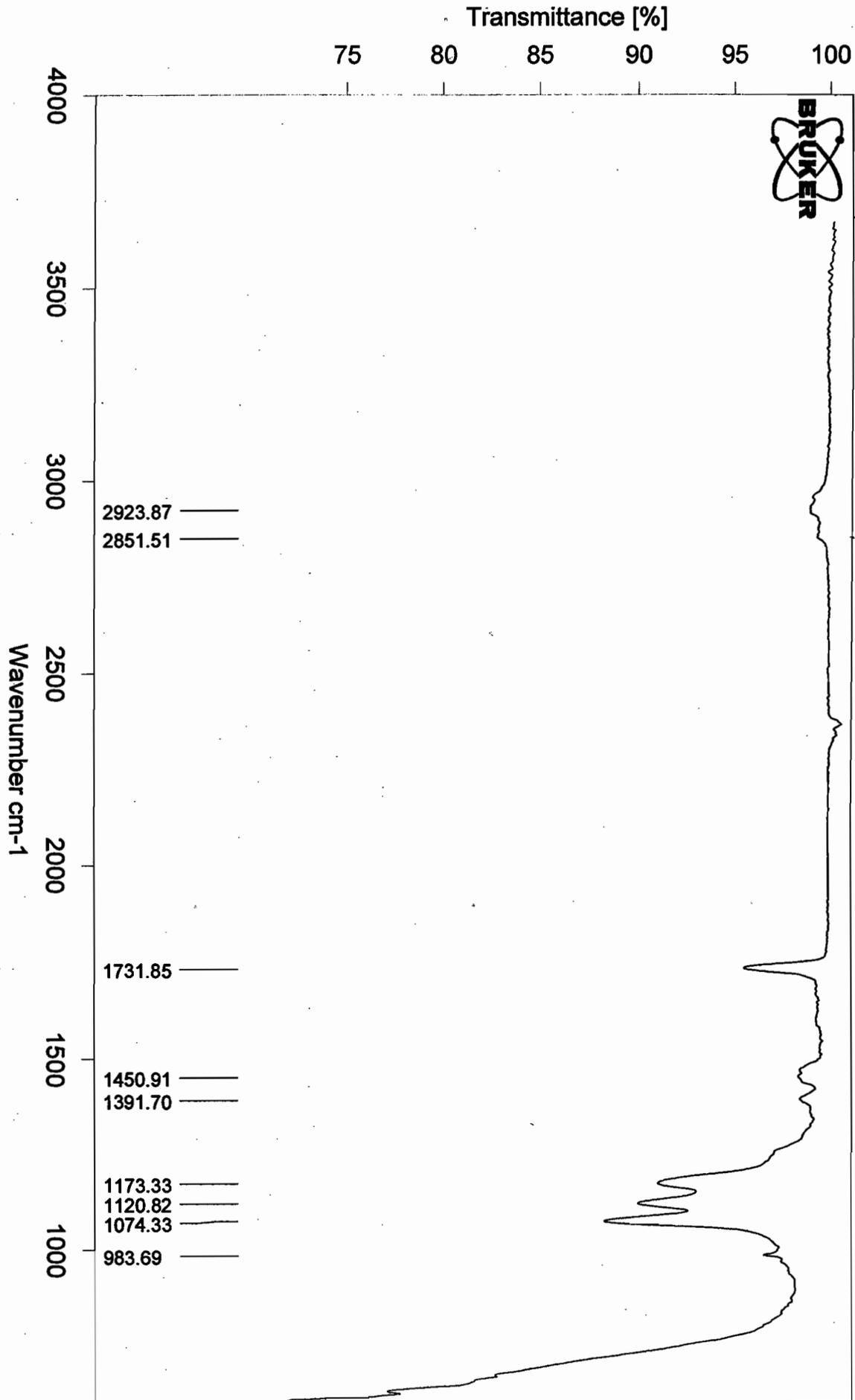


D:\Orawan\KMUTTA 800 hr.0 A 800 hr solid





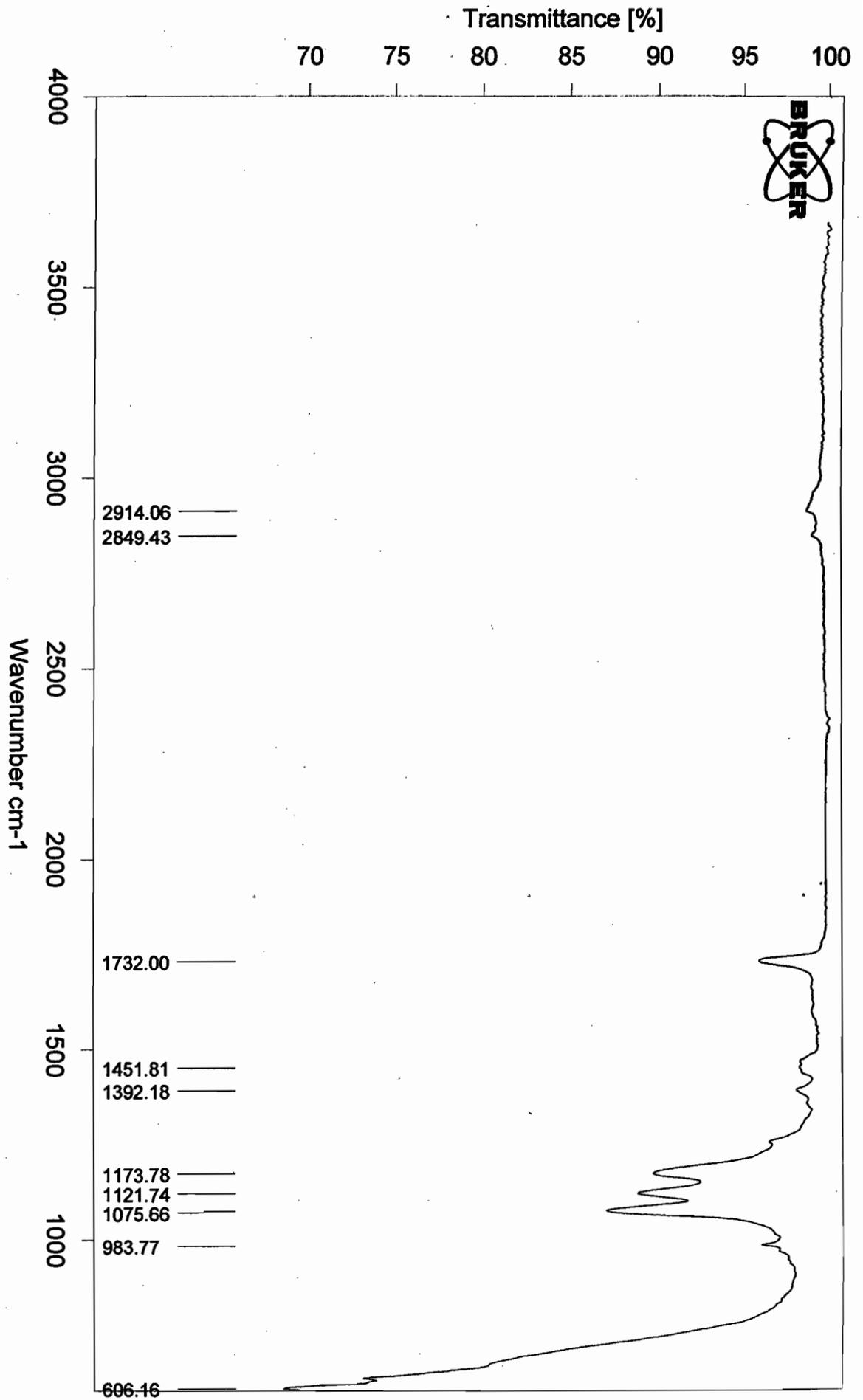
D:\Orawan\KMUTT\B200-hr.0 B200-hr solid



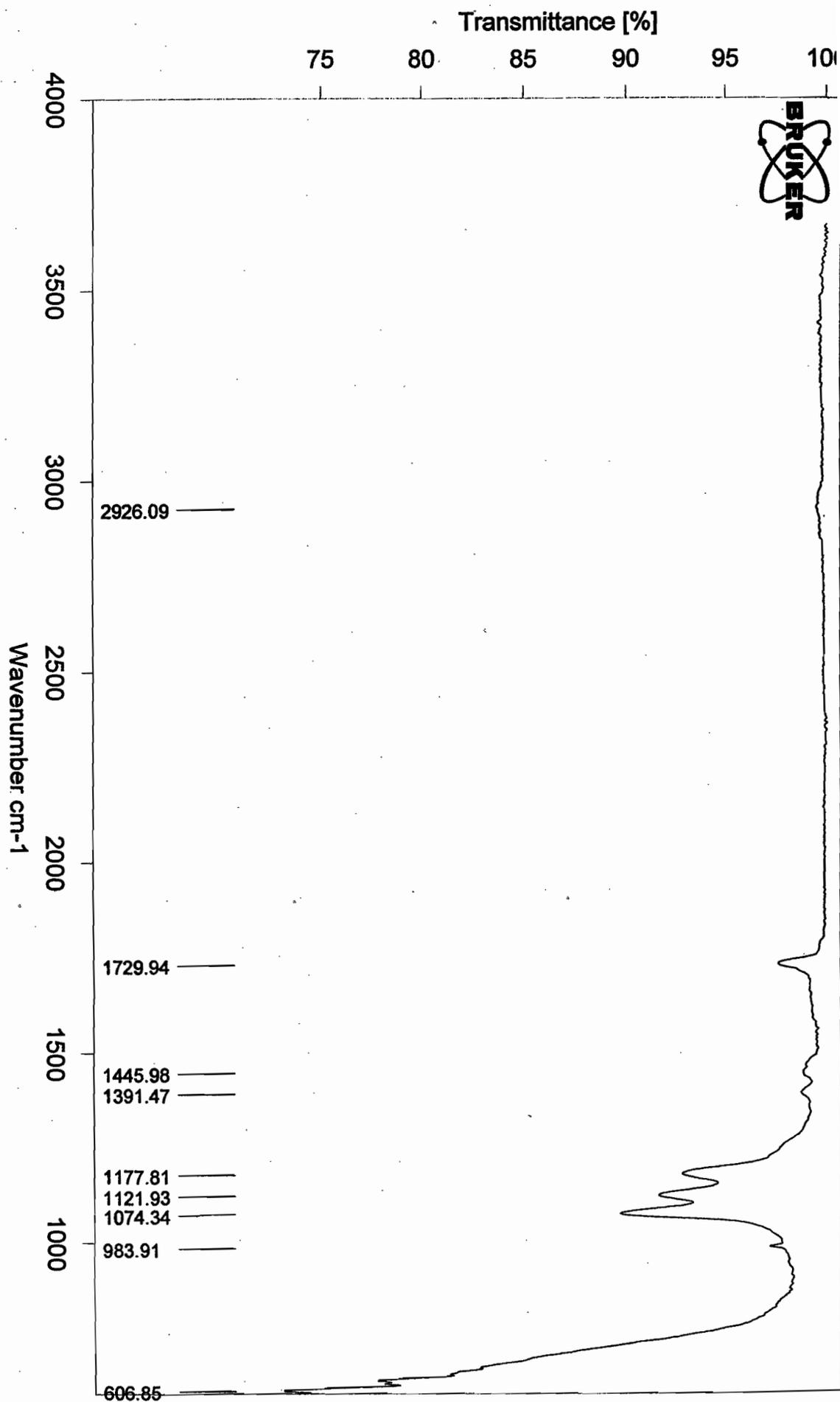
D:\Orawan\KMUTT\B 400 hr.0

R 400 hr

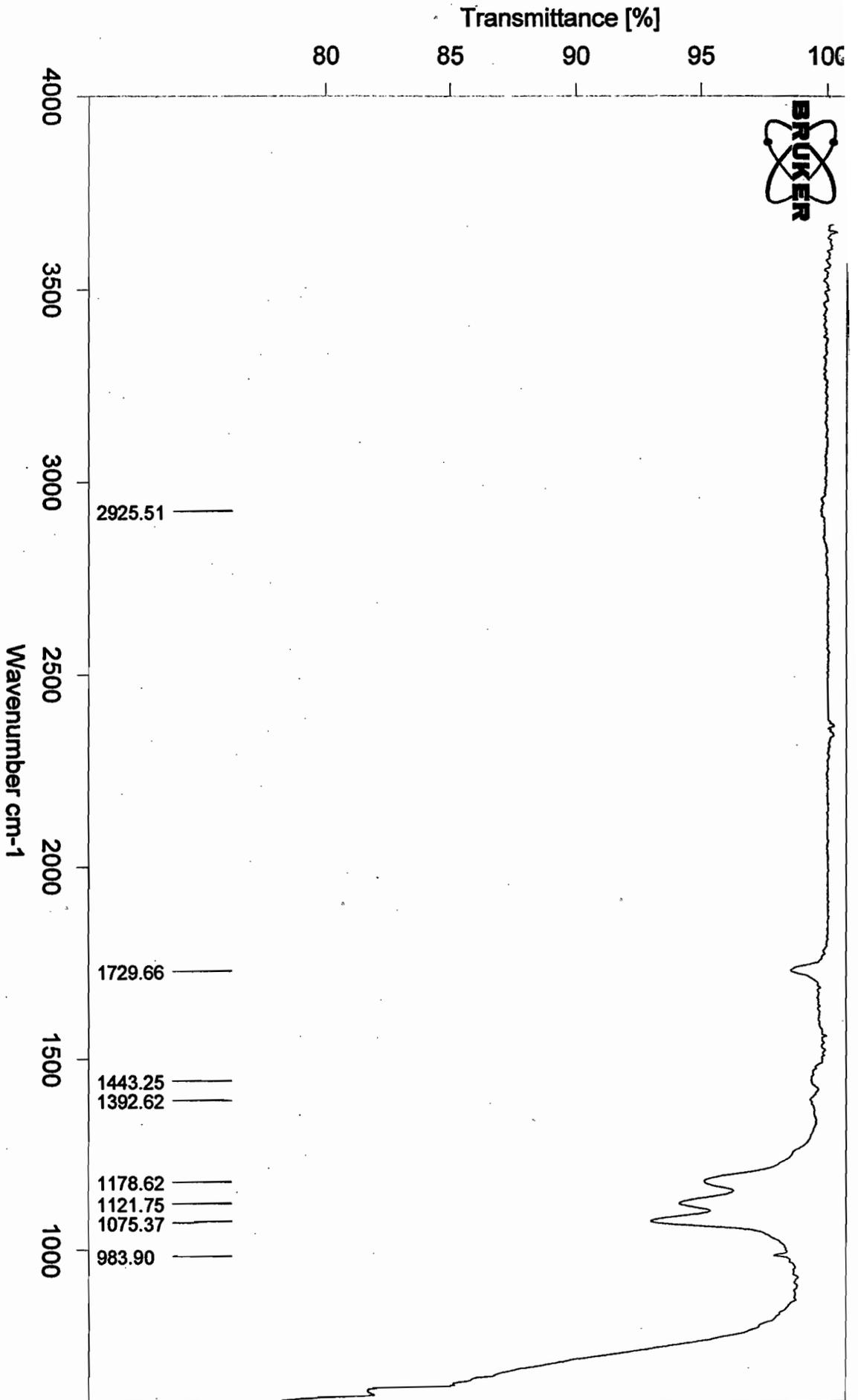
-2-1-1



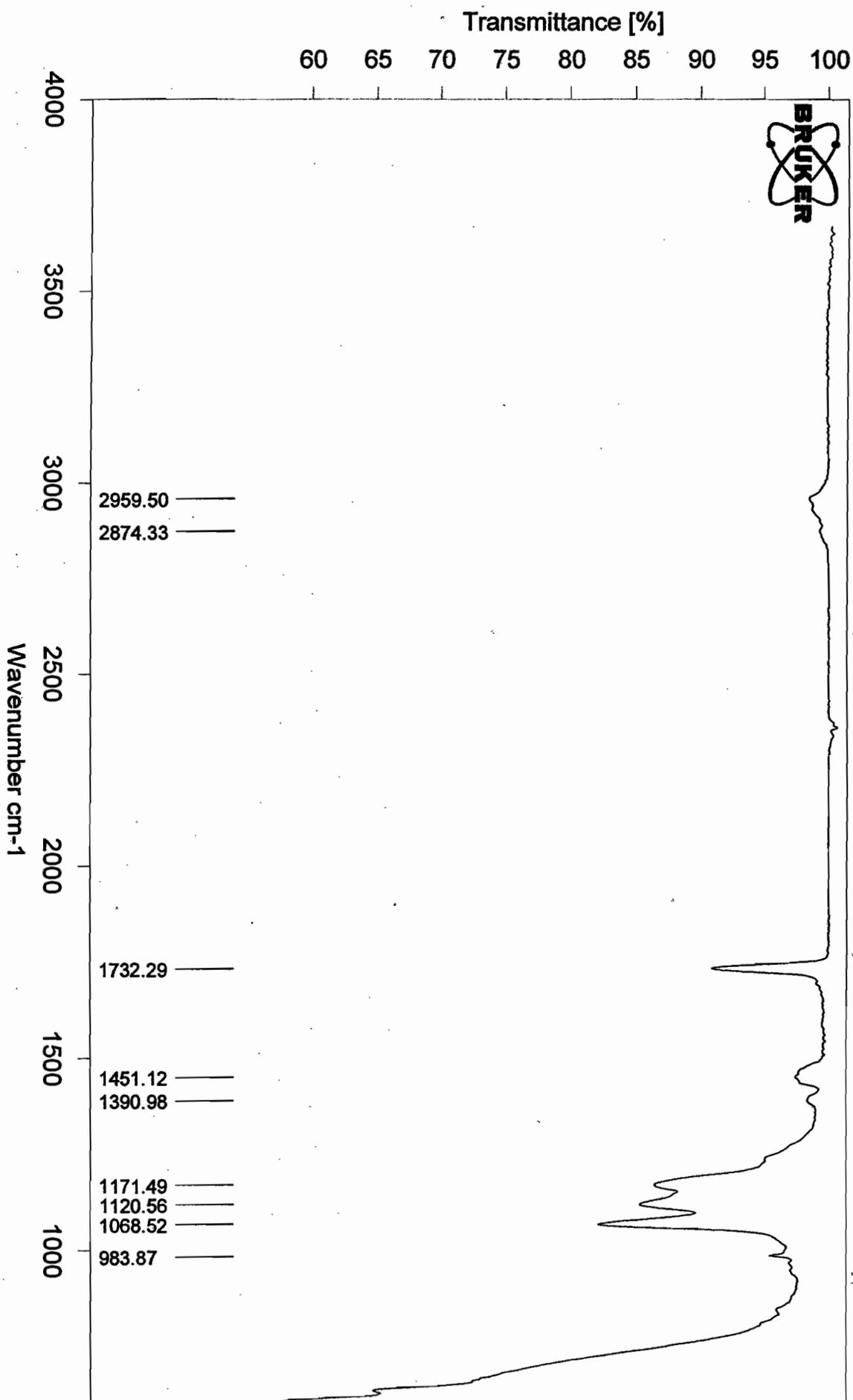
D:\Orawan\KMUTT\B 800 hr.0 B 800 hr solid



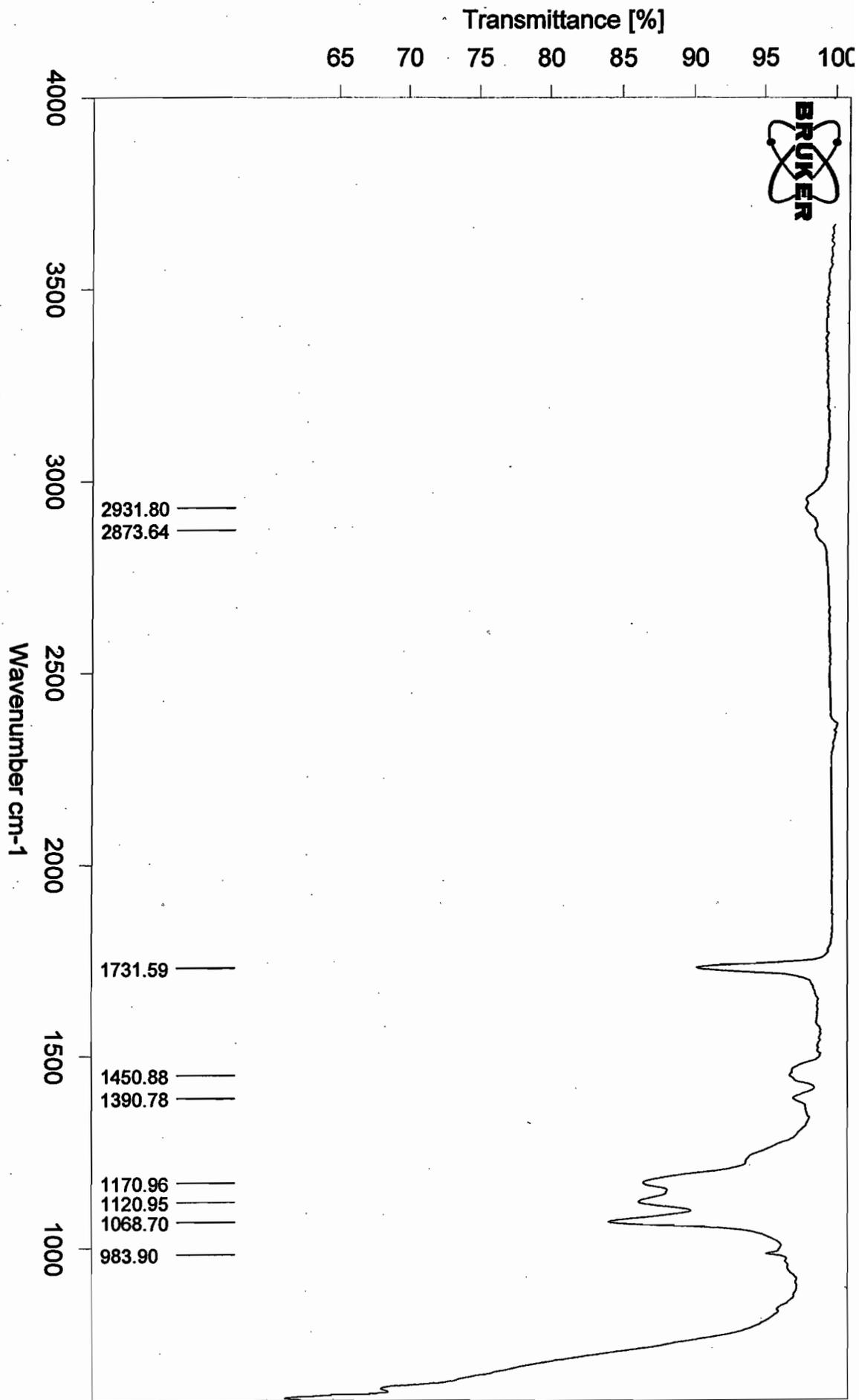
D:\Orawan\KMUTT\B 1000 hr.0 B 1000 hr solid

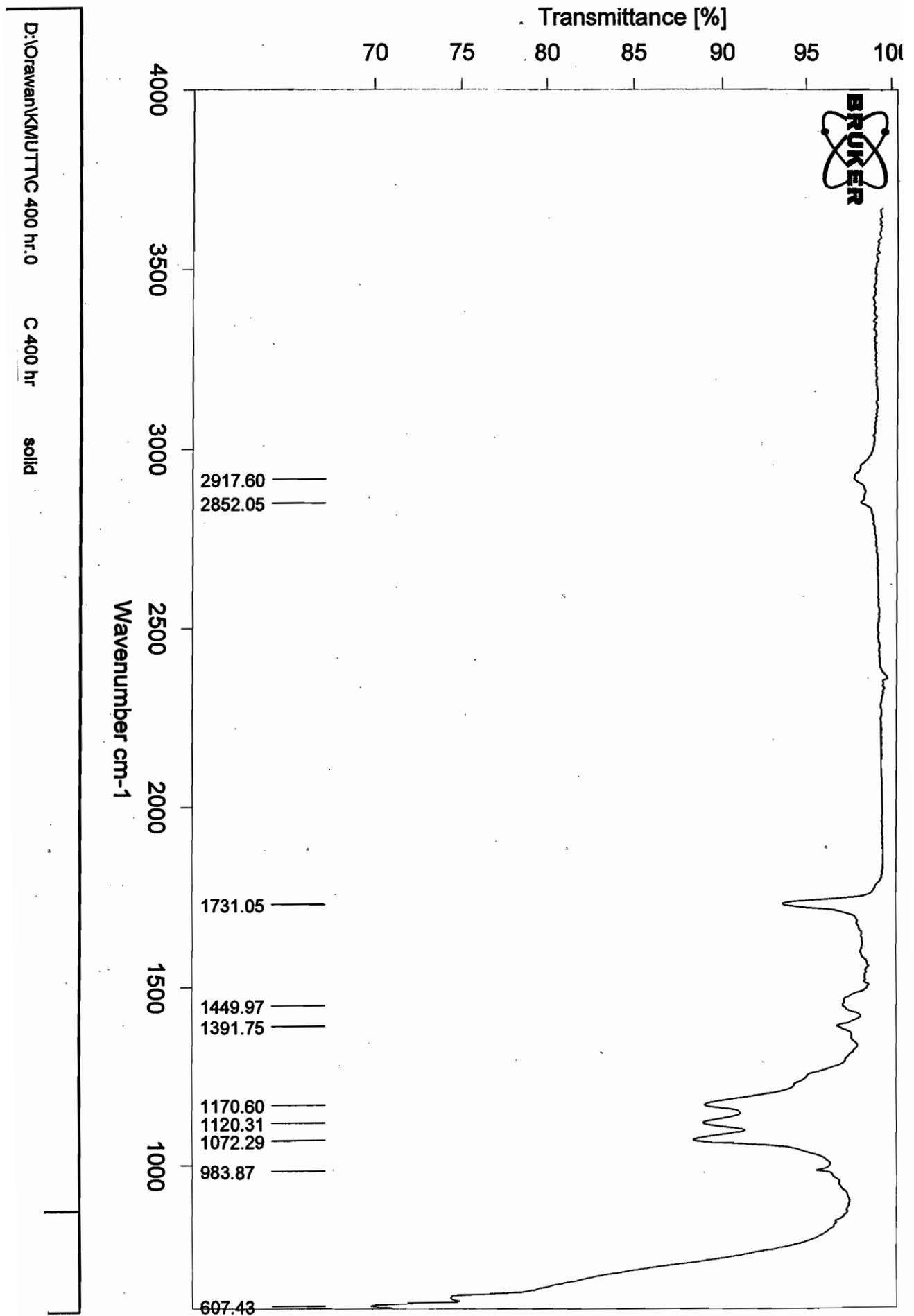


D:\Orawan\KMUTT\C 0 hr:0 C 0 hr solid

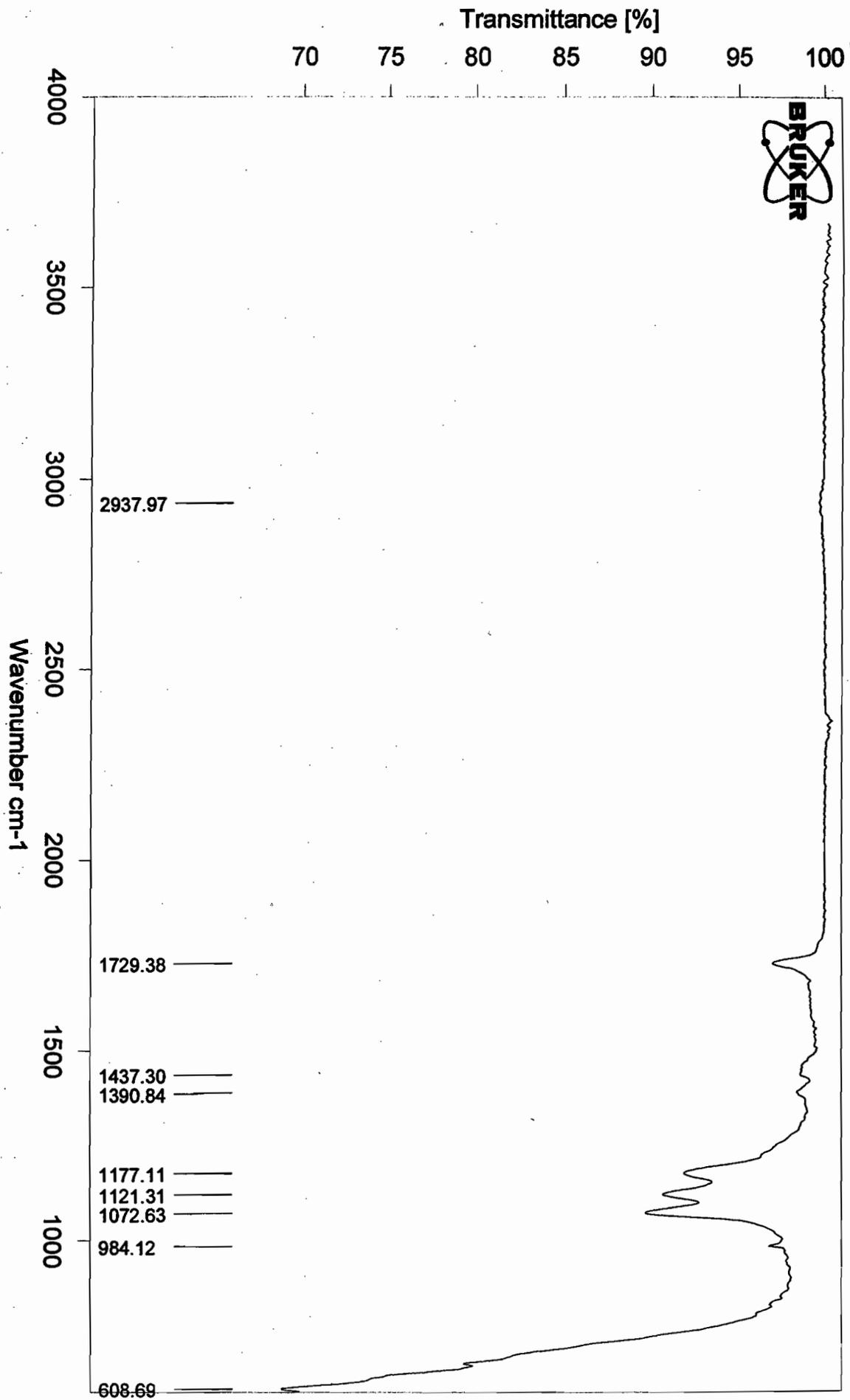


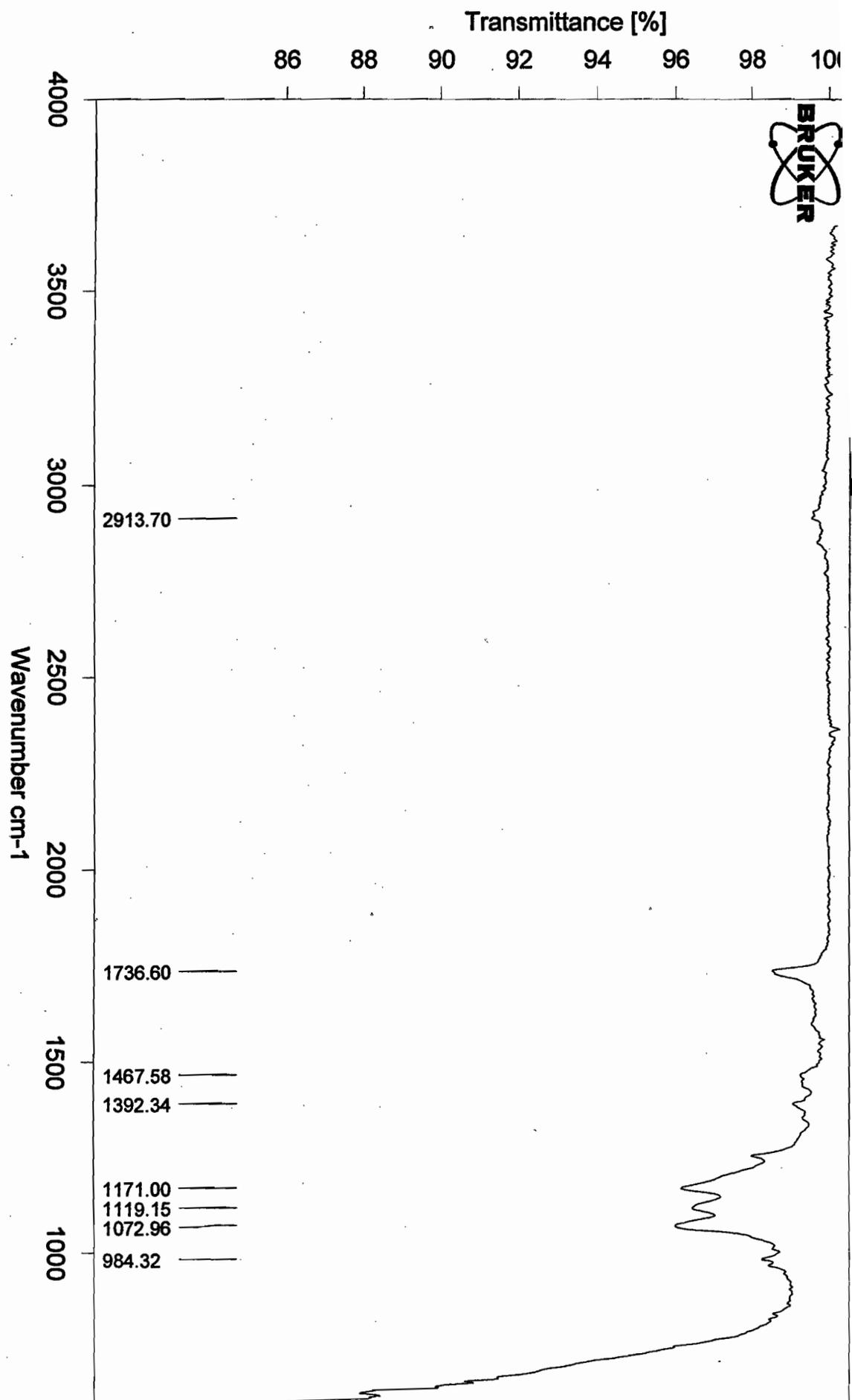
D:\Orawan\KMUTT\TC 200 hr.0 B 200 hr solid





D:\Orawan\KMUTT\TC 800 hr.0 C 800 hr solid





ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ - สกุล	นายวัลลภ หาญณรงค์ชัย
วัน เดือน ปีเกิด	5 เมษายน 2525
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ประโยคมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนคณะราษฎรบำรุง พ.ศ. 2539 ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนคณะราษฎรบำรุง พ.ศ. 2541
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์พ.ศ. 2547
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549
ทุนการศึกษา	ทุนเพชรพระจอมเกล้า พ.ศ. 2547
ประวัติการทำงาน	-
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	วัลลภ หาญณรงค์ชัย, พัฒนะ รักความสุข และ จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, สีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน, การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, 31 สิงหาคม 2550, โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย

