



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

อิทธิพลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททาเนียม
ไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์
หลังคายางจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและซีลี้อยไม้

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เอกชัย วิมลมาลา และคณะ

กรกฎาคม 2553

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

อิทธิพลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์
หลังคายางจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและซีเมนต์

คณะผู้วิจัย

1. ผศ. เอกชัย วิมลมาลา
2. ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
3. ผศ. อีระศักดิ์ หมากริน
4. นางสาวณัฐตา เหมะวิริยาพรวัฒนา

สังกัด

ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา(Medium Projects on Rubber; MPR)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

ชื่อโครงการวิจัย

(ภาษาไทย) อิทธิพลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์
ในผิวเคลือบที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคายางจากวัสดุผสม
ยางธรรมชาติและซีเมนต์

(ภาษาอังกฤษ) Effects of Coating Thickness and TiO_2 Dosage in Polyurethane Coating on Heat
Transfer Properties of Wood-Natural Rubber Roofs

ชื่อหัวหน้าโครงการ

ผศ. เอกชัย วิมลมาลา

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม. 10140

โทรศัพท์ / โทรสาร (02) 470-8647

E-mail ekachai.wim@kmutt.ac.th

ที่ปรึกษาโครงการ

ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม. 10140

โทรศัพท์ (02) 470-8645 โทรสาร (02) 470-8647

E-mail narongrit.som@kmutt.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย

ผศ. ชีระศักดิ์ หมากริน

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม. 10140

โทรศัพท์ / โทรสาร (02) 470-8647

E-mail teerasak.mar@kmutt.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาว ญฐิตา เหมะวิทยาพรวัฒนา

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ระยะเวลาดำเนินการ 23 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน 2551 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม 2553

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

จากงานวิจัยของกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทำวิจัยเกี่ยวกับวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลังคาอย่างพารา ที่ดำเนินวิจัยผ่านมาแล้ว จำนวน 2 โครงการ คือ โครงการที่ 1 “การผลิตและทดสอบหลังคาอย่างพารา จากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับขี้เลื่อย” และโครงการที่ 2 “การพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคาอย่างประหยัดพลังงานจากวัสดุผสมยางและขี้เลื่อย” ทั้ง 2 โครงการ ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยโดย สกว. และบริษัทสยามยูไนเต็ดรีไซเคิล จำกัด ผลวิจัยพบว่า สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลังคาอย่างได้โดยที่สามารถเติมปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ได้ถึง 80 phr ในยางธรรมชาติเกรด STR 20 โดยมีสมบัติเชิงกลทางด้านความแข็งแรง ความแข็งผิว ทนทานต่อแรงกระทำภายนอก และสถานะแวดล้อมขณะใช้งานได้เป็นอย่างดี และมีความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี นอกจากนี้ มีการใช้สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนเคลือบบนหลังคาอย่าง พบว่า มีการยึดติดกับแผ่นยางได้ดี และทนต่อสถานะแวดล้อม (ความร้อน โอโซนและแสงยูวี) ได้ค่อนข้างดีมาก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อมูลงานวิจัยทางด้านการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคาอย่าง มีรายงานการวิจัยที่ยังไม่แพร่หลายในการนำผงไททาเนียมไดออกไซด์เติมลงในสารเคลือบพอลิยูรีเทน เพื่อลดปริมาณการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคาอย่าง ซึ่งมีการนำผงไททาเนียมไดออกไซด์ใช้งานสำหรับการสะท้อนความร้อนในวัสดุก่อสร้าง การนำผงไททาเนียมไปเคลือบผิวบนหลังคาอย่างจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยมีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากผงไททาเนียมไดออกไซด์สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar reflectance) ได้ดี โดยจะส่งผลทำให้ปริมาณความร้อนที่สะสมบนแผ่นหลังคาลดลง และมีสมบัติด้านความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี จึงสามารถลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้สนใจผลของการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเชิงปริมาณ และความหนาที่เหมาะสมของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล และการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคาอย่างธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ ที่ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน และความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทน บนแผ่นหลังคayangพาราที่มีต่อสมบัติของผิวเคลือบ และสมบัติการถ่ายเทความร้อน ของผลิตภัณฑ์หลังคayangจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้
2. เพื่อศึกษาผลของการเร่งสภาวะด้วยแสงยูวี ที่มีต่อสมบัติของผิวเคลือบ และสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคayangจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้

ผลการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อน และสมบัติทางกลและกายภาพ ของผลิตภัณฑ์หลังคayangจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้ โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน และปรับเปลี่ยนความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน ผลการทดลองพบว่า ความสว่างและค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนของวัสดุผสมยางธรรมชาติ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไททาเนียม แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาของผิวเคลือบ และไม่พบการหลุดลอกผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนแผ่นวัสดุยางธรรมชาติ โดยผลการยึดเกาะซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และไม่พบรอยแตกร้าวของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนหลังจากผ่านการตัดโค้ง โดยมีค่าการนำความร้อน ระหว่าง 0.347-0.397 W/m K นอกจากนี้ ศึกษาการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วน ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน โดยการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวีที่เวลาดังนี้ 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง พบว่า ความสว่างของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเร่งสภาวะของผิวเคลือบ และไม่พบการหลุดลอกและรอยแตกร้าวของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเมื่อผ่านการตัดโค้งผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ ส่วนการทดสอบการรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่สภาวะการใช้งานจริงของหลังคayang หลังการกระเบื้องลอนคู่ และหลังการกระเบื้องคอนกรีต พบว่า กระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องคอนกรีต มีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าหลังคayangที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ไม่เติมและเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ประมาณ 10-12%

สรุปผลการวิจัย

1. ผลของการวิจัยในส่วนของการศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วน 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่เคลือบบนแผ่นยางที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน พบว่า
 - 1) การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ทำให้ความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์

- 2) การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 3 และ 5 ส่วนในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน พบว่ามีการกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอ และพบว่าผงไททาเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นในผิวเคลือบ และมีการเกาะกลุ่มกันตามปริมาณของผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น
- 3) การเติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทนส่งผลต่อสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 28.54% ที่เติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วน
- 4) ความสว่างผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความสว่างสูงสุดที่ปริมาณของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ 15 ส่วน
- 5) แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ทุกสัดส่วน มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.347-0.397 W/m K
- 6) การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทนทุกสัดส่วน พบว่าผิวเคลือบมีการยึดเกาะกับแผ่นยางที่ดี และไม่พบรอยแตกร้าวของผิวเคลือบเมื่อทดสอบการดัดโค้ง

2. ผลของการวิจัยในส่วนของการศึกษาความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน ที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน พบว่า
 - 1) ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของแผ่นยางที่เคลือบผิว โดยมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ระหว่าง 28.54-28.78%
 - 2) แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ความหนาต่างๆ ไม่พบการหลุดลอก และรอยแตกร้าวของผิวเคลือบ เมื่อทดสอบความทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบ

3. ผลของการวิจัยในส่วนของการศึกษาการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วน ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน โดยการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี ที่ระยะเวลา 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง พบว่า
 - 1) แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน มีความสว่างเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี ซึ่งผิวเคลือบมีค่าความสว่างสูงสุดที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลา 672 ชั่วโมง
 - 2) แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ ไม่พบการหลุดลอก และรอยแตกร้าวของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเมื่อทดสอบการดัดโค้งผิวเคลือบ
 - 3) ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของแผ่นยางที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทนที่ผ่านการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี ที่เวลาต่างๆ พบว่ามีค่าการสะท้อนของผิวเคลือบอยู่ระหว่าง 29.5-31.2%
 - 4) ผิวเคลือบของชิ้นงานแผ่นยางที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ผ่านการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี พบว่าผงไททาเนียมไดออกไซด์มีการเกาะกลุ่มกันอย่างหนาแน่นในผิวเคลือบ

4. ผลของการวิจัยในส่วนของการทดสอบสภาวะการใช้งานจริงที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ไม่เติม และเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ตรวจสอบอุณหภูมิด้านบน และด้านล่างโดยการรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่สภาวะการใช้งานจริง ที่ช่วงเวลาต่างๆ และเปรียบเทียบกับหลังการกระเบื้องลอนคู่ และหลังการกระเบื้องคอนกรีต พบว่า

- 1) อุณหภูมิของหลังคายัง หลังการกระเบื้องลอนคู่ และหลังการคอนกรีต มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ช่วงเวลา 9.00 น. เป็นต้นไป มีอุณหภูมิสูงสุดที่ช่วงเวลา 12.00 ถึง 13.00 น. และมีแนวโน้มลดลงที่ช่วงเวลา 14.00 ถึง 16.00 น. โดยที่กระเบื้องลอนคู่มีอุณหภูมิสูงสุด กระเบื้องคอนกรีต และกระเบื้องหลังคายังที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่เติม และไม่ได้เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์มีอุณหภูมิลดลง ตามลำดับ
- 2) อุณหภูมิด้านบนและด้านล่างกระเบื้องลอนคู่ และกระเบื้องคอนกรีตมีอุณหภูมิแตกต่างกันประมาณ 2-3°C ส่วนหลังคายังมีอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างไม่แตกต่างกันมากนัก
- 3) กระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องคอนกรีต มีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าหลังคายังที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ไม่เติม และเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ประมาณ 10-12%

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติม

- 1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารเคลือบผิวชนิดต่างๆ ที่ใช้เกี่ยวกับเคลือบผิววัสดุยาง และสีของผิวเคลือบที่มีผลต่อการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ ที่เน้นผิวเคลือบวัสดุด้านการประหยัดพลังงาน
- 2) ควรศึกษาทดลองเคลือบผิวของวัสดุยาง ที่ปรับเปลี่ยนชนิดของสารเคลือบในแต่ละชั้นของผิวเคลือบ โดยศึกษาถึงสมบัติการยึดเกาะ การทนทานต่อการดัดโค้ง และสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผิวเคลือบบนวัสดุยาง

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับ

จากโครงการ “อิทธิพลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคายังจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้” สามารถเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ ดังนี้

- **ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมระดับชาติ**

N. Hamaviriyapornwattana, E. Wimolmala, T. Markpin and N. Sombatsompop, 2010, “Effects of Coating Thickness and TiO₂ dosage in Polyurethane Coating on Solar Reflective Index and Adhesion of Wood-Natural Rubber Sheet” – **11th Graduate Research Conference**, 12th January 2010, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, pp. 369-379.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่มีต่อสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และสมบัติทางกล-กายภาพของผลิตภัณฑ์หลังจากจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและจีลีโอไมน์ โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน และปรับเปลี่ยนความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน ทดสอบความสว่างและค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer ค่าการนำความร้อน และสมบัติทางกลด้านการยืดเคาะ และความทนทานต่อการตัดโค้งของผิวเคลือบ ก่อนและหลังการเร่งสภาวะของผิวเคลือบด้วยรังสียูวี ผลการทดลองพบว่า ความสว่างและค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มากที่สุดที่เติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วนในผิวเคลือบ แต่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของผิวเคลือบ มีค่าการนำความร้อน ระหว่าง 0.347-0.397 W/m K นอกจากนี้ ไม่พบการหลุดลอกของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนวัสดุยางธรรมชาติ โดยผลการยืดเคาะผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และไม่พบรอยแตกร้าวผิวเคลือบพอลิยูรีเทนหลังจากผ่านทดสอบการตัดโค้ง

ส่วนการศึกษากการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนหลังคาจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและจีลีโอไมน์โดยการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี ที่ระยะเวลา ดังนี้ 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง พบว่า ความสว่างของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้นตามเวลาในการเร่งสภาวะของผิวเคลือบด้วยรังสียูวี ไม่พบการหลุดลอกและรอยแตกร้าวของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนหลังจากผ่านทดสอบการตัดโค้งผิวเคลือบที่การเร่งสภาวะที่ระยะเวลาต่างๆ ส่วนการทดสอบการรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่สภาวะการใช้งานจริงของหลังคาทาง หลังคากระเบื้องลอนคู่ และหลังคากระเบื้องคอนกรีต พบว่ากระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องคอนกรีต โดยมีอุณหภูมิสูงกว่าหลังคาทางที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่เติม และเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ประมาณ 10-12%

Abstract

This research studied the effects of coating thickness and Titanium dioxide (TiO_2) dosage in polyurethane (PU) coating on solar reflective index and mechanical-physical properties of PU coated wood-natural rubber sheet. The filled titanium dioxide powder content was varied at 0, 1, 3, 5, 7, 9 and 15 parts per hundred (pph) of polyurethane. The PU coating thickness was varied at 130 150 200 250 and 300 microns. The lightness, solar reflective index, thermal conductivity, and bending and adhesion properties were of our interests before and after QUV aging. The experimental results suggested that the lightness and solar reflective index increased with increasing TiO_2 powder at 15 pph on the PU coating, but did not change with varying the PU coating thickness. The thermal conductivity obtained ranged between 0.347-0.397 W/mK and the adhesion properties of the PU coating on wood/natural rubber sheet have passed the standard peel test with no observations of cracks under a bending test.

The UV weathering tests for the PU coating on wood/natural rubber sheet were carried out by aging under UV accelerated weathering tester (QUV-UVB 313nm) at weathering period times of 168, 336, 504 and 672 hrs. The results showed that the lightness increased with UV aging time, with no observations of cracks under bending tests. Thermal radiation tests under the sun for PU coated wood/NR roof, roman roof tile, and cement roof tiles indicated that the surface temperatures for the roman roof and cement roof tiles were higher than those for PU coated wood/NR roof (both with and without titanium dioxide) about 10-12%.

สารบัญ

หน้า

ปกใน	ก
บทสรุปผู้บริหาร	ข
บทคัดย่อ	ช
Abstract	ซ
สารบัญ	ณ
รายการตาราง	ญ
รายการรูปประกอบ	ท

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2. ทฤษฎีเบื้องต้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น	5
2.1.1 องค์ประกอบของสารเคลือบ	5
2.1.2 สารยึดพอลิยูรีเทน	7
2.1.3 ผงไททานเนียมไดออกไซด์	8
2.1.4 โครงสร้างและคุณสมบัติของผงไททานเนียมไดออกไซด์	9
2.1.5 ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานของผงไททานเนียมไดออกไซด์	10
2.1.6 สมบัติการส่งผ่านของสารเคลือบผิว	11
2.1.7 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	14
2.1.8 ดัชนีหักเหและค่าการดูดกลืนแสง	19
2.1.9 ความร้อนและอุณหภูมิ	19
2.1.10 สมบัติการนำความร้อนและการแผ่รังสี	23
2.1.11 การแห้งตัวของสารเคลือบผิว	24

2.1.12	ปัจจัยที่มีต่อคุณภาพของสารเคลือบผิวโดยวิธีการพ่น	25
2.1.13	ปัจจัยที่ทำให้สีเคลือบผิวไหลย้อย	25
2.1.14	วิธีการตรวจสอบการไหลตัวของสีเคลือบผิว	25
2.1.15	มาตรฐานที่ใช้ในการวัดสี	27
2.2	เอกสารบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง	29
3.	วัตถุประสงค์ และขั้นตอนการดำเนินงาน	36
3.1	วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในโครงการวิจัย	36
3.2	สูตรยาที่ใช้ในงานวิจัย	38
3.3	แผนการดำเนินงานวิจัย	40
4.	ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล	58
4.1	การตรวจสอบคุณลักษณะของผงไททาเนียมไดออกไซด์	59
4.1.1	การตรวจสอบขนาด และรูปร่างของผงไททาเนียมไดออกไซด์	59
4.1.2	การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงไททาเนียมไดออกไซด์	59
4.2	การศึกษาสถานะในการพ่นเคลือบแผ่นยางด้วยสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน	60
4.2.1	การตรวจสอบพื้นผิวและความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	60
4.3	การศึกษาผลปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	63
4.3.1	ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	63
4.3.2	การกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ	64
4.3.3	การสะท้อนรังสีอาทิตย์ และค่าสีของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	66
4.3.4	การนำความร้อนของวัสดุ	69
4.3.5	ความทนทานต่อการขีดเกาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	70
4.3.6	การทนทานต่อการดัดโค้งผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	71
4.4	การศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนแผ่นยาง	72
4.4.1	การศึกษาสถานะในการพ่นผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ความหนาต่างๆ	72
4.4.2	การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่มีต่อความหนาผิวเคลือบ	73
4.4.3	ความทนทานต่อการขีดเกาของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	74
4.4.4	การทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบที่ความหนาต่างๆ	75
4.5	การศึกษาการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	76

หน้า

4.5.1	การตรวจสอบสีผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	76
4.5.2	ความทนทานต่อการขีดเกาผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะ	77
4.5.3	การทนทานต่อการดัดโค้งผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ผ่านการเร่งสภาวะ	77
4.5.4	การสะท้อนรังสีอาทิตย์ผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะ	78
4.5.5	การกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ	79
4.6	การทดสอบสภาวะการใช้งานจริง	80
4.7	การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	82
5.	สรุปผลการทดลอง	85
5.1	คุณลักษณะของผงไททาเนียมไดออกไซด์	85
5.2	การศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบแผ่นยางด้วยสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน	85
5.3	การศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน	85
5.4	การศึกษาผลของความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	86
5.5	การศึกษาการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนโดยการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี	86
5.6	การทดสอบสภาวะการใช้งานจริงของแผ่นยางที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทน	87
5.7	การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	87
5.8	ข้อได้เปรียบ และการใช้งานของแผ่นยางที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทน	88
5.9	ข้อเสนอแนะขยายผลการวิจัย และแนวทางการนำไปใช้งานจริง	88
	เอกสารอ้างอิง	89
	ภาคผนวก	96
	1. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมระดับชาติ	97
	2. ตอบข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ	108

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของผงสีและการเลือกใช้ผงสี	6
2.2 ค่าดัชนีมาตรฐานของรังสีอัลตราไวโอเลตตามลักษณะท้องฟ้า	19
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ	23
2.4 มาตรฐานของถ้วยวัดความหนืดของพอร์ค	26
3.1 สมบัติของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนชนิด Anti-UV Coating	38
3.2 สูตรส่วนผสมและหน้าที่ของสารเคมีที่ใช้วิจัย	39
3.3 ขั้นตอนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับสารเติมแต่ง	45
3.4 ลักษณะการยึดเกาะของฟิล์มเคลือบ	50
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของผงไททาเนียมไดออกไซด์	60
4.2 ความหนาผิวเคลือบที่ปรับเปลี่ยนระยะการพ่นเคลือบและจำนวนรอบการพ่นเคลือบ	62
4.3 ความหนาของผิวเคลือบที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทน	64
4.4 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์	67
4.5 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ	69
4.6 ผลของการยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ	70
4.7 ผลของความทนทานต่อการดัดโค้งผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ	71
4.8 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ที่ปรับเปลี่ยนความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนโดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน	74
4.9 การยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทน 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน	75
4.10 ความทนทานต่อการดัดโค้งผิวเคลือบ ที่ปรับเปลี่ยนความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน	75

4.11	การขีดเกาะผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะในเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี	77
4.12	ความทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี	78
4.13	การสะท้อนรังสีอาทิตย์ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี ที่ระยะเวลา 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง	78
4.14	ราคาสารเคมีที่ใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์หลังคายางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้	83
4.15	ราคาสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน ที่เคลือบชิ้นงานหลังคาลอนคู่ ขนาด 500x1200x5 มม. ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน	84
4.16	ค่าการนำความร้อน และราคาของวัสดุหลังคาชนิดต่างๆ	84
4.17	การเปรียบเทียบราคาวัสดุหลังคาชนิดต่างๆ	84

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
1 ผลิตภัณฑ์หลังคาของพาราที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน	2
2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิยูรีเทน	7
2.2 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์	9
2.3 การประยุกต์ใช้งานของผงไททานเนียมไดออกไซด์	11
2.4 การหักเหแสงของอนุภาคที่มีดัชนีหักเหต่างกัน	12
2.5 การหักเหของแสงในตัวกลางของผงสีที่มีดัชนีหักเหต่างกัน	13
2.6 การเลี้ยวเบนของแสงที่มีอนุภาคนาขนาดต่างกัน	13
2.7 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปรียบเทียบกับขนาดกับอนุภาคต่างๆ	14
2.8 การเกิดคลื่นเอเอ็ม	14
2.9 สี่รู้จากแท่งปริซึม	15
2.10 สเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้า	16
2.11 สเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเลต	17
2.12 ลักษณะการสะท้อนแสงของวัตถุต่างชนิดกันที่ช่วงคลื่นต่างกัน	18
2.13 การนำความร้อนผ่านผนังราบ	20
2.14 การจำลองลักษณะวัฏจักรการพาความร้อน	22
2.15 ลักษณะของ Color space	28
3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวม	43
3.2 ชุดทดลองการพ่นเคลือบระบบนิวแมติก	46
3.3 บั๊มจ่ายลม	47
3.4 ห้องพ่นเคลือบที่ติดตั้งแผงกันลม	47
3.5 ชิ้นงานแผ่นยางที่พ่นเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน	48
3.6 เครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer	51
3.7 เครื่องทดสอบ Mandrel set รุ่น MG 1412	52
3.8 เครื่องทดสอบ Thermal Conductivity Analysis	53
3.9 เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscope	54
3.10 ชิ้นงานที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทนสำหรับทดสอบการเร่งสภาวะด้วยรังสี UV	56
3.11 เครื่องทดสอบ Accelerated Weathering Tester; QUV	56
4.1 ลำดับการวิเคราะห์ผลการทดลอง	58

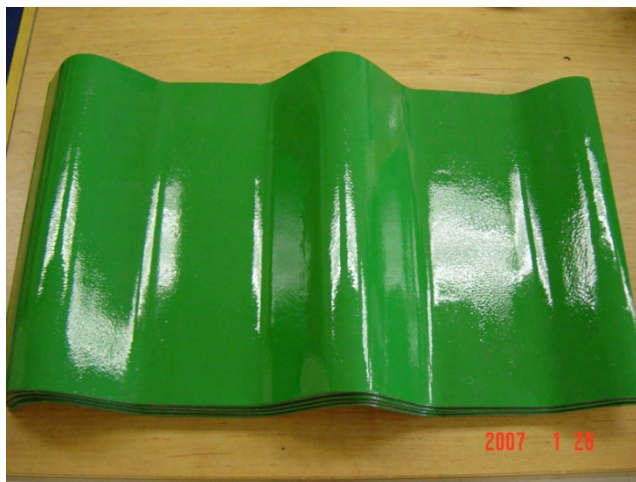
รูปที่	หน้า
4.2 ลักษณะอนุภาคของผง TiO_2 โดยใช้เทคนิค SEM	59
4.3 ลักษณะผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนชิ้นงานยาง ที่ระยะการพ่นเคลือบ 20 30 และ 40 cm และปรับเปลี่ยนจำนวนรอบการพ่นเคลือบ	61
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนจำนวนรอบการพ่น	62
4.5 ลักษณะการกระจายตัวของผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงปริมาณ TiO_2 ที่ปริมาณต่างๆ	66
4.6 แบบจำลองการผ่านของแสงที่ผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีไททาเนียมไดออกไซด์	68
4.7 ความสว่างของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์	68
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนโดยเติมผง TiO_2 ปริมาณ 15 ส่วน ที่ปรับเปลี่ยนจำนวนรอบการพ่นเคลือบ	73
4.9 ความสว่างของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนหลังผ่านการเร่งสภาวะในเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี	76
4.10 ลักษณะการกระจายตัวของผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี ที่เวลา 672 ชั่วโมง	79
4.11 แบบจำลองการทดสอบชิ้นงานหลังคาที่สภาวะการใช้งานจริง	80
4.12 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบที่สภาวะการใช้งานจริง	81
4.13 อุณหภูมิของหลังคาชนิดต่างๆ ที่ทดสอบสภาวะการใช้งานจริง	82

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน ทำให้ต้องใช้พลังงานในการใช้เครื่องปรับอากาศภายในอาคาร สำนักงานหรือที่พักอาศัยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] และพบว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ภายในอาคารมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ถูกใช้ในเครื่องปรับอากาศ [2] ปัจจุบันจึงมีการรณรงค์การใช้ไฟฟ้าอย่างประหยัด และลดความร้อนเข้าสู่ภายในตัวอาคาร ซึ่งถือเป็นวิธีที่ช่วยลดการทำงานของเครื่องปรับอากาศ ปัจจุบันนิยมการติดตั้งวัสดุฉนวนกันความร้อนใต้หลังคา อย่างไรก็ตาม การใช้ฉนวนกันความร้อนซึ่งมีปัญหามากมายด้าน อาทิเช่น การออกแบบติดตั้ง การบำรุงรักษา การหลุดลอก และการเสื่อมสภาพของฉนวนกันความร้อน เป็นต้น

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) ทำวิจัยเกี่ยวกับวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลังคาขางพารา ที่ดำเนินการวิจัยเสร็จแล้ว จำนวน 2 โครงการ โดยมีรายละเอียด ดังนี้ โครงการวิจัย “การผลิตและทดสอบหลังคาขางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับขี้เลื่อย” [3] สนับสนุนทุนวิจัยโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัทสยามยูไนเต็ด รีบเบอร์ จำกัด ศึกษาสมบัติของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงขี้เลื่อยไม้ขางพาราเพื่อผลิตเป็นหลังคาขางพารา พบว่า สามารถเติมปริมาณผงขี้เลื่อยไม้ได้ถึง 80 ส่วนในยางร้อยละ 20 โดยเติมในยางธรรมชาติเกรด STR 20 ซึ่งเพิ่มสมบัติทางด้านความแข็งแรง และความแข็งแรงที่มีความเหมาะสมที่ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลังคาขาง ที่พัฒนาในรูปแบบของยางแข็ง (Ebonite rubber) โดยใช้ปริมาณกำมะถันที่ 20-30 phr ที่สามารถทนทานต่อแรงกระทำภายนอก และสภาวะแวดล้อมขณะใช้งานได้อย่างดี ผลิตภัณฑ์หลังคาขางที่ผลิตได้นี้ เป็นทางเลือกสามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้หลังคาชนิดอื่นๆ ที่มีขายในปัจจุบันได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์หลังคาขางพารายังมีสมบัติเด่นด้านความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าหลังคากระเบื้องทั่วไปประมาณ 2-3 เท่า ผลงานวิจัยโครงการระยะที่ 1 ที่ผ่านมา ได้หลังคาขางพาราที่มีสมบัติเชิงกลและความเป็นฉนวนที่ดี แต่ยังมีปัญหาทางด้านการทนต่อสภาวะแวดล้อม ที่ยังมีการหลุดลอกของสีเมื่อสัมผัสกับน้ำ จึงนำไปสู่โครงการวิจัยระยะที่ 2 โครงการ “การพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคาขางประหยัดพลังงานจากวัสดุผสมยางและขี้เลื่อย” [4] สนับสนุนโดย สกว. และบริษัท สยามยูไนเต็ด รีบเบอร์ จำกัด ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลผลิตภัณฑ์หลังคาขาง โดยใช้สาร



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์หลังคาขางพาราที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน

จากงานวิจัยทางด้านการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคาขางยังมีรายงานการวิจัยที่ยังไม่แพร่หลายนักในการนำผงไททาเนียมไดออกไซด์เติมลงในสารเคลือบพอลิยูรีเทน เพื่อลดปริมาณการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคาขาง ซึ่งการศึกษาการนำผงไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับสารสะท้อนความร้อนที่ใช้ในงานก่อสร้าง [5] มีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงที่สามารถนำไปประยุกต์เคลือบผิวบนหลังคาขางจากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติ และซีเมนต์ได้ เนื่องจากผงไททาเนียมไดออกไซด์สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar reflectance) ได้สูง ซึ่งสามารถลดปริมาณความร้อนที่สะสมบนแผ่นหลังคา และผลิตภัณฑ์หลังคาขางพารามีสมบัติเด่นทางด้านความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ซึ่งสามารถลดพลังงานความร้อน ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารได้ ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลง นอกจากนี้ ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์หลังคาขางเป็นการลดต้นทุน และลดปัญหาการใช้วัสดุฉนวนกันความร้อนด้วย

คณะวิจัยฯ จึงมีความสนใจในการศึกษาผลของการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ลงในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเชิงปริมาณ และผลของความหนาที่เหมาะสมของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคาขางธรรมชาติผสมผงซีเมนต์ โดยผล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสถานะและปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนหลังคayangพาราที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อน และสมบัติทางกล-กายภาพ ของผลิตภัณฑ์หลังคayangจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและจีลีโอไมท์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนหลังคayangพาราที่มีต่อสมบัติ การถ่ายเทความร้อน และสมบัติทางกล-กายภาพ ของผลิตภัณฑ์หลังคayangจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและจีลีโอไมท์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 วัสดุผสมยางธรรมชาติและจีลีโอไมท์
- 1.3.2 ผลิตภัณฑ์หลังคayangพารา
- 1.3.3 วิธีการทำให้ยางคงรูปแบบทั่วไป (Conventional Vulcanization)
- 1.3.4 ยางแข็งอีโบนไนซ์ (Ebonite Rubber)
- 1.3.5 เตรียมยางคอมปาวด์ผสมกับสารเติมแต่งด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่
- 1.3.6 สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน
- 1.3.7 ผงไททาเนียมไดออกไซด์เกรดการค้า ชนิด RUTILE TITANIUM DIOXIDE
- 1.3.8 วิธีการพ่นเคลือบระบบแรงดันลม
- 1.3.9 ทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐานในรายละเอียดตามแผนงานวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: การพัฒนาต่อ ยอดงานวิจัย จากโครงการหลังคayangพาราจากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับจีลีโอไมท์ เน้นทางด้านผิวเคลือบสะท้อนความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

- 1.4.2 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์: สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ในอุตสาหกรรมสีพอลิยูรีเทน เพื่อผลิตสีที่อนุรักษ์พลังงาน
- 1.4.3 ด้านวิชาการ: จัดทำวิทยานิพนธ์ และเผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบบทความวิจัยในวารสารวิชาการ ทั้งในประเทศ และต่างประเทศ
- 1.4.4 ด้านอื่นๆ: เป็นแนวทางในการเชื่อมโยงงานวิจัยระหว่างภาครัฐ และภาคอุตสาหกรรมที่อาจสามารถนำผลงานไปใช้ต่อยอดได้จริงในเชิงพาณิชย์

บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1.1 องค์ประกอบของสารเคลือบ

วัตถุประสงค์ในการเคลือบผิวมีด้วยกัน 2 ประการ คือ เพื่อป้องกันพื้นผิวจากสภาวะต่างๆ เช่น ความชื้น โอโซน และยูวี เป็นต้น และเพื่อตกแต่งให้สวยงาม ซึ่งสารเคลือบมีองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง คือ สารยึดหรือสิ่งนำสี ผงสี และสารเติมแต่ง มีรายละเอียดดังนี้ [6]

2.1.1.1 สารยึด (Binder)

สารยึดทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคของสารประกอบในสีเข้าด้วยกันทำให้เกิดเป็นฟิล์มติดกับพื้นผิวที่ถูกเคลือบ ซึ่งสารยึดมีหลายประเภทตามลักษณะการเคลือบผิว ที่เหมาะสำหรับการใช้งานภายนอกอาคาร นั้นต้องมีสมบัติทนต่อการเสื่อมสภาพจากแสงอัลตราไวโอเลต ความร้อน และสภาพแวดล้อม ชนิดของสารยึด ได้แก่ พอลิยูรีเทน อะคริลิกอิมัลชัน เป็นต้น

2.1.1.2 ผงสี (Pigment)

เป็นสารที่ให้สีเพื่อความสวยงามและมีความสามารถในการปิดบังพื้นผิว ซึ่งผงสีถูกจำแนกตามแหล่งกำเนิดและส่วนประกอบได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) ผงสีอนินทรีย์ (Inorganic Pigment) ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

(1) **Earth Pigments** เป็นผงสีธรรมชาติที่ได้จากการนำหินต่างๆ ไปบด ล้าง และทำให้แห้ง ได้แก่ ดินเหลือง (Orches) ดินเผาสีน้ำตาล (Sienna) ดินสีน้ำตาลไหม้ (Umbers) และ Green earth

(2) **Mineral Pigments** เป็นผงสีที่ได้จากแร่ธาตุ ได้แก่ โดโลไมต์ (Dolomite) และแคลเซียมคาร์บอเนต

(3) **ผงสีอนินทรีย์สังเคราะห์ (Synthetic Inorganic Pigments)** เตรียมได้โดยวิธีตกตะกอนระหว่างปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ทำให้เกิดเป็นผงสีตกตะกอนออกมาแล้วกรองออก ได้แก่ ไททานิยมไดออกไซด์ ชิงก์ออกไซด์ และอัลตรามารีน (Ultramarine)

(4) **ผงสีโลหะ (Metallic Pigments)** เป็นผงสีที่ได้จากการบดโลหะให้ละเอียด เช่น ผงอลูมิเนียม ผงบรอนซ์ และผงสังกะสี

2) พงสีอินทรีย์ (Organic pigments) แบ่งได้ 3 ชนิด ดังนี้

(1) **Pigment dyestuffs** เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสีและไม่ละลายในตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ พงสีเหล่านี้ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดเกลือได้ ได้แก่ สารประกอบอะโซ (Azo) ที่เป็นสี เช่น โทลูอิดีนเรด (Toluidine red) พาราเรด (Para reds) เป็นต้น

(2) **โทเนอร์ (Toner pigments หรือ Toners)** คือ สีข้อมที่เป็นกรดหรือด่างที่ละลายน้ำได้ แต่ถูกเปลี่ยนเป็นพงสีโดยตกตะกอนด้วยเกลือโลหะหรือตกตะกอนด้วยกรด เกลือโลหะที่ใช้ ได้แก่ เกลือของตะกั่ว แคลเซียม แบเรียม และสตรอนเทียม ส่วนกรดที่ใช้ ได้แก่ กรดแทนนิก (Tannic acid) กรดฟอสโฟทังสติก (Phosphotungstic acid) และกรดฟอสโฟโมลิบดีก (Phosphomolybdic acid)

(3) **เลก (Lake pigments หรือ Lakes)** คือ พงสีที่เตรียมจากสีข้อมที่ละลายน้ำได้ โดยทำให้ตกตะกอนลงบนตัวยึด (Substrate) ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ และโดยมักใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ สีข้อมที่ละลายน้ำได้เมื่อไปเกาะบนตัวยึดแล้วไม่ละลายน้ำ

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพงสีและการเลือกใช้พงสี

สมบัติ/ลักษณะสี	ชนิดของพงสี	ข้อเสนอแนะการใช้งาน
1. สีเข้มสดใส	อินทรีย์	พงสีอินทรีย์ให้สีเข้ม ใช้ในปริมาณน้อย พงสีอนินทรีย์มีสีอ่อนต้องใช้ในปริมาณมาก
2. สีขาว และสีดำ	อนินทรีย์	พงสีขาวบริสุทธิ์ที่สุดคือ ไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นพงสีอนินทรีย์ และพงสีดำที่สุด คือ คาร์บอนแบล็ก (พงสีอนินทรีย์)
3. การไม่เกิดการคายสี	อนินทรีย์	พงสีอนินทรีย์ไม่ละลายน้ำในตัวทำละลายใน ขณะที่พงสีอินทรีย์ละลายได้
4. ความคงทนต่อแสง	อนินทรีย์	พันธะในโมเลกุลของพงสีอนินทรีย์ทนต่อแสง อัลตราไวโอเลตได้มากกว่า
5. เสถียรภาพต่อความร้อน	อนินทรีย์	พงสีอินทรีย์ส่วนใหญ่สลายตัว หรือหลอมเหลว ที่อุณหภูมิต่ำกว่า

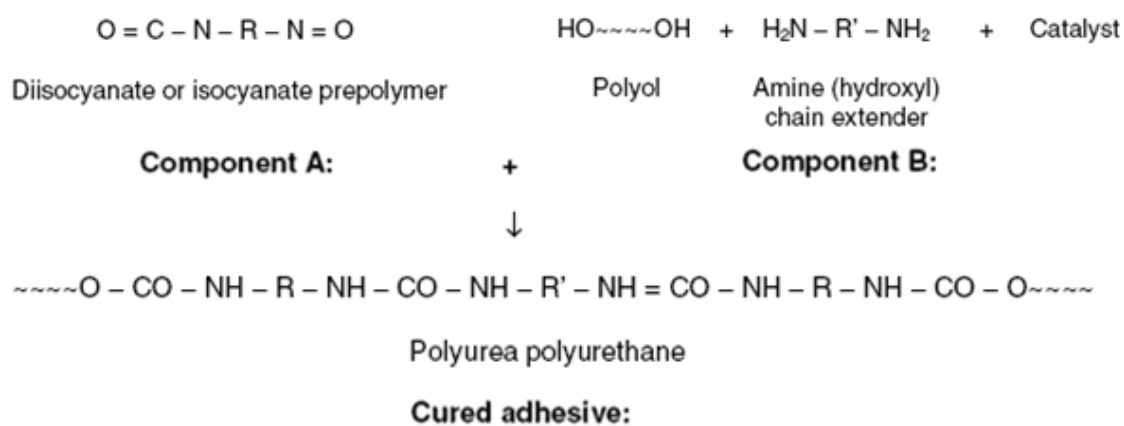
พงสีอนินทรีย์และพงสีอินทรีย์มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ซึ่งสมบัติของพงสีแต่ละชนิด และการนำไปใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งพงสีอนินทรีย์มีจุดเด่นกว่าพงสีอินทรีย์หลายประการ เช่น ความ

2.1.1.3 สารเติมแต่ง (Additives)

สารที่เติมในสีเคลือบเพื่อให้สีเคลือบมีสมบัติตามต้องการ เช่น ช่วยให้สีมีความเรียบ แห้งเร็ว ไม่ขึ้นรา และมีการกระจายตัวของผงสีที่ดี สารเติมแต่งที่นิยมใช้ในสีเคลือบได้แก่ สารป้องกันการเกิดฟอง สารช่วยการกระจายตัว สารป้องกันเชื้อรา สารเร่งขึ้น สารเร่งแห้ง เป็นต้น

2.1.2 สารยึดพอลิยูรีเทน (Polyurethane: PU)

สารพอลิยูรีเทนผลิตจากปฏิกิริยาของพอลิไอโซไซยาเนตกับไดไฮดรอกซีไฮโดรคาร์บอน หรือพอลิเมอร์ไดไฮดรอกซีไฮโดรคาร์บอน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม พอลิยูรีเทนส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต คือ ไม่สามารถหลอมเหลวและนำมาขึ้นรูปใหม่ได้ ซึ่งผลิตออกมาหลายรูปแบบ เช่น โฟมยืดหยุ่น โฟมแข็ง สารเคลือบป้องกันสารเคมี กาว สารพ่นสี และอีลาสโตเมอร์ โครงสร้างทางเคมีของพอลิยูรีเทน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิยูรีเทน [7]

2.1.2.1 คุณสมบัติของพอลิยูรีเทน

- 1) มีความคงทนต่อแสงอัลตราไวโอเลต
- 2) มีสมบัติทางกลที่ดี
- 3) มีความคงทนต่อเคมีภัณฑ์ที่กัดกร่อน
- 4) เป็นฉนวนกันความร้อน และดูดกลืนเสียงได้ดี
- 5) มีการยึดเกาะผิวหน้าดี
- 6) สามารถซ่อมแซมพื้นได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว
- 7) สามารถทำความสะอาดได้ตามที่ต้องการ
- 8) ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี
- 9) ทนต่อการขูดขีด

2.1.2.2 ประโยชน์ใช้สอยของพอลิยูรีเทนสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ ดังนี้

- 1) ใช้สำหรับเคลือบพื้นกีฬา และลู่วิ่ง
- 2) ใช้สำหรับเคลือบพื้นโรงงานเพื่อความสะอาด และสวยงาม
- 3) ใช้สำหรับงานระบบกันซึมทั้งแบบที่สัมผัสโดยตรงและเป็นแผ่น Membrane
- 4) ใช้สำหรับเคลือบพื้นไม้ หรือน้ำมันเคลือบแข็ง
- 5) ใช้สำหรับเคลือบถัง และท่อส่งในระบบอุตสาหกรรมต่างๆ

2.1.3 ผงไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2)

ผงไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นผงอนินทรีย์ที่มีเสถียรภาพสูง มีสีขาว ทึบแสง ช่วยสะท้อนรังสียูวีในแสงแดด สารไททาเนียมไดออกไซด์สะท้อนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ จึงเป็นเม็ดสีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมาก แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

- 1) **Anatase** มีโครงสร้างเป็น Tetragonal มีความขาวมาก มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index) เท่ากับ 2.55 การนำไปใช้งานสามารถเกิดเป็นฝุ่น (Chalking) ได้ง่าย
- 2) **Rutile** มีโครงสร้างเป็นแบบ Tetragonal มีสีเหลืองเล็กน้อยหากเทียบกับ Anatase มีค่าดัชนีหักเห เท่ากับ 2.76 ลักษณะโครงสร้างที่หนาแน่นกว่า มีความเสถียร และมีความทึบแสงมากกว่า Anatase มีความต้านทานการเกิดเป็นฝุ่นได้ดี ถ้านำไปใช้งานภายนอก

3) **Brookite** มีโครงสร้างแบบ Orthorhombic แต่ไม่นิยมนำมาใช้เป็นผงสี เนื่องจากมีราคาแพง ผงไททาเนียมไดออกไซด์ มีสมบัติในการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตได้ดี และสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของชิ้นงานได้ ที่เหมาะกับการนำมาใช้ในงานผงสีที่มีโครงสร้างแบบ Anatase และ Rutile

2.1.4 โครงสร้างและคุณสมบัติของผงไททาเนียมไดออกไซด์

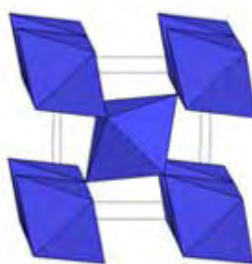
โครงสร้างของผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่พบตามธรรมชาติมีโครงสร้างผลึก 4 แบบ [8] คือ

- 1) อนาเทส (Anatase) โครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal)
- 2) บรูคไคท์ (Brookite) โครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)
- 3) รูไทล์ (Rutile) โครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal)
- 4) ไททาเนียมไดออกไซด์บี โครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic)

โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 มีลักษณะเป็นพีรามิดฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกัน เนื่องจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอนาเทส เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ส่วนโครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยด้านส่วนยอด และส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล



(a) อนาเทส



(b) รูไทล์



(c) บรูคไคท์

รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ [8]

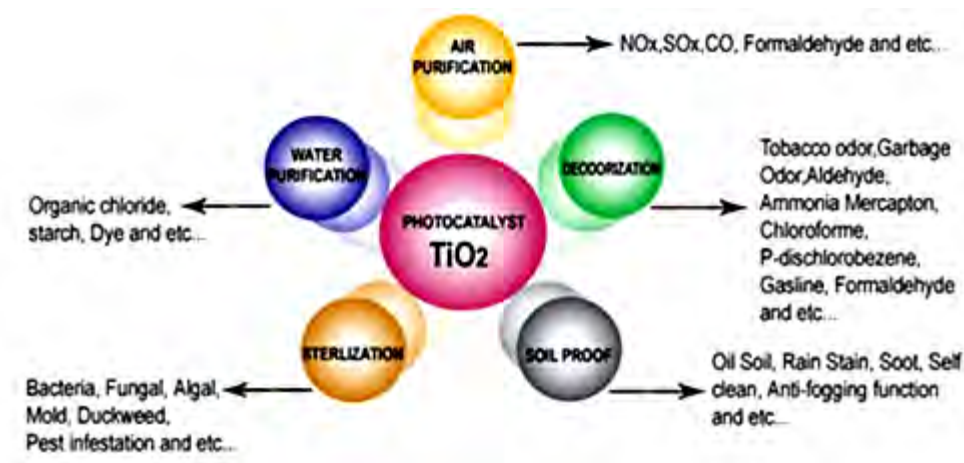
โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์มีอยู่หลายชนิด โครงสร้างแบบอนาเทส และรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแบบโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอนาเทสเป็นรูไทล์ค่อนข้างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมาก ในการกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) หรือเซรามิกส์ที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (Membrane) นอกจากนี้ มีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าว เช่น ความดัน ปริมาณผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก

การประยุกต์นำผงไททาเนียมไดออกไซด์ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โครงสร้างผลึกแบบ อนาเทส และรูไทล์เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป โครงสร้างผลึกอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา สูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ ผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ (อนาเทส 70-75% และรูไทล์ 30-25%) พบว่าประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทส โดยมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ ดังนี้ พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน ขนาดของอนุภาคผลึก และวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไททาเนียมไดออกไซด์

2.1.5 ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งานของผงไททาเนียมไดออกไซด์

ผงไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียมกลุ่มโลหะทรานซิชัน ผงไททาเนียมไดออกไซด์นำมาใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษสูง ราคาไม่แพงมาก และมีสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์หลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไททาเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้ด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น [9] เช่น การเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (Photo catalysis) เป็นต้น เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าครุฑการหักเหสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน (Silicon) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin film optical device) และนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้ ผงไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม ซึ่งผงไททา

นอกจากผงไททาเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมแล้ว ผงไททาเนียมไดออกไซด์สามารถนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) ได้ดีด้วย โดยสามารถใช้เป็นตัวเพิ่มความสามารถ (Promoter) ในการทำปฏิกิริยา และตัวรองรับ (Support) ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยา เช่น การกำจัดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) การกำจัดสารประกอบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (เช่น ไดออกซิน สารประกอบคลอรีน) การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา Gas shift reaction กระบวนการสังเคราะห์สาร Fischer-Tropsch และการกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ (H_2S , SO_2) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 การประยุกต์ใช้งานของผงไททาเนียมไดออกไซด์ [11]

2.1.6 สมบัติการส่งผ่านของสารเคลือบผิว

2.1.6.1 สมบัติการสะท้อน (Reflection)

เมื่อแสงมีการเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง แสงจะมีการสะท้อน การหักเห และการเลี้ยวเบน ซึ่งงานสีเคลือบนั้นสมบัติการสะท้อนของรังสีที่เกิดขึ้น ขึ้นกับความแตกต่างของดัชนีหักเห (Refractive index: n) ระหว่างผิวกับอากาศโดยรอบ ซึ่งภายในสีประกอบด้วยผงสี และสารยึด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ

$$\text{Reflection coefficient} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1)$$

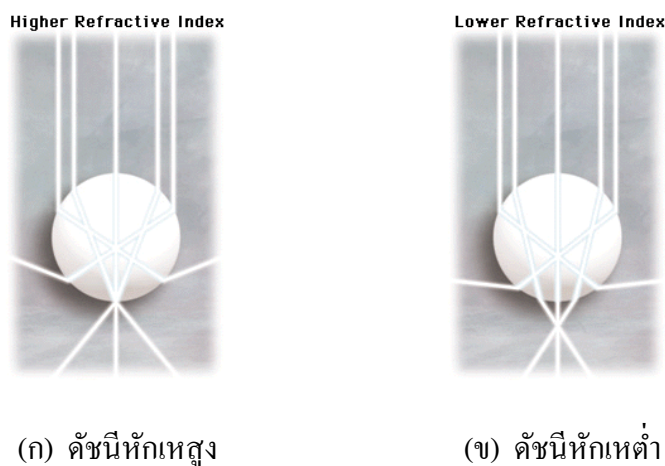
เมื่อ n_1 คือ ดัชนีหักเหของผงสี

n_2 คือ ดัชนีหักเหของสารยึด

ดังนั้น ผงสีที่มีค่าดัชนีหักเหสูงจะส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูง โดยที่การสะท้อนรังสีของสีเคลือบ หาได้จากค่าการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 นาโนเมตร ถึง 2100 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer และนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM E891 (1992)

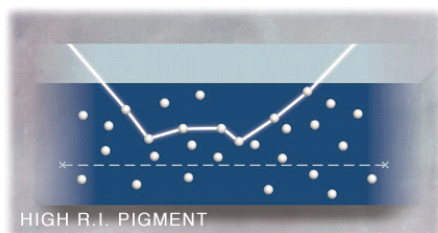
2.1.6.2 สมบัติการหักเห (Refraction)

การหักเหของคลื่นเกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ซึ่งคลื่นมีความสามารถในการเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากตัวกลางทั้งสองมีค่าดัชนีหักเหที่ไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาการหักเหของแสงของอนุภาคเดี่ยว ในรูปที่ 2.4 พบว่า อนุภาคที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า สามารถเกิดการกระเจิงแสงได้มาก ทำให้เกิดการโค้งงอของแสงได้มาก

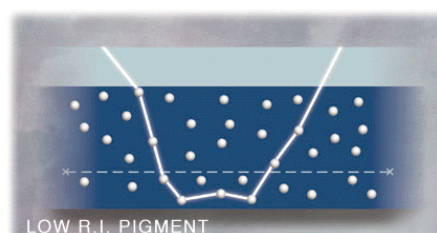


รูปที่ 2.4 การหักเหแสงของอนุภาคที่มีดัชนีหักเหต่างกัน [12]

เมื่อเปรียบเทียบการหักเหของแสงในฟิล์ม ซึ่งมีอนุภาคผงสีที่มีดัชนีการหักเหที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 พบว่า ฟิล์มที่ผงสีที่มีดัชนีหักเหสูง จะมีการหักเหของแสงมากกว่าฟิล์มที่มีดัชนีหักเหต่ำ จึงทำให้ระยะในการเดินทางของแสงสั้นกว่า



(ก) ผงสีมีดัชนีหักเหสูง



(ข) ผงสีมีดัชนีหักเหต่ำ

รูปที่ 2.5 การหักเหของแสงในตัวกลางของผงสีที่มีดัชนีหักเหต่างกัน [12]

2.1.6.3 สมบัติการเลี้ยวเบน (Diffraction)

การเลี้ยวเบนของคลื่นเกิดจากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคที่อยู่ในผิวเคลือบ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคทำให้เกิดการโค้งงอของคลื่น ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้มีการโค้งงอของแสงได้น้อย เมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทำให้แสงสามารถเลี้ยวเบนได้มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.6



(ก) อนุภาคนขนาดเล็ก

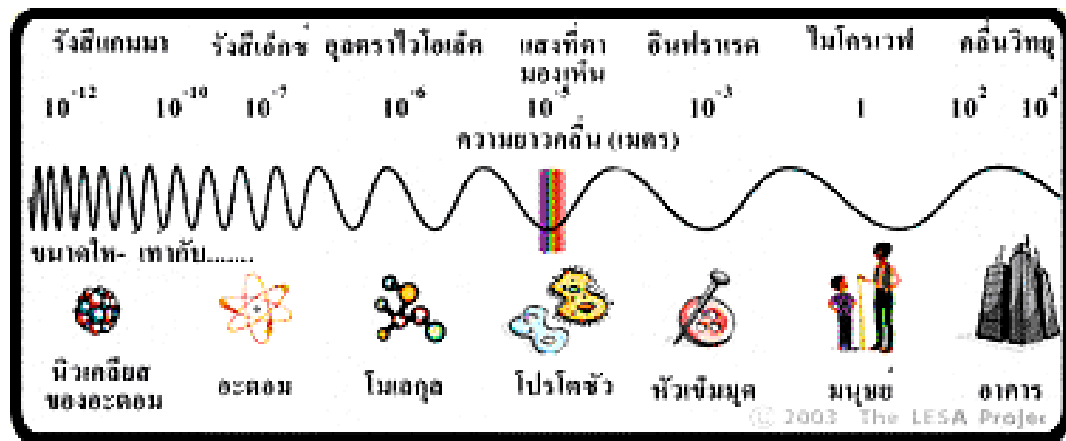


(ข) อนุภาคนขนาดใหญ่

รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของแสงที่มีอนุภาคนขนาดต่างกัน [12]

2.1.7 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum)

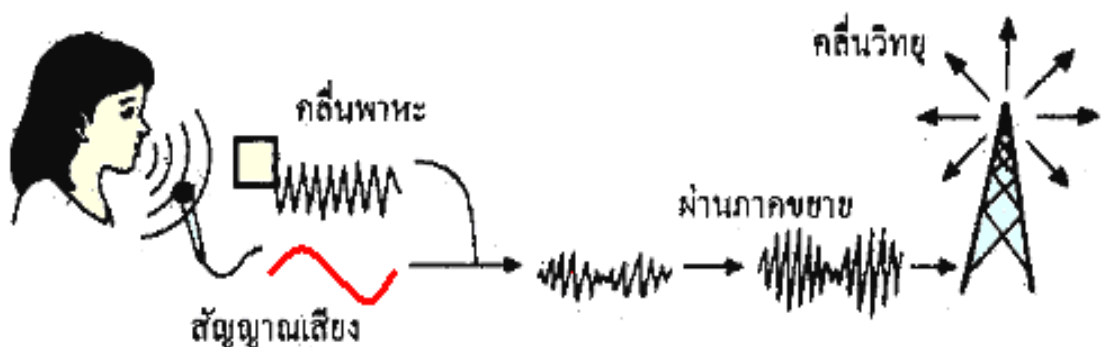
สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นช่วงกว้างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่หลากหลาย เมื่อความถี่มากก็มีประสิทธิภาพมาก แบ่งเป็นช่วงความถี่คลื่นต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนี้



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเปรียบเทียบกับขนาดกับอนุภาคต่างๆ [13]

2.1.7.1 คลื่นวิทยุ

มีความถี่ในช่วง $10^4 - 10^9$ Hz ใช้รับส่งข่าวสาร ความถี่ช่วง 530 – 1600 kHz เป็นคลื่นวิทยุระบบเอเอ็ม (A.M. = Amplitude Modulation) เป็นการผสมคลื่นสัญญาณไฟฟ้าเข้ากับคลื่นวิทยุที่เป็นคลื่นพาหะโดยการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด นอกจากนี้ อาจส่งคลื่นความถี่สูงกว่านี้เรียกว่า คลื่นสั้น (SW = Short Wave) และคลื่นยาว (LW = Long Wave) ซึ่งสามารถสะท้อนบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ดี เรียกว่า คลื่นฟ้า แสดงคลื่นเอเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดคลื่นเอเอ็ม [13]

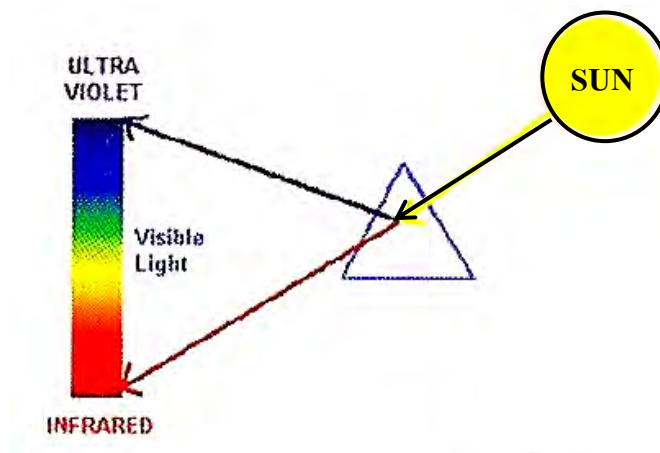
คลื่นวิทยุอีกระบบหนึ่ง เรียกว่าระบบเอฟเอ็ม (F.M. = Frequency Modulation) เป็นการผสมคลื่นสัญญาณไฟฟ้าเข้ากับคลื่นวิทยุที่เป็นคลื่นพาหะ โดยให้ความถี่ของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณเสียง ซึ่งมีความถี่ที่ระดับ 88 – 108 MHz หรือความยาวคลื่น 2.8 – 3.4 เมตร (ภาคขยายที่กว้างกว่าคลื่น A.M.) ซึ่งคลื่นเอฟเอ็มส่วนใหญ่เป็นคลื่นระดับต่ำโดยที่คลื่นเคลื่อนขนานไปบนพื้นโลก

2.1.7.2 คลื่นโทรทัศน์และไมโครเวฟ

มีความถี่ในช่วง $10^8 - 10^{12}$ Hz ใช้ส่งเพื่อการบันเทิงและการสื่อสารโดยใช้สถานีย่อยรับต่อกัน หรือใช้ดาวเทียมรับส่งเพราะสามารถทะลุบรรยากาศโลกออกไปภายนอกได้ การใช้งานนำไปใช้ตรวจจับวัตถุ เรียกว่า เรดาร์

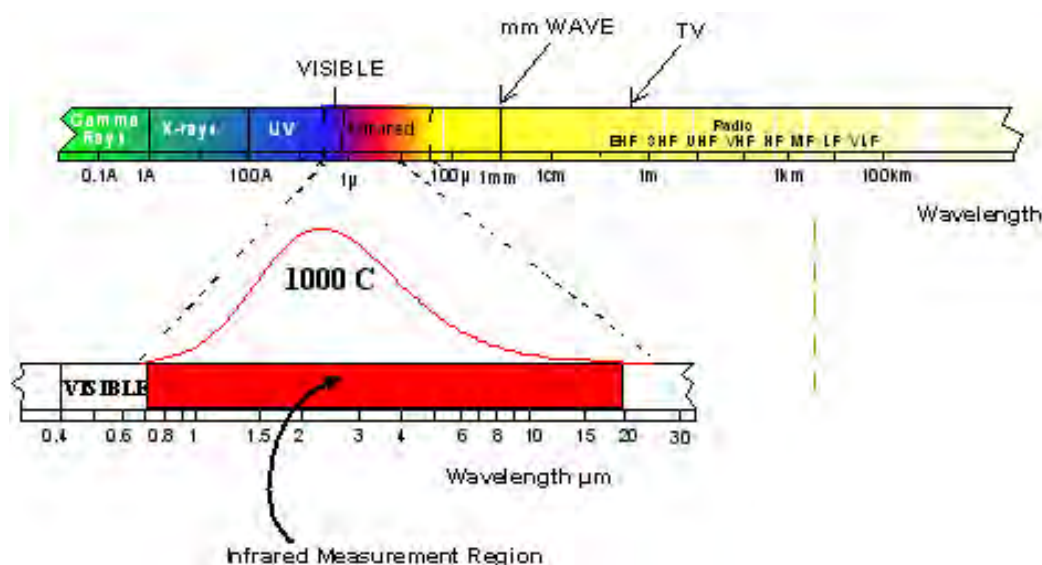
2.1.7.3 รังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อน

มีความถี่ในช่วง $10^{11} - 10^{14}$ Hz หรือความยาวคลื่น $10^{-3} - 10^{-6}$ เมตร วัตถุเมื่อได้รับรังสีความร้อน อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น เพราะพลังงานของคลื่นทำให้อะตอมสั่นมากขึ้น วัตถุที่มีอุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน มีคลื่นรังสีอินฟราเรด นิยมใช้เป็นคลื่นของรีโมทคอนโทรล (Remote control) ใช้ถ่ายภาพอินฟราเรด เพราะสามารถทะลุทะลวงผ่านเมฆหมอกได้ การนำไปใช้งานในเส้นใยนำแสง ส่วนคลื่นรังสีอินฟราเรดหรือคลื่นรังสีความร้อน ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ คือ Sir William Herschel พบรังสีอินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared ray) ในปี ค.ศ.1800 และทำการทดลองวัดอุณหภูมิของแถบสีต่างๆ ที่เปล่งออกมาเป็นสีรุ้งจากปริซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สีรุ้งจากแท่งปริซึม [14]

และพบว่าอุณหภูมิความร้อนเพิ่มขึ้นตามลำดับและสูงสุดที่แถบสีสีแดง ในความเป็นจริงนั้นการที่เขาค็อนเทอร์โมมิเตอร์จากแถบสีที่ไม่สว่างไปยังแถบสีสีแดง ซึ่งเป็นแถบสีที่สั้นสุดของสเปกตรัม และอุณหภูมิสูงขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งเรียกว่า “อินฟราเรด” ซึ่งสายตาของมนุษย์ธรรมชาติได้ออกแบบให้สามารถมองเห็นคลื่นได้ในระดับหนึ่ง เรียกว่า “รังสีการมองเห็น” (Visible light) โดยอยู่ในรูปของความสว่างสามารถมองเห็นรังสีในย่านแคบๆ หรือเรียกว่า ย่านสเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งถ้ามองด้านซ้ายของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าติดกับย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งไม่สามารถมองเห็นในย่านนี้ และส่วนด้านขวาของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าติดกับย่านรังสีอินฟราเรดซึ่งก็ไม่สามารถมองเห็นได้เช่นกัน



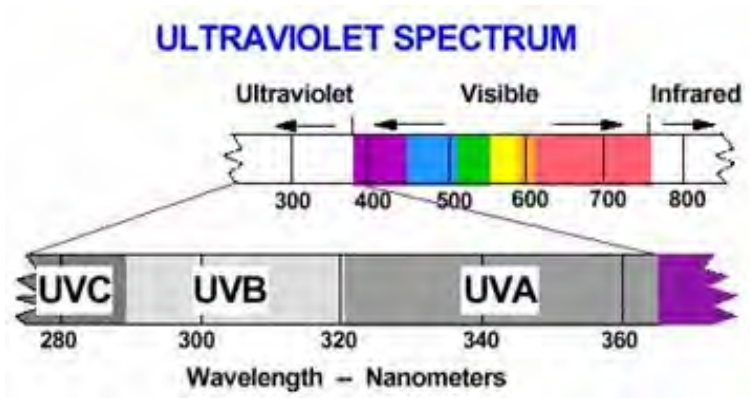
รูปที่ 2.10 สเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้า [14]

2.1.7.4 แสง

มีความถี่ในช่วง 10^{14} Hz หรือความยาวคลื่น $4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$ เมตร ซึ่งมีความถี่ของแสงสีจากน้อยไปหามาก คือ แดง ส้ม เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม และม่วง รวมกันเป็นแสงสีขาว

2.1.7.5 รังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสียูวี

มีความถี่ในช่วง $10^{15} - 10^{18}$ Hz ส่วนใหญ่เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ รังสีนี้ทำให้เกิดประจุอิสระและไอออนในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ วงการแพทย์ใช้รักษาโรคผิวหนัง รังสีที่มีความเข้มสูงเป็นอันตรายต่อผิวหนังและตา นอกจากนี้ รังสีอัลตราไวโอเล็ตเกิดจากไอปรอทถูกอิเล็กตรอนชนในหลอดฟลูออเรสเซนต์ มีการสะท้อนเกิดแสงขาว รังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถวัดได้ในรูปกำลังงานการแผ่รังสี



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเลต [15]

รังสีอัลตราไวโอเลต ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.11

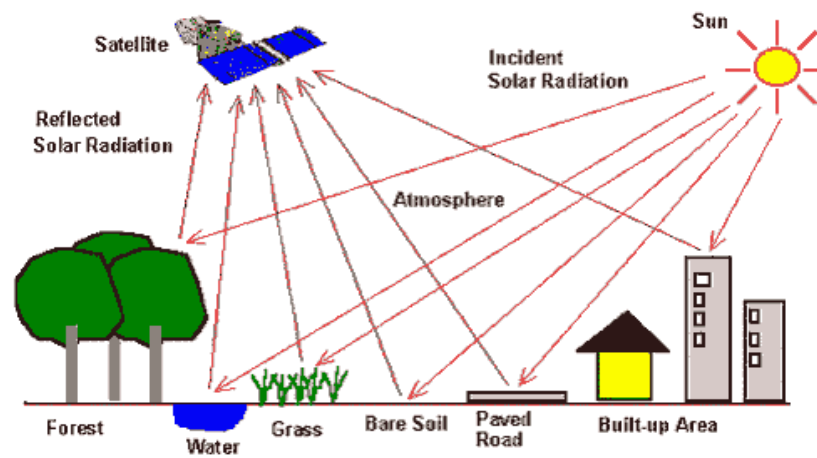
- 1) **UV-C** ช่วงความยาวคลื่น 100-280 นาโนเมตร ถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมดโดย โอโซน และออกซิเจนในบรรยากาศ มีความเข้มสูงที่สุดของช่วง UV แต่ถูกดูดกลืนไว้เกือบหมด เช่น ใช้รังสี UV-C ที่ปล่อยจากหลอดซึ่งใช้สำหรับฆ่าเชื้อโรค (Germicidal lamp)
- 2) **UV-B** ช่วงความยาวคลื่น 280-315 นาโนเมตร ถูกดูดกลืนเป็นส่วนใหญ่และส่องถึงพื้นโลกประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์มีผลในการสร้างวิตามินดีในเวลาสั้นๆ แต่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตมากที่สุด ทำให้ผิวหนังแดงไหม้เกรียม มีการสะสมทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง โรคเกี่ยวกับตา และยับยั้งระบบภูมิคุ้มกันร่างกายในระยะยาว
- 3) **UV-A** ช่วงความยาวคลื่น 315-400 นาโนเมตร ไม่ดูดกลืนโดยโอโซน แต่ส่วนมากไม่ทำลายสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ส่องถึงพื้นโลกได้ แต่มีอันตรายไม่มาก มีความจำเป็นต่อร่างกายในการสังเคราะห์วิตามินดี แต่หากมากเกินไปจะทำให้ผิวหนังหยาบกร้าน ยับยั้งภูมิคุ้มกันร่างกาย ทำให้ผิวหนังแดงและโรคเกี่ยวกับตาน้อยกว่า UV-B

2.1.7.6 รังสีเอ็กซ์

ความถี่ในช่วง $10^{16} - 10^{22}$ Hz หรือความยาวคลื่น $10^{-8} - 10^{-13}$ เมตร สามารถทะลุสิ่งกีดขวางที่มีความหนาได้ ในทางอุตสาหกรรมใช้ตรวจรอยร้าวของชิ้นส่วนโลหะ ใช้ตรวจจับอาวุธได้ทางการแพทย์ใช้ตรวจร่างกายเกิดภาพบนฟิล์มได้ ใช้ตรวจสอบโครงสร้างของผลึกของสารได้

2.1.7.7 รังสีแกมมา

มีความถี่สูงกว่ารังสีเอกซ์ เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีและเป็นรังสีที่มาจากนอกโลกที่เรียกว่า รังสีคอสมิก โดยที่ความยาวช่วงคลื่น และความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ดวงอาทิตย์ มีอุณหภูมิ 6000 K แผ่พลังงานในช่วงคลื่นแสงมากที่สุด วัตถุต่างๆ บนพื้นโลกส่วนมากมีอุณหภูมิประมาณ 300 K แผ่พลังงานในช่วงอินฟราเรดความร้อนมากที่สุด คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ ซึ่งถูกโมเลกุลอากาศ และฝุ่นละอองในอากาศ ดูดกลืน และขงวไว้ทำให้คลื่นกระเจิงคลื่นออกไป คลื่นส่วนที่กระทบถูกวัตถุสะท้อนกลับ และเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศมากระทบสู่อุปกรณ์วัดคลื่น เนื่องจากวัตถุมีคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ช่วงคลื่นต่างกัน ดังนั้น จึงสามารถใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการสำรวจจากระยะไกลได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะการสะท้อนแสงของวัตถุต่างชนิดกันที่ช่วงคลื่นต่างกัน [16]

แสดงลักษณะการสะท้อนแสงเปรียบเทียบระหว่างวัตถุต่างชนิดกันที่ช่วงคลื่นต่างกัน โดยที่ความสามารถในการสะท้อนแสงของวัตถุต่างๆ บนพื้นโลกสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) น้ำสะท้อนแสงในช่วงแสงสีน้ำเงินได้ดี และดูดกลืนคลื่นในช่วงอื่นๆ โดยที่น้ำมีการดูดกลืนคลื่น IR ช่วง 0.91 mm ในช่วงนี้ได้ดีมาก
- 2) ดินสะท้อนแสงในช่วงคลื่นแสงได้ดีทุกสี
- 3) พืชสะท้อนแสงช่วงสีเขียวได้ดี และสะท้อนช่วงอินฟราเรดได้ดีกว่าน้ำและดินมาก

2.1.8 ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลต (UV Index)

ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงระดับความแรงของรังสีอัลตราไวโอเลตจากแสงแดด ซึ่งเป็นค่าที่ระบุเฉพาะสถานที่ในแต่ละวัน โดยองค์การอนามัยโลก องค์การอุตุนิยมวิทยาโลก โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ และ ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ได้ร่วมกันกำหนด ซึ่งระดับของค่า ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลต แบ่งออกเป็น 5 กลุ่มตามระดับความรุนแรงของผลกระทบต่อร่างกาย [17] และมีค่าดัชนีรังสีอัลตราไวโอเลตมาตรฐาน ตามลักษณะท้องฟ้าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าดัชนีมาตรฐานของรังสีอัลตราไวโอเลตตามลักษณะท้องฟ้า [18]

SKY	UV INDEX*													
Clear 	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Partly cloud 	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	13	
Cloudy 	2	3	4	4	5	6	7	7	8	9	9	10	11	
Overcast 	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	

*หมายเหตุ: UV INDEX ช่วง 1-2 ระดับความรุนแรงของผลกระทบต่อร่างกายต่ำ

UV INDEX ช่วง 3-5 ระดับความรุนแรงของผลกระทบต่อร่างกายปานกลาง

UV INDEX ช่วง 6-7 ระดับความรุนแรงของผลกระทบต่อร่างกายสูง

UV INDEX ช่วง 8-10 ระดับความรุนแรงของผลกระทบต่อร่างกายสูงมาก

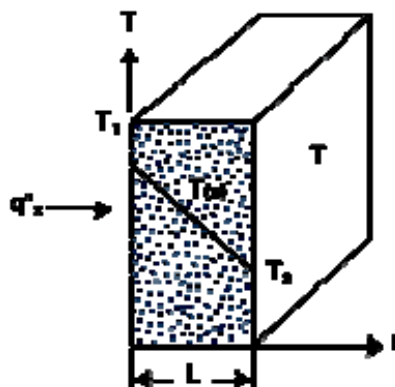
UV INDEX ช่วง 11-15 ระดับความรุนแรงของผลกระทบต่อร่างกายสูงสุด

2.1.9 ความร้อนและอุณหภูมิ

สสารทั้งหลายประกอบด้วย อะตอมรวมตัวกันเป็นโมเลกุล การเคลื่อนที่ของอะตอม หรือการสั่นของโมเลกุล ทำให้เกิดรูปแบบของพลังงานจลน์ เรียกว่า ความร้อน (Heat) พิจารณาพลังงานความร้อน (Heat energy) จากพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอะตอมหรือโมเลกุลทั้งหมดของสสาร อุณหภูมิ (Temperature) หมายถึง การวัดค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ซึ่งเกิดขึ้นจากอะตอม หรือโมเลกุลของ

2.1.9.1 การนำความร้อน (Conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลไปสู่อีกโมเลกุลหนึ่ง การส่งถ่ายพลังงานจากอนุภาคของสารที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า เมื่ออนุภาคทั้งสองมากระทบกัน พลังงานที่ถูกส่งถ่ายคือ พลังงานความร้อน การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับทิศทางที่อุณหภูมิลดลง โดยมีผนังกั้นระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน กรณีมีความร้อนถ่ายเทโดยการพาความร้อนจากของไหลที่ร้อนไปยังผิวของแผ่นซึ่งมีอุณหภูมิ T_1 มีการนำความร้อนภายในผนังจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำ และ มีการพาความร้อนจากผิวอีกด้านหนึ่งของผนังซึ่งมีอุณหภูมิ T_2 ไปยังของไหลที่เย็นกว่า วัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาการกระจายอุณหภูมิในผนังราบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การนำความร้อนผ่านผนังราบ [20]

!

อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการอัตรา (Rate equation) เพื่อคำนวณหาจำนวนพลังงานความร้อนที่ถูกส่งถ่ายต่อหน่วยเวลา เรียกว่า กฎของฟูรีเย (Fourier's law) ซึ่งการกระจายอุณหภูมิในผนังราบ (Plane wall) เป็นแบบมิติเดียว (One – dimensional temperature distribution) หมายถึง อุณหภูมิ $T(x)$ แปรผันกับระยะทางตามแกน x เท่านั้น แสดงสมการกฎของฟูรีเย ดังสมการที่ 2

$$q_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

เมื่อ	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m K)
	L	คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)
	q_x	คือ การกระจายอุณหภูมิในผนังราบ (Heat flux) (W)
	T_1	คือ อุณหภูมิที่สูงของผิวผนังด้านข้าง (°C หรือ K)
	T_2	คือ อุณหภูมิที่ต่ำของผิวผนังด้านข้าง (°C หรือ K)

2.1.9.2 การพาความร้อน (Convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของอะตอม และโมเลกุลของสสาร โดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ ส่วนของแข็งนั้นมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนและการแผ่รังสีเท่านั้น การพาความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบรรยากาศ ซึ่งมีสมการสำหรับคำนวณอัตราการพาความร้อน แสดงดังสมการที่ 3 เรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน “Newton's cooling law” ซึ่งจำแนกได้ออกเป็น 2 แบบ คือ

1) การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection)

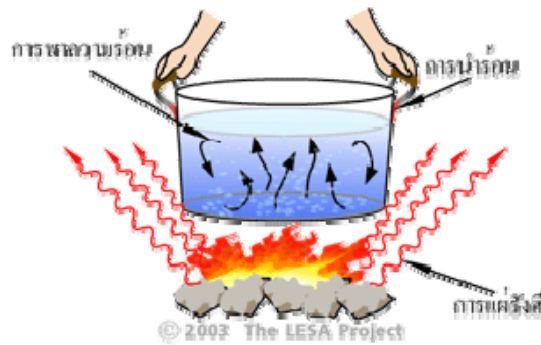
เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ และทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนด้วย โดยมีการอาศัยอุปกรณ์ช่วย เช่น ปั๊ม พัดลม การพาความร้อนแบบบังคับมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบธรรมชาติ

2) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection)

กลไกการเกิดการถ่ายโอนความร้อนเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นในระบบ เช่น การถ่ายโอนความร้อนของอาหารภายในกระป๋องที่ผ่านการทำเย็นหลังจากการฆ่าเชื้อ ภายในกระป๋องมีการเคลื่อนที่ที่ความร้อนเนื่องจากความหนาแน่น การถ่ายโอนลักษณะนี้เกิดขึ้นซ้ำ [21]

$$q = hA\Delta T \quad (3)$$

เมื่อ	q	คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา (W)
	h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m K)
	A	คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m ²)
	ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (°C หรือ K)



รูปที่ 2.14 การจำลองลักษณะวัฏจักรการพาความร้อน [22]

รูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นการจำลองลักษณะวัฏจักรการพาความร้อน การแผ่รังสีจากกองไฟทำให้เกิดความร้อนที่ก้นหม้อน้ำด้านนอก โลหะทำให้เกิดการนำความร้อนเข้าสู่ภายในหม้อ ทำให้น้ำที่อยู่เบื้องล่างร้อนและขยายตัว ความหนาแน่นต่ำจึงลอยขึ้นสู่ข้างบน ทำให้น้ำเย็นความหนาแน่นสูงซึ่งอยู่ด้านบนเคลื่อนตัวลงมาแทนที่ เมื่อน้ำเย็นที่เคลื่อนลงมาได้รับความร้อนเบื้องล่าง ก็จะลอยขึ้นหมุนวนเป็นวัฏจักรต่อเนื่องกันไป เรียกว่า วัฏจักรการพาความร้อน (Convection circulation)

2.1.9.3 การแผ่รังสี (Radiation)

เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่นการนำความร้อน และการพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอากาศได้ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า -273°C หรือ 0 K (เคลวิน) ย่อมมีการแผ่รังสี ซึ่งวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว การแผ่รังสีเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบอิเล็กตรอนในอะตอมของสาร พลังงานของการแผ่รังสีถูกส่งออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) และการแผ่รังสีมีประสิทธิภาพที่สูงสุดในสุญญากาศ รังสีความร้อนที่ผิว สามารถแผ่ออกไปได้มากที่สุด (Maximum flux; W/m^2) ตามสมการซึ่งเรียกว่า “Stefan – Boltzmann Law” [22] ดังสมการที่ 4

$$q'' = \epsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

เมื่อ q'' คือ อัตราของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือพลังงานที่ปล่อยออกมาจากวัตถุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m^2)

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan – Boltzmann Law $= 5.6732 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K} = 1.73 \times 10^{-9} \text{ Btu/hr.ft}^2.^{\circ}\text{R}$

ϵ คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ (K หรือ $^{\circ}\text{C}$)

2.1.10 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนและการแผ่รังสี

ความร้อนที่ไหลผ่านวัสดุจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปหาที่มีอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนในของแข็งเกิดขึ้นโดยกลไกที่เรียกว่า การนำความร้อน (Conduction) วัสดุแต่ละชนิดมีความสามารถในการนำความร้อนได้แตกต่างกัน คุณสมบัติที่เป็นตัววัดความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ คือ Thermal conductivity (k) โดยที่ค่า k กำหนดไว้จากกฎการนำความร้อนของ Fourier คือ อัตราการส่งผ่านพลังงานความร้อนผ่านตัวกลาง แปรผันตรงกับค่าความชันของอุณหภูมิ (Thermal gradient เท่ากับอัตราผลต่างของอุณหภูมิต่อระยะทางหนึ่งหน่วย) ในการส่งผ่านพลังงานและแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดที่พลังงานความร้อนนั้นไหลผ่านด้วย ค่าคงที่ของการแปรผันนี้ของค่า k เปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุและอุณหภูมิ วัสดุที่มีการนำความร้อนที่ดี (k สูง) สามารถลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในได้เร็วกว่าวัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ในวัสดุโลหะค่า k ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนวัสดุอื่นค่า k สูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเลือกใช้วัสดุต้องคำนึงถึงการใช้งาน ถ้าต้องใช้ในการระบายความร้อน ควรเลือกวัสดุที่มีการนำความร้อนที่ดี (ค่า k สูง) ส่วนกรณีที่ใช้ฉนวนความร้อน เพื่อจะเก็บรักษาอุณหภูมิ ต้องเลือกใช้วัสดุที่มีค่า k ต่ำได้แก่ วัสดุที่มีเนื้อเป็นรูพรุน เพราะอากาศที่อยู่ภายในรูพรุนเป็นตัวนำความร้อนที่ต่ำ ส่วนการส่งผ่านความร้อนของวัสดุวิธีการแผ่รังสี (Radiation) ซึ่งความสามารถของวัสดุที่แผ่ความร้อน หรือค่า Emissivity ขึ้นอยู่กับลักษณะผิวของวัสดุและอุณหภูมิ ค่า Emissivity เท่ากับปริมาณความร้อนที่วัสดุแผ่รังสีออกมาได้ต่อปริมาณความร้อนที่ Ideal Black Body สามารถแผ่รังสีออกมาได้ที่อุณหภูมิตรงวัด Ideal Black Body มีการดูดซึมความร้อนที่มากระทบไว้ได้ทั้งหมด โดยไม่มีการสะท้อน หรือส่งผ่านออกไป ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ มีค่าที่แตกต่างกัน [23] ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ [24]

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m K)
กระจก	0.60-1.50
ทองเหลืองบริสุทธิ์	109.0
เหล็กกล้า	47.60
คอนกรีต	1.44
แผ่นไม้ก๊อก	0.44
หลังคาแผงผสมซีเมนต์ไม้*	0.15-0.16

*ค่า k ที่ได้จากงานวิจัย [4]

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k) [25] มีสมการดังนี้

$$k = \frac{Q}{t} \times \frac{L}{A \times \Delta T} \quad (5)$$

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่หน้าตัด (m ²)
	k	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m K)
	L	คือ	ความหนา (m)
	Q	คือ	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท (J)
	t	คือ	เวลา (s)
	ΔT	คือ	ผลต่างอุณหภูมิทั้งสองด้านที่สภาวะคงตัว (K หรือ °C)

2.1.11 การแห้งตัวของสารเคลือบผิว

ลักษณะการแห้งตัวของสารเคลือบผิวสามารถแบ่งได้ 2 แบบ [26] คือ

2.1.11.1 วิธีทางฟิสิกส์ (Physical drying)

การแห้งด้วยวิธีการนี้เกิดจากการระเหยของตัวทำละลาย กลายเป็นฟิล์มยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะทุติยภูมิ (Secondary force) อย่างอ่อนๆ ดังนั้นฟิล์มที่เกิดจึงยังคงละลายได้ในตัวทำละลายของมัน เช่น สีแห้งเร็วที่ใช้เรซินประเภท ไนโตรเซลลูโลส และ อะคริลิก เป็นต้น

2.1.11.2 วิธีทางเคมี (Chemical drying)

ฟิล์มที่ได้จากการแห้งตัวโดยวิธีการนี้จะยึดติดกับผิวหน้าด้วยพันธะปฐมภูมิ (Primary bond) จากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นฟิล์มจึงมีความแข็งแรงและทนทานต่อตัวทำละลาย การแห้งโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สีประเภทนี้ดูออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ขนาดอนุของสีใหญ่ขึ้นจนรวมตัวเป็นฟิล์มแห้งแข็งตามต้องการ สีประเภทนี้ส่วนใหญ่บรรจุในภาชนะแยกกัน ก่อนใช้จึงนำมาผสมกันตามอัตราส่วนที่ผู้ผลิตแนะนำ ซึ่งเมื่อผสมเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง ดังนั้น เมื่อทำการผสมแล้วจึงต้องใช้ให้หมดภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่าสีบ่มเย็น เช่น ยูเรียเรซิน (Urea resin) พอลิยูรีเทนเรซิน (Polyurethane resin) เป็นต้น แต่ถ้าการเกิดปฏิกิริยาต้องใช้อุณหภูมิสูง เรียกว่า สีอบ (Baking coatings)

2.1.12 ปัจจัยที่มีต่อคุณภาพของสารเคลือบผิวโดยวิธีการพ่น มีดังนี้

- 1) สภาพของห้องพ่นสีและบริเวณพ่นสี ต้องควบคุมสภาวะ ดังนี้ อุณหภูมิ ความชื้น แรงลมพัด
- 2) อุปกรณ์พ่นสี มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ ขนาดหัวพ่นพ่น การควบคุมไคป็น การปรับหน้ากากป็น ความดันลมในการพ่นเคลือบ และความกว้างของละอองสี
- 3) วิธีการพ่นเคลือบ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ การเคลื่อนที่ของปืนพ่นขณะทำการพ่นเคลือบ ช่วงการแห้งตัวระหว่างชั้นของผิวเคลือบ ระยะห่างของปืนพ่นสี เป็นต้น [27]

2.1.13 ปัจจัยที่ทำให้สีเคลือบผิวไหลย้อย

สีเคลือบผิวไหลย้อย หมายถึง การที่ฟิล์มของสารเคลือบผิวไหลลงมาระหว่างทำการเคลือบแล้วเกิดการแข็งตัว เป็นผลทำให้ผิวเคลือบไม่สม่ำเสมอโดยส่วนมากการไหลย้อยเกิดขึ้นเฉพาะพื้นผิวในแนวดิ่งซึ่งเกิดจากสาเหตุดังนี้

- 1) การใช้เวลาในการพ่นสีที่มากเกินไปจึงทำให้มีผิวเคลือบที่มีความหนาเกินไป
- 2) สภาวะภายในห้องพ่นสีมีความชื้นในอากาศสูงทำให้ผิวเคลือบแห้งช้า
- 3) ใช้ตัวทำละลายไม่เหมาะสม (แห้งช้าเกินไป)
- 4) การเว้นช่วงระยะเวลาห่างพ่นสารเคลือบผิวในแต่ละจำนวนรอบพ่นสีไม่เหมาะสม
- 5) การปรับปืนพ่นไม่เหมาะสมทำให้ละอองสีกระจายตัวไม่ดี
- 6) อัตราส่วนการผสมสารเคลือบไม่ถูกต้อง

2.1.14 วิธีการตรวจสอบการไหลตัวของสีเคลือบผิว

การตรวจเวลาในการไหลตัวของสีเคลือบเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีต่อคุณภาพของผิวเคลือบ มีวิธีการตรวจวัดความหนืด และการไหลของสีเคลือบ ดังนี้ [28]

2.1.14.1 วิธีการบับเบิลวิสโคมิเตอร์ (Bubble viscometers)

มาตรฐานความหนืดชนิดนี้นิยมใช้ตรวจสอบความหนืด และการไหลของน้ำมัน และสารยืคเกาะ อุปกรณ์ประกอบด้วยหลอดมาตรฐาน ที่ฝาหลอดถูกผนึก (Sealed) จำนวน 41 หลอด บรรจุของเหลวที่เรียงลำดับความหนืดน้อยสุดจนถึงของเหลวที่มีความหนืดมากที่สุด แสดงค่าเป็นความหนืดคิเนมาติก ในการทดสอบต้องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดด้วย ผลค่าความหนืดที่ได้เปรียบเทียบกับอัตราความเร็วของฟองอากาศระหว่างสารในหลอดทดสอบ

2.1.14.2 วิธีการวัดความหนืดของฟอร์ด (Ford viscosity cups)

เป็นวิธีการวัดความหนืดที่นิยมใช้กันมากในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสะดวกและรวดเร็ว โดยถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ดทำด้วยวัสดุที่ทนการกัดกร่อน และตัวทำละลาย เช่น ทองเหลือง หรืออลูมิเนียม โดยที่ทางออกก้นถ้วยมีรูปร่างลักษณะทรงกรวย ถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ดที่ใช้ในงานมี 3 ขนาด ดังนี้ ถ้วยหมายเลข 2 หมายเลข 3 และหมายเลข 4 ขนาดของถ้วยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานของถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ด [28]

หมายเลขถ้วย	เส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกท่อ		ช่วงความหนืดที่ใช้วัด (เซนติสโตกหรือตารางมิลลิเมตรต่อวินาที)
	นิ้ว	เซนติเมตร	
2	0.10	0.25	25 - 120
3	0.13	0.32	37 - 231
4	0.15	0.37	70 - 370

วิธีในการทดสอบให้เลือกถ้วยที่เหมาะสม โดยใช้ถ้วยหมายเลข 3 และหมายเลข 4 สำหรับทดสอบสารที่มีเวลาการไหลออกจากถ้วยอยู่ระหว่าง 20 - 100 วินาที ส่วนถ้วยหมายเลข 2 สำหรับเวลาการไหลออกจากถ้วย 40 - 100 วินาที จับเวลาจนสารเคลือบไหลออกจนหมด (หน่วยวินาที) นำมาคำนวณหาความหนืดกินเนมาติก (หน่วยเป็นเซนติสโตก) [29] ตามขนาดของถ้วย ดังนี้ถ้วยหมายเลข 2 = $2.388t - 0.007t^2 - 57.008$, ถ้วยหมายเลข 3 = $2.314t - 15.200$ และถ้วยหมายเลข 4 = $3.846t - 17.300$ (เมื่อ t หมายถึงเวลาการไหลของสารเคลือบ) ในการทดสอบความหนืดด้วยถ้วยวัดความหนืดของฟอร์ด นอกจากต้องเลือกถ้วยที่เหมาะสมแล้ว ต้องควบคุมอุณหภูมิในการทดสอบ ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถตรวจสอบวัดของเหลวที่มีความหนืดสูงได้

2.1.14.3 มาตรฐานความหนืดแบบบรุคฟิลด์ (Brookfield Torsion Viscometer)

เป็นมาตรฐานความหนืดที่มีหน่วยการวัดเป็นเซนติปัวส์ เครื่องประกอบด้วย แท่งโลหะทรงกระบอก (Spindle) หมุนอยู่ในของเหลวที่ต้องการวัด โลหะทรงกระบอกนี้ต่อกับมอเตอร์ เพื่อช่วยให้โลหะทรงกระบอกหมุนได้ และวัดค่าแรงเสียดทานของของเหลว โดยการตรวจสอบองศาการหมุน (Degree of twist)

2.1.14.4 มาตรการความหนืดแบบเกลเลนแคมป์ (Gallenkamp torsion viscometer)

เป็นมาตรวัดความหนืด ประกอบ ด้วย หลอดที่แขวน มาจากด้านบน ที่ปลายด้านล่าง มีโลหะ ทรงกระบอก (Cylinder) ซึ่งสามารถหมุนได้อย่างอิสระ ไปพร้อมกับแกนการวัด ทำการหมุนโลหะทรงกระบอก 360 องศา แล้วปล่อยให้ หมุนกลับในภาชนะที่บรรจุของเหลว โดยที่ค่าการหมุน (Over swing) กลับไม่เกิน 3 องศา ค่ามุมที่หมุนกลับอยู่กับความหนืดของของเหลวที่อยู่ภายในชั้นเหลว

2.1.15 มาตรฐานที่ใช้ในการวัดสี

การวัดค่าสีเป็นการบอกลักษณะของสีให้เป็นที่เข้าใจในระดับสากลได้ นิยมใช้ 2 ระบบ [30] ดังนี้

2.1.15.1. ระบบ Munsell

เป็นระบบการวัดสีโดยการตรวจสอบด้วยสายตาและการมองเห็นสีตามความคิดของมนุษย์ในการวัดสี คือ Hue Lightness และ Chroma ในการวัดสีระบบนี้เป็นระบบที่ตรงกับสายตามนุษย์ที่มองเห็นสีแตกต่างกัน เป็นช่วงที่เท่ากัน

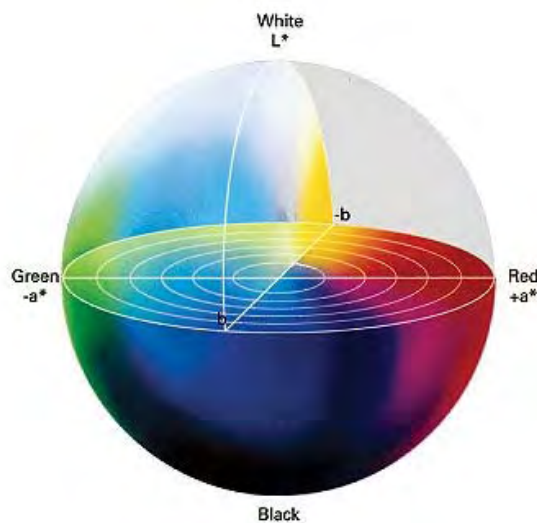
2.1.15.2. ระบบ Commission International de l'Eclairage; CIE

เป็นระบบที่ได้พัฒนาจากระบบของการวัดสีในรูปของ Objective การวัดสีระบบนี้มีข้อดีสามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลข เป็นระบบที่สามารถนำไปคำนวณ และทำนายสูตรของสีผสมได้ด้วย ดังนั้น การมองเห็นสีของวัตถุที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสง หรือวัตถุที่มีสีที่สายตามนุษย์ตรวจสอบได้ สามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลขได้เช่นเดียวกันในการวัดค่าสีของวัตถุ ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ ที่สามารถวัดการกระจายพลังงานที่แต่ละความยาวคลื่นได้ ด้วยเครื่อง Spectroradiometer ที่มีแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน ทำให้การมองเห็นสีที่แตกต่างกัน ดังนั้นในระบบ CIE จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

- 1) **Illuminant A** การกระจายพลังงานใกล้เคียงกับหลอดไฟทังสเตนหรือหลอดไฟ Incandescence ที่มี Color temperature ประมาณ 2848 K
- 2) **Illuminant B** เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากหลอด Illuminant A ที่ผ่านตัวกรองแสงแล้วให้แสงแดดคล้ายเวลาเที่ยงวันโดยมี Color temperature ประมาณ 4900 K
- 3) **Illuminant C** เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากหลอด Illuminant A ที่ผ่านตัวกรองแสงแล้วให้แสงแดดในช่วงกลางวันโดยมี Color temperature ประมาณ 6700 K

4) **Illuminant D** เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้แทนแสงแดดตอนกลางวันที่มีความละเอียดของ Color temperature ที่ต่างกัน เช่น D65 และ D75 โดยที่ D65 เป็นแสงแดดตอนกลางวันที่มี Color temperature 6500 K D75 เป็นแสงแดดตอนกลางวันที่มี Color temperature 7500 K (โดยทั่วไปนิยมใช้ D65 เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการตรวจวัดวัตถุที่มีสี)

โดยที่เครื่อง Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่วัดค่าสีเครื่องสีของวัตถุแสดงเป็นตัวเลข โดยวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็น Reflectance curve ของวัตถุที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน ดังนี้ สีน้ำเงินมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ 430-460 นาโนเมตร สีเขียวมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ 500-580 นาโนเมตร และสีแดงมีความยาวคลื่นในช่วง 620-780 นาโนเมตร ซึ่งระบบการตรวจวัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่นิยมใช้ เป็นระบบ CIE Chromaticity Coordinate; CIE L^* a^* b^* เป็นวิธีที่สามารถวัดค่าสีลักษณะของ Color space ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะของ Color space

โดยที่ตัวแปรของค่าแกนในระบบ CIE มีดังนี้ L^* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 100 แกน a^* มีค่า (+) สีมินแนวโน้มเป็นไปในทิศทางของสีแดง ค่า (-) สีมินแนวโน้มเป็นไปในทิศทางของสีเขียว แกน b^* มีค่า (+) สีมินแนวโน้มเป็นไปในทิศทางของสีเหลือง ค่า (-) สีมินแนวโน้มเป็นไปในทิศทางของสีน้ำเงิน โดยที่การหาความแตกต่างของสีนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.14 พบว่า ที่จุดๆ หนึ่ง ใน Space นั้น แสดงค่าของ $L_1^* a_1^* b_1^*$ และเมื่อมีการเปลี่ยนเฉดสีไปอีกจุดใน Space แสดงค่า $L_2^* a_2^* b_2^*$ ซึ่งระยะห่างกันของทั้ง 2 จุด เป็นการบ่งบอกถึงค่าความแตกต่างของสี ดังแสดงในสมการที่ 6 ดังนี้

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (6)$$

เมื่อ ΔE คือ ค่าความแตกต่างของสี

2.2 เอกสารบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง

Chandra S. และ Moalla S. [31] เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดความร้อนของหลังคา Asphalt shingle ที่เคลือบด้วยสีดำ สีขาว สีเทา และสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาว พบว่า หลังคาที่ทำด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวมีประสิทธิภาพในการลดความร้อนสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของหลังคาที่เคลือบด้วย สีดำ สีขาว และสีเทา มีค่าเท่ากับ 0.05 ,0.2 และ 0.22 ตามลำดับ ส่วนสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงถึง 0.65 - 0.72

Danny S. K. และคณะ [32] ได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวกับสีทางการค้า โดยทาสิบบนหลังคาบ้าน 7 หลังในช่วงฤดูร้อนปี ค.ศ. 2000 ซึ่งควบคุมลักษณะและสภาพของบ้านให้เป็นแบบเดียวกันยกเว้นสภาพหลังคา คือ หลังคากระเบื้องแผ่นเล็กสีเทาดำ (RGS) หลังคาสีดำนอกติซึ่งภายใต้หลังคามีการฉนวนกันความร้อน (RSL) หลังคากระเบื้องสี Terra cotta (RTB) และหลังคากระเบื้องสีขาว (RWS) เปรียบเทียบกับสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวที่ทาบนหลังคา 3 ชนิดคือ หลังคากระเบื้องลอน (RWB) หลังคากระเบื้องเรียบ (RWF) และหลังคาเหล็ก (RWM) จากนั้นเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในบ้านทุก 15 นาที เป็นเวลา 1 เดือน พบว่า บ้านที่หลังคาเคลือบด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำกว่าบ้านที่มีหลังคาเป็นกระเบื้องแผ่นเล็กสีเทาดำ (RGS) 20 องศาฟาเรนไฮต์ ต่ำกว่าหลังคากระเบื้องสี Terra cotta (RTB) 10 องศาฟาเรนไฮต์ และต่ำกว่าบ้านที่มีหลังคากระเบื้องสีขาว 7 องศาฟาเรนไฮต์ และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของห้องใต้หลังคาพบว่า บ้านที่หลังคาทำด้วยกระเบื้องแผ่นเล็กสีเทาดำ (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 บ้านที่ใช้หลังคาสีดำนอกติซึ่งภายใต้หลังคามีการฉนวนกันความร้อน (RSL) มีภาระการทำความเย็น 14.9 kWh ต่อวัน และบ้านที่ทาหลังคาด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์มีภาระการทำความเย็น 13.3 kWh ต่อวัน หากพิจารณาจากวันที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า

Smith G.B. [33] ทดลองผลิตสีจากผงสีโลหะของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เคลือบบนผิวอลูมิเนียม พบว่าผิวเคลือบที่ได้มีความสามารถในการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงเนียร์อินฟราเรดได้ดีกว่าการใช้ผงสีทั่วไป ทำให้สามารถลดภาระในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ อีกทั้งยังมีสีให้เลือกใช้งานได้หลากหลาย นอกจากนี้ ได้ทำการเคลือบผิวชั้นเดียวและสองชั้น โดยเคลือบ Fe_2O_3 ลงบน SiO_2 ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหต่างกัน ทำให้สีที่ได้จากการเคลือบด้วย Fe_2O_3 ชั้นเดียวมีการเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่สีเหลือง สีส้มพู สีเทา จนถึงสีม่วง เมื่อความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น ส่วนผิวเคลือบสองชั้นนั้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสีนอกจากจะขึ้นกับความหนาของผิวเคลือบแล้ว มุมตกกระทบของรังสีก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผิวเคลือบมีสีต่างกันหลาย

Degussa M.C.C. [34] ทำการผลิตผงสีดำซึ่งสามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดี โดยสังเคราะห์โครเมียมออกไซด์จากผงสีที่มีสีดำชนิด ซึ่งเป็นผลให้ผงสีที่ได้มีโทนสีดำขึ้นและมีค่าการสะท้อนรังสีในช่วงเนียร์อินฟราเรดได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากโครเมียมมีผลในการดูดซับรังสีอาทิตย์ในช่วงนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ระหว่างสีดำที่ผลิตได้กับสีดำทั่วไปซึ่งผงสีคือคาร์บอนแบล็ค พบว่าสีดำที่ผลิตได้มีการสะท้อนรังสีอาทิตย์มากกว่าสีดำทั่วไป ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุคือ ความเป็นไปได้ที่โปรตอนสะท้อนออกมาเมื่อวิ่งชนผิววัสดุ เมื่อพิจารณาผิวขรุขระ พบว่าโปรตอนมีการสะท้อนที่ผิวก่อนสะท้อนออกมาจากผิวทำให้ผิวสามารถดูดกลืนโปรตอนได้เป็นจำนวนมาก แตกต่างจากผิวเรียบ ซึ่งจะมีการสะท้อนของโปรตอนที่ผิวน้อยกว่า จึงสามารถสะท้อนจำนวนโปรตอนกลับไปได้มากกว่า

Paul B. และ Sarah E. [35] ศึกษาอิทธิพลของความเรียบต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบ โดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีขาวบนกระเบื้องคอนกรีต (Asphalt shingles) ซึ่งมีผิวขรุขระกับสีเคลือบสีขาวบนแก้วซึ่งมีผิวเรียบ โดยมีความหนาของสีเคลือบเท่ากัน พบว่า ลักษณะกราฟการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบทั้งสองมีรูปร่างเหมือนกัน แต่ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์เริ่มแตกต่างกันที่ความยาวคลื่น 0.5 ไมโครเมตร โดยผิวเคลือบที่เรียบมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่า ผิวเคลือบขรุขระ 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงตามองเห็น (Visible absorbance) พบว่าผิวเรียบมี

Oren N. และ Nayan S. [36] ได้ศึกษาผลของความเรียบบนหลังคาเหล็กต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยสร้างแบบจำลองหลังคาเหล็กในรูปแบบต่างๆ พบว่าหลังคาเหล็กที่ถูกทำให้ขุ่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงจะมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงเมื่อเทียบกับหลังคาเหล็กที่เรียบ ซึ่งการลดลงของค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นกับมุมของแสงที่ตกกระทบหลังคา

Smith G, และคณะ [37] ได้ศึกษาผงสีเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งใช้ในการทำอิฐสีแดง หรือผสมเป็นผงสีเคลือบบนคอนกรีต และหลังคา พบว่าใน Fe_2O_3 มีสารประกอบของ Fe_3O_4 ที่ให้สีดำ ซึ่งไม่มีผลต่อการแยกความแตกต่างของสี เนื่องจากมี Fe_3O_4 ผสมอยู่ในปริมาณน้อย แต่ส่งผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ซึ่งลดลงมากในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 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

Guo H. และคณะ [38] ได้ศึกษาอิทธิพลของความหนาผิวเคลือบต่อค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวที่มี TiO_2 17% PVC ซึ่งความหนาของผิวเคลือบตั้งแต่ 28-163 ไมโครเมตร พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดคือ 0.93 ที่ความหนา 134 ไมโครเมตร การสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่แม้ความหนาจะเพิ่มขึ้นก็ตาม เนื่องจากที่ความหนาของผิวเคลือบน้อย แสงสามารถเดินทางผ่านผิวเคลือบได้ แต่เมื่อความหนาผิวเคลือบมากขึ้น แสงสามารถเดินทางผ่านได้น้อยลงทำให้มีแสงส่วนที่สะท้อนกลับมากขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่แสงไม่สามารถเดินทางผ่านผิวเคลือบได้เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการดูดกลืนและสะท้อนกลับของแสงอย่างสมบูรณ์ ทำให้แม้ความหนาจะเพิ่มขึ้นแต่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ยังคงเท่าเดิม

Norman S. และคณะ [39] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางแสงของ TiO_2 คือ ดัชนีหักเห (Refractive index) = 2.5-2.7 และขนาดอนุภาคของ TiO_2 โดยทฤษฎีการกระเจิงแสงของ Mie (Mie light scattering theory) กล่าวว่าขนาดอนุภาคที่เหมาะสมของ TiO_2 สามารถกระเจิงแสงได้สูง และทึบแสงในช่วงที่ตามองเห็น ซึ่งการกระเจิงแสงนั้นขึ้นกับความแตกต่างระหว่างดัชนีหักเหของผงสีกับสารยึด การศึกษาในปัจจุบันพบว่า TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร สามารถป้องกันแสงอัลตราไวโอเลตได้ ทำให้ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเป็นที่นิยมในงานสีเป็นอันมาก

Michael I. และคณะ [40] ได้ศึกษาการกระเจิงแสงของ TiO_2 พบว่าอนุภาคของ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร สามารถกระเจิงแสงได้ดีในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นนี้อนุภาคนาโนขนาดเล็กสามารถเกิดการกระเจิงได้ดี โดยความเข้มแสงที่ถูกกระเจิงโดย TiO_2 ขนาดเล็กเป็นสัดส่วนกับ Fourth power ของความยาวคลื่น ดังนั้น ในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นอนุภาคนาโนขนาดเล็ก (5-15 นาโนเมตร) จะมีกำลังในการกระเจิงแสงลดลง ทำให้แสงสามารถเดินทางผ่านไปได้เป็นผลให้อนุภาคโปร่งใสมากกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคนาโนปกติ และขนาดอนุภาคของ TiO_2 ระดับนาโนเมตรมีพฤติกรรมเป็นสารกึ่งตัวนำส่งผลให้พลังงานแสงถูกดูดกลืนได้ดี

วัลลภ หาญณรงค์ชัย [41] ศึกษาการพัฒนาสีเคลือบเพื่อเพิ่มค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ชนิดของผงสี ความเข้มข้นของผงสี (Pigment volume concentration) และความหนาของสีเคลือบ พบว่า ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงสี และความหนาของสีเคลือบเพิ่มขึ้น และทำการเปรียบเทียบกับสีเคลือบเชิงพาณิชย์ พบว่า สีเคลือบที่ได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่า ยกเว้นสีแดง และสีฟ้าที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับสีเคลือบเชิงพาณิชย์ และได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของสีเคลือบโดยทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะ พบว่า ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวลดลงเล็กน้อยในช่วงแรกของการทดสอบในขณะที่สีอื่นไม่เปลี่ยนแปลง

อนุสรฯ ศรีสรวาล [42] ศึกษาวัสดุผิวเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เตรียมจากการผสมไททาเนียมไดออกไซด์ สารเพิ่มเนื้อ และสารยึด ที่มีผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ คือ สัดส่วนสารยึด ชนิดผงสี สารเพิ่มเนื้อ และปริมาณ TiO_2 ความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงสี (PVC) และความหนาผิวเคลือบ จากการทดลองพบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ขึ้นกับชนิดผงสี ปริมาณ TiO_2 และความหนาผิวเคลือบ แต่ไม่ขึ้นกับสัดส่วนของสารยึด โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TiO_2 และความหนาผิวเคลือบส่งผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวค่าหนึ่ง ที่ถึงแม้ปริมาณ TiO_2 และความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ได้คงที่ นอกจากนี้ พบว่าสารเคลือบทั้งที่มีน้ำยาธรรมชาติ และน้ำยาสังเคราะห์ ผสมในสารยึด ให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกัน รวมถึงให้สมบัติทางกล และทางกายภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าแสงอัลตราไวโอเลตทำให้การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบลดลงมากในช่วงแรกของการทดสอบ และลดลงจนคงที่ และเมื่อทดสอบโดยการวางผิวเคลือบนี้บนหลังคาพบว่า ผิวเคลือบที่ได้มีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวเคลือบทางการค้าถึง 13 องศาเซลเซียส

Guo L. และคณะ [43] ศึกษาการเคลือบ TiO_2 บนพอลิไทรคลีนโดยภายในชั้น TiO_2 amorphous ที่มีอนุภาค Core-shell เข้าไปข้างใน TiO_2 nanosponge โดยวิธี Calcining ในเตาหลอมพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 200°C ส่งผลให้ TiO_2 hybrid microspheres เปลี่ยนจากรูปทรง Anatase ไปเป็น Rutiles เนื่องจากการขัดขวางของ Calcined พอลิเมอร์ที่เหลืออยู่

Gupta V. และคณะ [44] ศึกษาสมบัติความเป็นฉนวนโดยวัดค่า Dielectric constant, Loss tangent และ Conductivity ในการทดสอบเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $298-923\text{K}$ และความถี่อยู่ในช่วง 10^3-10^6 Hz การโดขึ้นของผลึกเดี่ยว CdTiO_3 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น พบว่า ionic hopping conduction มีแนวโน้มลดลง ศึกษาสมบัติทางความร้อนของการโดขึ้นของผลึกเดี่ยว CdTiO_3 โดยใช้เทคนิค TGA, DTA และ DTG พบว่า ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวอยู่ที่ $1386-1693\text{K}$ และเกิดเป็น TiO_2 ออกมา

Chen J. และคณะ [45] ศึกษาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่เตรียมจาก chiral 1,1'-binaphthyl (BINOL) และ 2,4-toluene diisocyanate (TDI) โดยมีวิธีการสังเคราะห์ 2 วิธี ดังนี้ Simple hydrogen transfer addition reaction และ High-intensity ultrasonic ได้เป็น polyurethane/ TiO_2 nanocomposites ได้ตัวอย่างออกมา 2 ชนิด คือ (R)-BPU และ (S)-BPU วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค NMR, FT-IR, TGA และ UV-vis spectroscopy และทำการศึกษาคูณลักษณะเฉพาะโดยใช้เทคนิค IR, XRD, TEM และ SEM พบว่าการสังเคราะห์ทั้ง 2 วิธี สามารถปรับปรุงความเสถียรทางความร้อนของ nanocomposite ได้ เมื่อเติมผง TiO_2 ขนาดนาโน ส่งผลให้ค่าการแผ่รังสีอินฟราเรด มีค่าเท่ากับ 8.14 ไมโครเมตร และเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์มีค่าน้อยกว่า

Sabataityte J. และคณะ [46] ศึกษาคุณลักษณะของฟิล์ม TiO_2 ที่มีขนาดรูพรุนนาโนเมตรเตรียมโดยวิธี Sol-gel โดยใช้ Spin-coating และ Spray pyrolysis และเตรียม precursor sol ที่มี titanium (IV) isopropoxide, Acetylacetone และ Polyethylene glycol (PEG) ใน Ethanol ในการทดสอบใช้ Glass และ n-type Si (100) เป็น Substrates แล้วทำการทดสอบด้วยเทคนิค SEM, XRD และ FT-IR โดยศึกษาผลของความเข้มข้น PEG ใน Precursor solution ความแตกต่างของรอบการอบอ่อนบนแผ่นฟิล์มที่ตำแหน่งต่างๆ สมบัติของโครงสร้างออสัณฐาน ขนาดของรูพรุน พบว่าฟิล์มกับ TiO_2 โครงสร้าง Anatase มีผลึกโดได้โดยใช้เทคนิคการพ่นที่อุณหภูมิ 500°C และการอบอ่อนภายหลังที่อุณหภูมิ 500°C สามารถเพิ่มขนาดผลึกจาก 5 nm ได้ถึง 9 nm ส่งผลให้รูพรุนขนาดประมาณ 40 nm และแผ่นฟิล์มมีความหนา 2.3 ไมโครเมตร โดยใช้ 50 Spray pulses ส่วนการ Spin coated แผ่นฟิล์มเกิดการจัดรูปแบบของพันธะ Ti-O-Ti Anatase หลังจากทำอบอ่อนที่ 450°C และเมื่อนำฟิล์มผลึกมาอบอ่อนที่อุณหภูมิประมาณ 700°C พบว่า ผิวหน้าออสัณฐานมี

Chen J. และคณะ [47] ศึกษาเกี่ยวกับ nanocomposite ของพอลิยูรีเทนกับ TiO_2 ที่สังเคราะห์จากกระบวนการ Ultrasonic และ ศึกษาลักษณะเฉพาะโดยใช้เทคนิค Fourier Transform IR spectroscopy (FT-IR), X-ray Diffraction (XRD), Thermo Gravimetric Analysis (TGA), Differential Scanning Calorimetry (DSC), Transmission Electron Microscopy (TEM), Scanning Electron Microscopy (SEM) และ Infrared Emissivity Analysis พบว่า ขนาดนาโนเมตรของ TiO_2 กระจายทั่วเป็นเนื้อเดียวกับพอลิยูรีเทน PU ส่วนผลที่ได้จาก TGA-DSC แสดงค่าเสถียรทางความร้อนของ Composite เพิ่มขึ้น และมีค่าเผ่รังสีที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ Pure polymer และ Nanoparticles

พวงรัตน์ จิตวิษยานุกุล [48] ศึกษาการเคลือบนาโนฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์บนวัสดุ โดยการใช้สาร Titanium tetraisopropoxide และ Tetrabutylorthotitanate เป็นสารตั้งต้น และใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลายในกระบวนการโซลเจล ร่วมกับสารที่ช่วยในการทำปฏิกิริยาสามชนิด คือ 1) Polyethylene glycol (PEG) 2) diethanolamine และ 3) acetyl acetone โดยที่ PEG ช่วยในการทำให้โครงสร้างอนาเทสของไททาเนียมไดออกไซด์ให้มากขึ้น พบว่าประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดียิ่งขึ้น Diethanolamine ช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มบาง และทำให้ฟิล์มบางสามารถยึดติดบนวัสดุได้ดี และ Acetyl acetone ช่วยทำให้ฟิล์มมีความเรียบ และเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์ม โดยความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากทุกสภาวะอยู่ในระดับนาโนที่มีความหนาน้อยกว่า 100 นาโนเมตร

จิตติพร เครือเนตร [49] ศึกษาแผ่นฟิล์มพลาสติก ที่มีสมบัติการกันรังสียูวี และความร้อน เพื่อใช้ในการเกษตร โดยผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนสามารถกันความร้อนสูง เหมาะกับสภาพภูมิอากาศร้อนจัดพลาสติกที่ใช้ผลิตฟิล์มชนิดนี้ คือ โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีลักษณะใส ยืดหยุ่นสูง สามารถโค้งงอได้โดยไม่แตกหัก และมีสมบัติในการลดการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต 99% ที่ง่ายต่อการขึ้นรูปและราคาถูก โดยเติมผงไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า แผ่นฟิล์มพลาสติกลดการผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต และโลหะออกไซด์ ที่ทำให้อินฟราเรดผ่านได้เหลือเพียง 30 เปอร์เซ็นต์

Changhoon L. และคณะ [50] ศึกษาการพ่นเคลือบ Nano - TiO_2 แบบ Photo-catalytic coating บน stainless steel เกรด 304 โดยผ่านกระบวนการ spray drying ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส H_2 และระยะเวลาการพ่นเคลือบ เพื่อดูการแตกตัวของผง TiO_2 และขนาดของอนุภาคผงโดยที่ปฏิกิริยาการสลายตัวโดยใช้

Ronnen L. และคณะ [51] ศึกษาการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของหลังคาที่ทำมาจากวัสดุต่างชนิดกัน ดังนี้ โลหะ กระเบื้องดิน กระเบื้องคอนกรีต ไม้ และดินน้ำมัน พบว่า ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น ในช่วง NIR มีค่ามากที่สุด โดยที่ชั้นเคลือบผิวด้านบนกับผงสีสามารถดูดซับได้น้อย และเกิดการกระเจิงกลับอย่างมากของความยาวคลื่น NIR และเพิ่มการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น NIR ที่ชั้นรองพื้น (เช่นเดียวกับการใช้สีขาวของ TiO_2 ชนิด Rutile) ซึ่งทั้งชั้นเคลือบด้านบน และวัสดุมีการสะท้อนรังสี NIR ได้น้อย จึงนำโลหะมาเคลือบและเคลือบดินบนผลิตภัณฑ์กระเบื้องหลังคา และพบว่า มีค่าการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น NIR เท่ากับ 0.50 และ 0.75 ตามลำดับ ส่วนกระเบื้องคอนกรีตสีเทาพบว่า ค่าการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น NIR สูงถึง 0.60 เนื่องจากผงสีทำให้เกิดการกระเจิงกลับของความยาวคลื่น NIR แต่เมื่อนำมาเคลือบกับชั้นรองพื้น สีขาวและผิวเคลือบด้านบนโดยที่รังสี NIR สามารถทะลุผ่านผงสี พบว่า ค่าการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น NIR สูงถึง 0.85 ส่วนดินน้ำมันพบว่า มีค่าการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น NIR สูงถึง 0.45 เมื่อใช้ Granules basecoat สีขาว

Ming J. และคณะ [52] ศึกษาการปรับปรุงผิวหน้าของแผ่นยางธรรมชาติโดยการเคลือบแผ่นฟิล์มที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการ Liquid phase deposition (LPD) ซึ่งมีชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นกลางระหว่างชั้นไททาเนียมไดออกไซด์ และชั้นยางธรรมชาติ จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการดูดซับสารเคมีโดยใช้ UV และโอโซน ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR และโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ส่วนชั้นของผงไททาเนียมไดออกไซด์ ตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD และ EDX

บทที่ 3 วัตถุดิบและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัตถุดิบ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติเกรด STR20 (Standard Thai Rubber 20) ที่เลือกใช้งานวิจัยนี้ เนื่องจากการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย หาซื้อได้ง่าย ราคาค่อนข้างต่ำกว่าเกรดอื่นๆ (หากซื้อในปริมาณมาก) จากบริษัท ฮ่วยชวน จำกัด

3.1.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัท อูทิส อินเตอร์ไพรส์ จำกัด

3.1.3 กรดสเตียริก (Stearic acid)

สารกระตุ้นปฏิกิริยากรดสเตียริก เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัท อิมพีเรียล เคมีเคิล จำกัด

3.1.4 เมอร์แคปโตเบนโซไทโธล (Mercaptobenzthiazol; MBT)

เป็นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง ซึ่งสารเร่งปฏิกิริยาเมอร์แคปโตเบนโซไทโธล ที่ใช้เป็นเกรด ZAP ACCEL M-R จากบริษัท Zeon Advanced Polymix จำกัด

3.1.5 สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Diphenylguanidine)

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตให้ตัวกระตุ้นเกิดปฏิกิริยาอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากบริษัท อิมพีเรียล เคมีเคิล จำกัด

3.1.6 สารเพิ่มสีแดง (Iron oxide red)

ทำให้อัตราการเกิดสีแดงคล้ำยอูฐ เกรด 690B จากบริษัท ห้างหุ้นส่วนจำกัด เกียรติมงคล

3.1.7 สารคงรูปกำมะถัน (Sulfur)

กำมะถันเป็นสารช่วยในการคงรูปยางในกระบวนการผลิตยาง ในงานวิจัยนี้ใช้การคงรูปยางระบบ CV (Conventional Vulcanization system) ขนาด 450 mesh จากบริษัท สยามเคมีเคิล จำกัด

3.1.8 ซิลิกาแบบตกผลึก (Precipitate silica)

สารเสริมแรงในยางธรรมชาติสามารถเติมได้ต่างๆได้ตามต้องการ ชนิด Precipitate silica เกรด TOKUSIL 233 มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 125 ไมครอน ค่า pH 6.8 และมีค่า Bulk density 0.232 g/cm^3 จากบริษัท Tokuyama siam silica Co., LTD (Thailand)

3.1.9 ผงขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Wood sawdust)

ขนาดอนุภาคของผงขี้เลื่อยไม้ ประมาณ 200-300 ไมครอน ช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ยาง และช่วยลดต้นทุน บริษัท วี.พี. วัสดุ จำกัด

3.1.10 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling)

สารคู่ควบไซเลนใช้ในการปรับปรุงผิวขี้เลื่อยไม้ เพื่อช่วยทำให้การยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติกับผงขี้เลื่อยไม้ได้ดีขึ้น ชนิด KBM 603A จากบริษัท Kishimoto Sangyo (Thailand) จำกัด

3.1.11 สารแอนต้ออกซิแดนท์ (Antioxidant)

สารป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน มีหน้าที่ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาจากอากาศ เกรด IRGANOX 1076 จากบริษัท Global Connection Co., LTD (Thailand)

3.1.13 สารป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับโอโซน (Antiozonant)

เป็นสารเคมีที่ช่วยป้องกันไม่ให้ยางเสื่อมสลาย และป้องกันไม่ให้ยางทำปฏิกิริยากับโอโซน เกรด Enhance จากบริษัท Behn Meyer Chemical (T) Co., LTD (Thailand)

3.1.14 สารหน่วงการลามไฟ

สารหน่วงการลามไฟ ทำหน้าที่หน่วงการติดไฟของผลิตภัณฑ์หลังคายางได้ช้าลง หรือไฟที่ลุกไหม้ดับลง เกรด APYRAL 40 CD จากบริษัท Behn Meyer Chemical (T) Co., LTD (Thailand)

3.1.15 ผงไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)

วัสดุเซรามิก ชนิด Rutile เกรด Ti-pure R-902 สีขาว ขนาดอนุภาค 0.405 ไมโครเมตร ค่า pH อยู่ในระหว่าง 7 -9 และมีค่า Specific gravity เท่ากับ 4.0 จากบริษัท Dupont ประเทศไทย จำกัด

3.1.16 สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนชนิด Anti-UV Coating โดยใช้สารเคลือบผิวรองพื้นเกรด C-501 และสารเคลือบผิวหน้า ชนิด C-602A สีเขียว และสารทำให้คงรูป (Hardener) ชนิด C-602B โดยทำการผสมที่สัดส่วนเท่ากันที่ 1:1 จากบริษัท Sea Chief Enterprise Co., LTD (Thailand) ทำหน้าที่เคลือบผิวชิ้นงานหลังคายางป้องกันต่อสภาพแวดล้อมต่างๆได้ดี มีสมบัติทางด้านทนต่อการขีดขีด แรงกระแทก มีความสามารถยึดตัวและยึดเกาะดี ทนทานต่อแสง UV และความชื้นได้ดี และมีสมบัติที่น่าสนใจของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนชนิด Anti-UV Coating ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนชนิด Anti-UV Coating

Properties	สารเคลือบผิวหน้า ชนิด C-602A	สารทำให้คงรูป ชนิด C-602B
Specific gravity	$0.83 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$	$0.9 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$
Viscosity	$2000 \pm 500 \text{ Centipoise; cps}$	$50 \pm 20 \text{ Centipoise; cps}$
NCO content	-	$0.83 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$
Appearance	Green liquid	Yellowish transparent
Surface drying time	3 hours	
Alkalinity-tolerant	Without bubble, flaking off and color changing phenomenon	
Water-tolerant	Without fulling of cracks and flaking off phenomenon	

3.2 สูตรยาที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้สูตรยาที่ดำเนินการวิจัยต่อเนื่องจาก โครงการ “การพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคายางประหยัดพลังงานจากวัสดุผสมยางและขี้เถ้า” [4] โดยมีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรส่วนผสมและหน้าที่ของสารเคมีที่ใช้วิจัย [3]

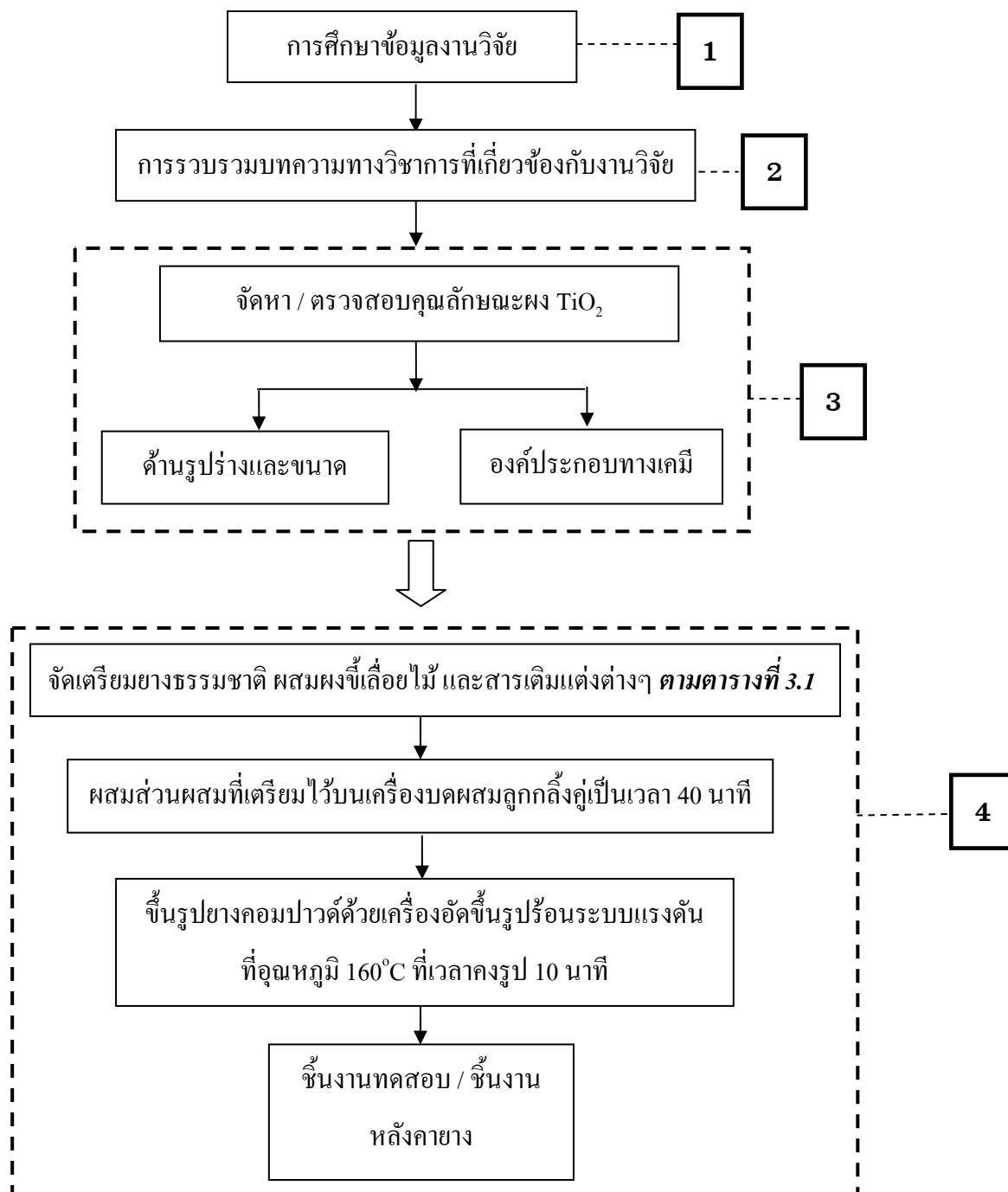
สารเคมี	ปริมาณ (phr)	หน้าที่
Natural Rubber (STR20)	100 ส่วน	Matrix
ZnO (Zinc oxide)	33.4	Activator
Stearic acid	13.4	Activator
MBT (Mercaptobenzthaisoles)	3.4	Accelerators
DPG (Diphenylguanidine)	1.4	Accelerator
Sulfur powder (450 mesh)	20	Cross-linker
Silica (TOKUSIL 233)	45.0	Reinforcement
Wood sawdust	40	Filler
Iron oxide red (690 B)	4.0	Colorant
Silane (KBM 603A)	0.5% ต่อน้ำหนักซีเมนต์	Coupling agent
UV stabilizer (TINUVIN 234)	0.1	UV absorber
Anti-oxidant (IRGANOX 1076)	0.1	Anti-oxidant
Anti-ozonant (Enhance)	3.0	Anti-ozonant
Flame retardant (APYRAL 40 CD)	100	Flame retardant

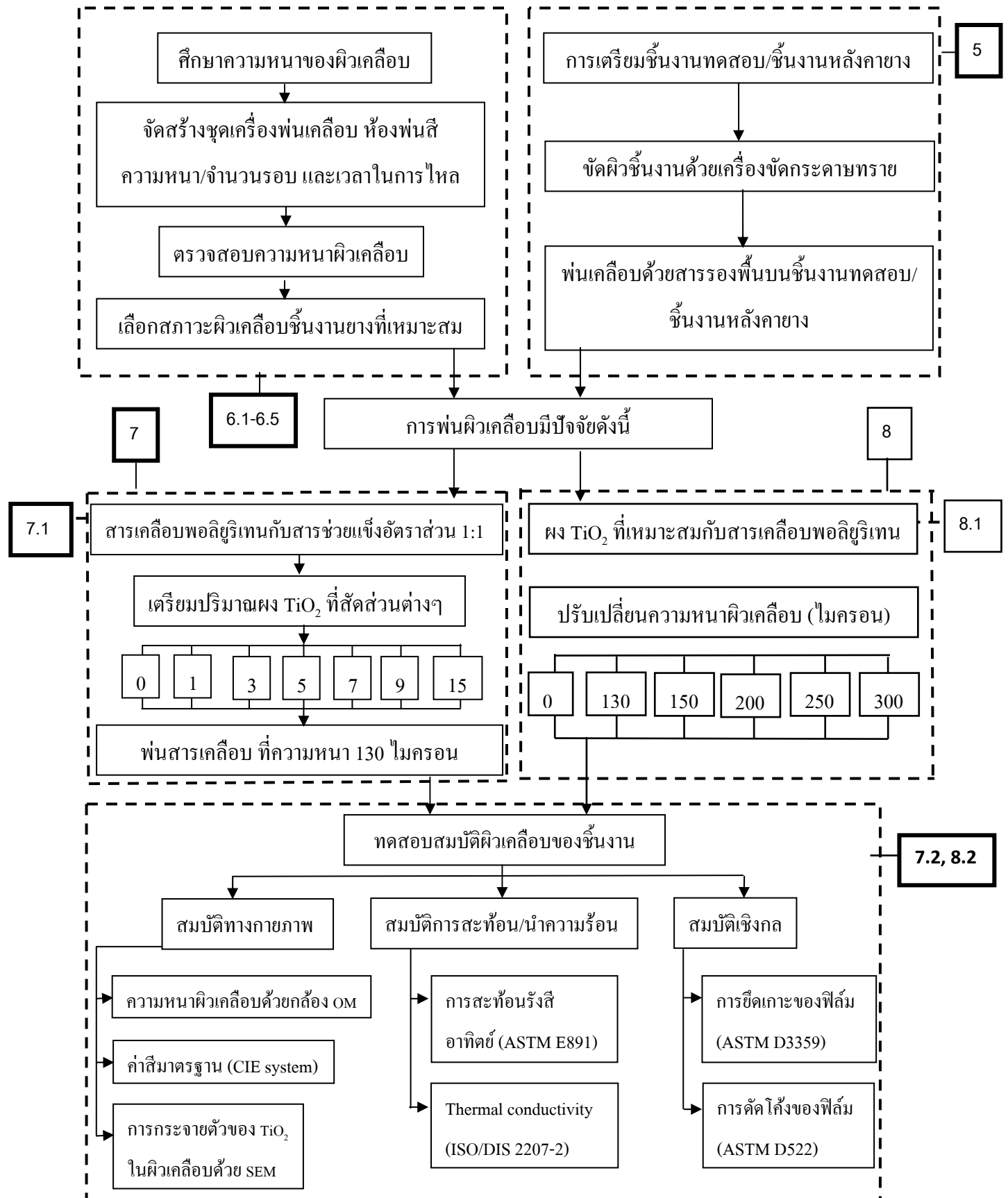
3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

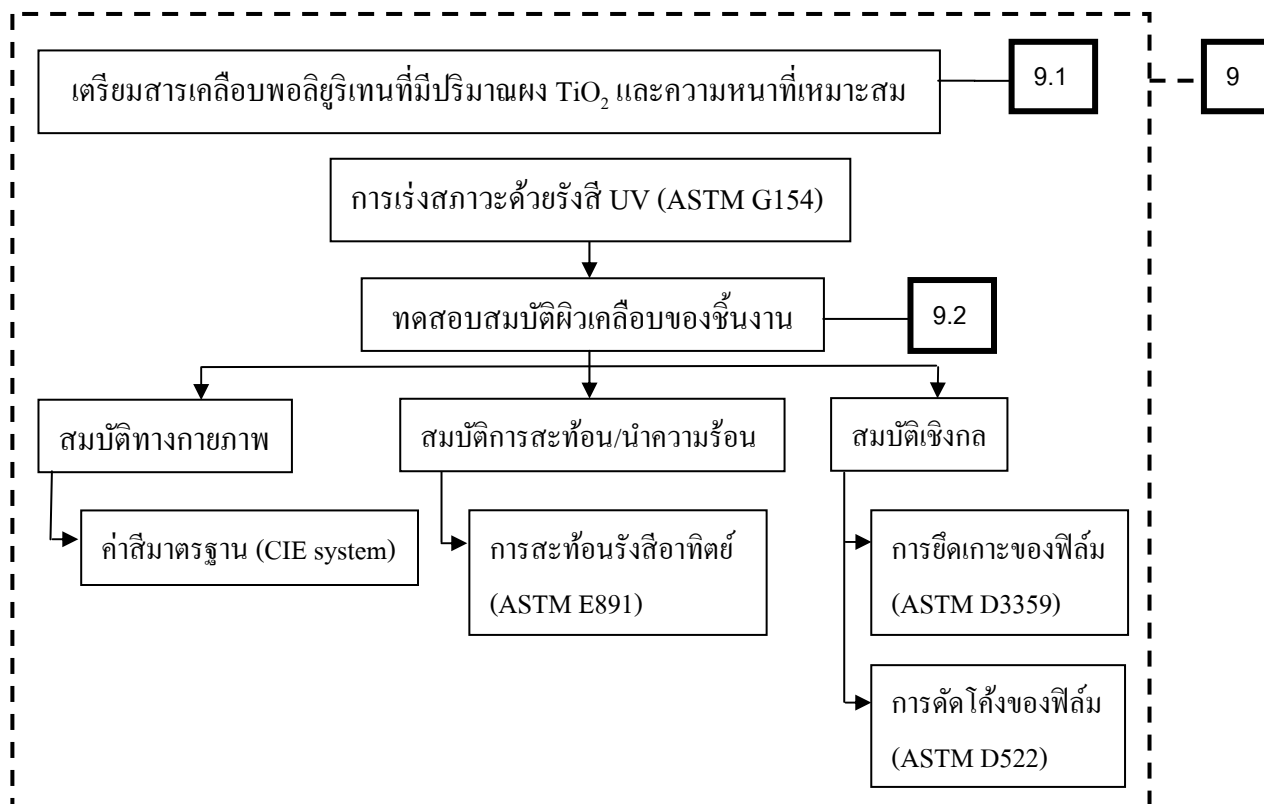
แผนงานในการดำเนินงานวิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่สำคัญ คือ

- 1) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการพันเคลือบผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
- 2) ศึกษาผลของปริมาณผงไททานเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนแผ่นหลังคayangพาราที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อน และสมบัติทางกล-กายภาพ ของหลังคayangจากวัสดุผสมยางธรรมชาติผสมจีลีน้อยไม้
- 3) ศึกษาผลของความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนแผ่นหลังคayangพาราที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อน และสมบัติทางกล-กายภาพ ของหลังคayangจากวัสดุผสมยางธรรมชาติผสมจีลีน้อยไม้

ในส่วนแรกของงานวิจัยได้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการพันเคลือบผิวเคลือบพอลิยูรีเทน จากนั้นจึงศึกษาปริมาณผงไททานเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนา 130 ± 10 ไมครอน และเมื่อได้ปริมาณผงไททานเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมจึงนำมาศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน และทำการตรวจสอบสมบัติ ดังนี้ สมบัติทางกายภาพ (ความหนาของผิวเคลือบ การกระจายตัวของผงไททานเนียมไดออกไซด์ ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน) การสะท้อนรังสีอาทิตย์ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของชิ้นงานหลังคayangที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่มีผงไททานเนียมไดออกไซด์ สมบัติเชิงกล (การยืดเกาะของผิวเคลือบ และความทนทานการดัดโค้งของผิวเคลือบ) การเร่งสภาวะของผิวเคลือบ ลำดับการดำเนินการวิจัยโดยรวมดังแสดงใน รูปที่ 3.1







รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

รายละเอียดของแผนงาน

งานหมายเลข 1 และ 2 ศึกษาข้อมูลงานวิจัยและรวบรวมบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยโครงการนี้เป็นการนำผง TiO_2 เติมลงในสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน ที่พ่นเคลือบบนชิ้นงานหลังคากายาง เป็นการวิจัยต่อเนื่องจากโครงการ “การพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคากายางประหยัดพลังงานจากวัสดุผสมยางและซีลีเนียม” โครงการเลขที่ RDG4950033 ที่ผ่านมา การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เกี่ยวกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน วัสดุผงไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) สภาพการผลิต การเคลือบผิวพอลิยูรีเทน วิธีการทดสอบผิวเคลือบ การตรวจสอบสมบัติของผิวเคลือบ และรวบรวมบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานหมายเลข 3 การจัดหาและตรวจสอบคุณลักษณะของผงไททาเนียมไดออกไซด์

การตรวจสอบรูปร่าง และขนาดอนุภาคของผงไททาเนียมไดออกไซด์

การตรวจสอบคุณลักษณะของผงไททาเนียมไดออกไซด์ ด้านรูปร่างและขนาด โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากบริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5800 เพื่อพิจารณารูปร่าง และขนาดของอนุภาค TiO_2 ค่า Accelerating Voltage ของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ 15 kV โดยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังนี้ นำผง TiO_2 วางบน Stub ที่มีกาวคาร์บอน (Carbon tape) เพื่อให้มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนผ่านที่ผิวชิ้นงานยาง ผลการทดลองภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผง TiO_2 โดยใช้เทคนิค SEM

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงไททาเนียมไดออกไซด์

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบทางเคมีของผง TiO_2 โดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) จากบริษัท Rigaku รุ่น ZSX Primus II เป็นการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดที่มีในผง TiO_2

งานหมายเลข 4 การเตรียมผสมยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง และขึ้นรูปชิ้นงานหลังคายาง

การเตรียมสารประกอบยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับผงซีลีเนียม และสารเติมแต่งชนิดต่างๆ โดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จาก บริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ตามส่วนประกอบของสารประกอบยางแสดงในตารางที่ 3.2 โดยใช้เวลาในการผสมสารประกอบยางทั้งหมด 40 นาที ดังแสดงลำดับขั้นตอนในการผสมในตารางที่ 3.3 ดังนี้

ขั้นตอนการเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

นำสารประกอบยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับผงซีลีเนียม โดยเตรียมขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot press) จากบริษัท LAB TECH จำกัด อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 160°C ใช้แรงดันโมลต์ที่ 170 กก./ตร.ซม. เวลาในการคงรูป 10 นาที

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับสารเติมแต่ง

สารเคมี	เวลาที่ใช้ผสม (นาที)	หน้าที่
Natural rubber STR 20	5	Matrix
ZnO (Zinc oxide)	2	Activator
Stearic acid	2	Activator
UV stabilizer (TINUVIN 234)	1	UV absorber
Anti-oxidant (IRGANOX 1076)	1	Anti-oxidant
Anti-ozonant (Enhance)	1	Anti-ozonant
Silica (TOKUSIL 233)	6	Reinforcement
Wood sawdust	6	Filler
Flame retardant (APYRAL 40 CD)	5	Flame retardant
Iron oxide red 690 B	2	Colorant
MBT (Mercaptobenzthaisoles)	2	Accelerators
DPG (Diphenylguanidine)	2	Accelerator
Sulfur powder 450 mesh	5	Cross-linker

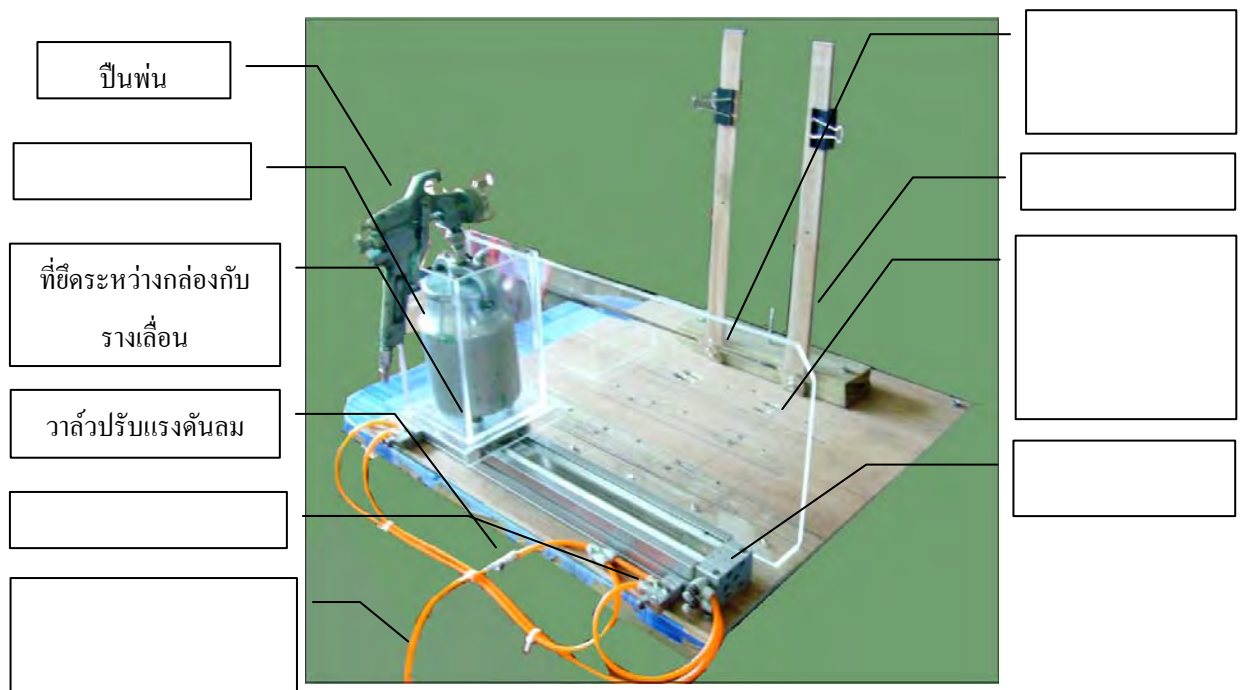
งานหมายเลข 5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบและการเคลือบสารรองพื้น

- 1) การตัดผิวชิ้นงานทดสอบ/หลังคายาง โดยใช้เครื่องตัดกระดาษทราย
- 2) พ่นเคลือบด้วยสารรองพื้น (Primer) เกรด C 501 เพื่อเพิ่มการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานทดสอบ โดยใช้
 - สภาวะการพ่นเคลือบ ดังนี้
 - (1) ระยะในการพ่น 30 cm (ระยะห่างระหว่างชิ้นงานถึงปืนพ่น)
 - (2) จำนวนรอบการพ่นเคลือบที่ 2 รอบ (2 เที้ยว)
 - (3) แรงดันลมในการพ่นคงที่ 6 - 6.5 kg/cm²
 ชิ้นงานทดสอบ/หลังคายาง ที่ผ่านการพ่นเคลือบด้วยสารรองพื้นแล้ว ให้ชิ้นงานแห้งที่อุณหภูมิห้องใช้
 เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

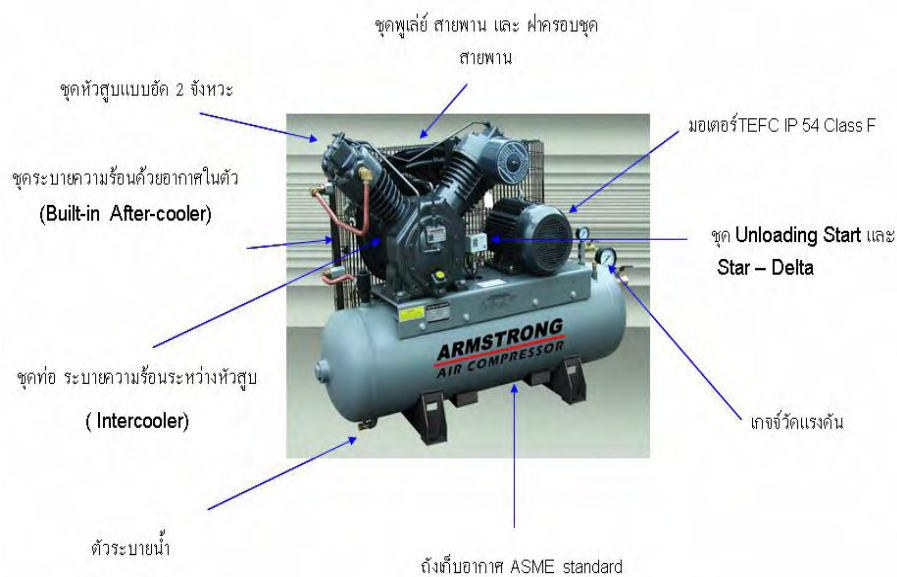
งานหมายเลข 6 การศึกษาระยะการพ่นและความหนาสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนบนชิ้นงานแผ่นยาง โดยใช้ชุดการพ่นเคลือบแบบรางเลื่อน

งานหมายเลข 6.1 การออกแบบและจัดสร้างชุดทดลองอุปกรณ์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

งานในส่วนนี้เป็นการจัดสร้างอุปกรณ์ในการพ่นเคลือบ โดยได้ออกแบบใช้รางเลื่อนมาควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอกปืนพ่นสี โดยรางเลื่อนนี้ใช้ระบบนิวแมติก (แรงดันลม) ในการทำงาน และบนรางเลื่อนทำการยึดด้วยกล่องวัสดุอะครีลิก ที่ใช้ในการติดตั้งกระบอกปืนพ่นสี และทำแผ่นการค้ำอะครีลิกไว้ตำแหน่งด้านหน้าของรางเลื่อน เพื่อป้องกันละอองสีมาติดที่รางเลื่อนขณะทำการพ่น และติดตั้งวาล์วควบคุมแรงดันลมเพื่อควบคุมการเคลื่อนของกาพ่นสี และต่อเข้าปั๊มจ่ายลม ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองการพ่นเคลือบระบบนิวแมติก



รูปที่ 3.3 ปัมพ์จ่ายลม

งานหมายเลข 6.2 การจัดสร้างชุดแผงกั้นที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

การจัดสร้างชุดแผงกั้นที่ใช้ในการพ่นเคลือบ โดยมีขนาด 1.20 m x 1.20 m x 2.00 m (กว้างxยาวxสูง) ซึ่งสามารถป้องกันการพัดผ่านของลมในบริเวณที่พ่นเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ห้องพ่นเคลือบที่ติดตั้งแผงกั้นลม

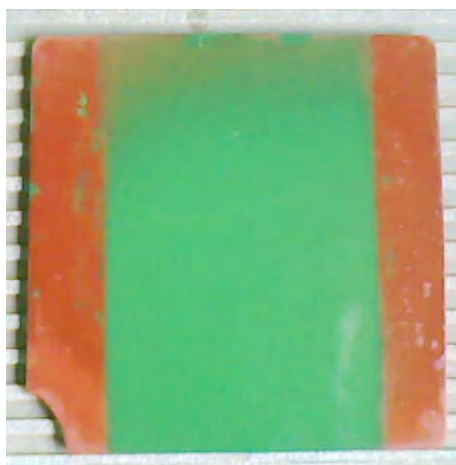
งานหมายเลข 6.3 การศึกษาความหนาผิวเคลือบโดยการปรับระยะการพ่นเคลือบและจำนวนรอบการพ่น เมื่อทำการจัดสร้างอุปกรณ์ในการพ่นเคลือบแล้ว ทำการทดลองพ่นเคลือบชิ้นงานและศึกษาระยะที่เหมาะสม โดยการปรับเปลี่ยนระยะชิ้นงานห่างจากหัวพ่นปืน และเพิ่มจำนวนรอบการพ่นชิ้นงาน ดังนี้

- 1) ระยะที่ 1 ตำแหน่งชิ้นงานถึงหัวพ่นเคลือบที่ระยะ 20 cm.
- 2) ระยะที่ 2 ตำแหน่งชิ้นงานถึงหัวพ่นเคลือบที่ระยะ 30 cm.
- 3) ระยะที่ 3 ตำแหน่งชิ้นงานถึงหัวพ่นเคลือบที่ระยะ 40 cm.

และในแต่ละระยะที่พ่นเคลือบพอลิยูรีเทน ทำการทดลองเพิ่มจำนวนรอบการพ่นซ้ำลงบนชิ้นงาน ดังนี้ จำนวน 1 2 3 4 5 6 และ 7 รอบ (โดยที่จำนวนรอบการพ่น 1 รอบเท่ากับการพ่นชิ้นงาน 1 เทียว) เพื่อตรวจสอบหาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

งานหมายเลข 6.4 การตรวจสอบเวลาในการไหลของสารเคลือบพอลิยูรีเทน

คณะวิจัยฯ ตรวจสอบเวลาในการไหลของสารเคลือบพอลิยูรีเทน โดยวิธีการใช้ถ้วยวัดความหนืด (Viscosity cups) เปรียบเทียบกับเวลาหยดของสีที่ไหลออกจากถ้วยวัดสี ผลการทดลองพบว่า เวลาในการไหลของสีเคลือบพอลิยูรีเทนมีค่าไม่แตกต่างกัน อยู่ระหว่าง 20 – 23 วินาที ต่อจากนั้นทำการพ่นเคลือบชิ้นงานที่ระยะการพ่น โดยในการพ่นเคลือบกำหนดใช้แรงดันลมอยู่ระหว่าง 6 – 6.5 kg/cm² ความเร็วการเคลื่อนร่างของกาพ่นสีคงที่ ที่ 0.04 m/s ชิ้นงานแผ่นยางที่ผ่านการพ่นด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานแผ่นยางที่พ่นเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน

งานหมายเลข 6.5 การตรวจสอบความหนาขึ้นงานแผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

การนำชิ้นงานแผ่นยางที่ผ่านการพ่นสารเคลือบพอลิยูรีเทนแล้ว ตรวจสอบความเรียบ และความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่การพ่นเคลือบระยะต่างๆ (20 30 และ 40 cm ของระยะขึ้นงานห่างจากหัวพ่นปืน) และจำนวนรอบการพ่นดังนี้ 1 2 3 4 5 6 และ 7 รอบ ตรวจสอบพื้นผิวขึ้นงานและความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง รุ่น BHM-112KL ของบริษัท Olympus optical ใช้กำลังขยายวัตถุ 10 เท่า

งานหมายเลข 7 การเตรียมสีเคลือบพอลิยูรีเทน การพ่นเคลือบขึ้นงานแผ่นยาง และการทดสอบสมบัติต่างๆ ของผิวเคลือบ ที่ศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนา 130 ± 10 ไมครอน

งานหมายเลข 7.1 การเตรียมสีเคลือบพอลิยูรีเทน การพ่นเคลือบขึ้นงานแผ่นยาง
ขั้นตอนการพ่นเคลือบ ดังนี้

- 1) นำสารเคลือบพอลิยูรีเทนทางการค้า (เกรด 602A) และผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ผสมในเครื่องปั่นที่ความเร็วประมาณ 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
- 2) ใส่สารช่วยแข็งทางการค้า (เกรด 602B) ที่สัดส่วนเท่ากับสารเคลือบพอลิยูรีเทน (1:1) ปั่นกวนกับสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์และสารช่วยแข็งรวมกันเป็นเวลา 15 นาที
- 3) นำสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละสูตร ตรวจสอบค่าความหนืดโดยใช้ถ้วยวัดความหนืด (Viscosity cups) ทำการพ่นสารเคลือบพอลิยูรีเทน บนชิ้นงานแผ่นยางธรรมชาติ ผสมสีเรียบร้อยแล้ว โดยใช้สภาวะการพ่นเคลือบเหมือนกันทุกสูตร ดังนี้
 - (1) ระยะในการพ่น 30 cm (ระยะห่างระหว่างชิ้นงานถึงปืนพ่น)
 - (2) จำนวนรอบการพ่นเคลือบที่ 3 รอบ (3 เที้ยว)
 - (3) แรงดันลมในการพ่นคงที่ $6 - 6.5 \text{ kg/cm}^2$
- 4) ชิ้นงานแผ่นยางที่ผ่านการพ่นเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน รอให้ชิ้นงานแห้งที่อุณหภูมิห้องใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง เพื่อเตรียมทดสอบในงานหมายเลข 7.2

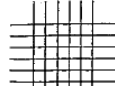
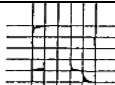
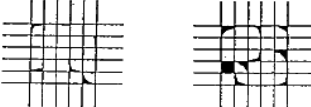
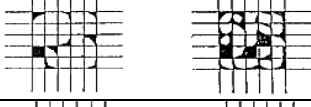
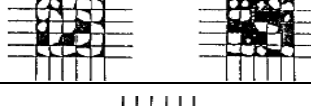
งานหมายเลข 7.2 การตรวจสอบชิ้นงานยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์
รายละเอียดของงาน ดังนี้

งานหมายเลข 7.2.1 การตรวจสอบความหนาของผิวเคลือบของชิ้นงานแผ่นยางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

งานหมายเลข 7.2.2 การขีดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

การทดสอบการขีดเกาะของผิวเคลือบตามมาตรฐาน ASTM D3359 (2008) โดยใช้เครื่องทดสอบ Cross hatch cutter มีวิธีการดังนี้ กรีดผิวฟิล์มสีสารเคลือบให้มีความลึกถึงแผ่นทดสอบ เป็นรอยตารางเท่าๆ กัน จำนวน 6 รอย มีระยะห่างระหว่างช่อง 1 มิลลิเมตร ใช้แถบขาว (ตามมาตรฐานตามเทปกาว มอก.285 เล่ม 48) ติดบริเวณพื้นที่ที่กรีดแล้วทำการดึงอย่างรวดเร็ว จากนั้นทดสอบผิวของฟิล์ม มีการหลุดลอกเทียบกับพื้นที่ โดยเทียบกับมาตรฐานที่แสดงลักษณะของผิวเคลือบที่หลุด ตั้งแต่ 0B – 5B ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ลักษณะการขีดเกาะของผิวเคลือบ

Classification of adhesion test results		
Classification	Percent area removed	Surface of cross-cut area from which flaking occurred for six parallel cuts and adhesion range by percent
5B	0% None	
4B	Less than 5%	
3B	5-15%	
2B	15-35%	
1B	35-65%	
0B	Greater than 65%	

งานหมายเลข 7.2.3 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

การตรวจสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้เครื่องทดสอบ UV-VIS-NIR Recording spectrophotometer รุ่น UV-3100 ยี่ห้อ Shimadzu ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยกำหนดสภาวะการทดสอบ ดังนี้ Reflectance Mode, Slit Width 20 nm, Interval scan 1 nm วัดการสะท้อนรังสีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 ถึง 2100 นาโนเมตร ผลที่ได้จากการสะท้อนรังสีแต่ละความยาวคลื่น นำไปคำนวณการสะท้อนรังสีอาทิตย์ด้วยวิธีการเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted average) ตามมาตรฐาน ASTM E891 (1992)



รูปที่ 3.6 เครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer

งานหมายเลข 7.2.4 การตรวจสอบสีของชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทน

งานในส่วนนี้เป็นการตรวจสอบค่าสีของชิ้นงานแผ่นยางโดยใช้เครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer ตามมาตรฐานในการวัดสีของ CIE System (Commission International de l'Eclairage); CIE (L^* a^* b^*) โดยมีตัวแปรค่าสีทั้ง 3 ค่า คือ L^* a^* และ b^* มีรายละเอียดดังนี้

L^* แสดงถึง ค่าความสว่าง (Lightness) ของสี โดยมีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว)

a^* แสดงถึง ค่าของโซนสีแดงและสีเขียว โดยที่โซนค่าบวกบ่งบอกถึงสีแดงมากขึ้น แต่ถ้าโซนค่าเป็นลบ บ่งบอกถึงสีเขียวมากขึ้น

b^* แสดงถึง ค่าของโซนสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยที่โซนค่าบวกบ่งบอกถึงสีเหลือง แต่ถ้าโซนค่าเป็นลบ บ่งบอกถึงสีน้ำเงินมากขึ้น

งานหมายเลข 7.2.5 ความทนทานต่อการดัดโค้งของฟิล์ม

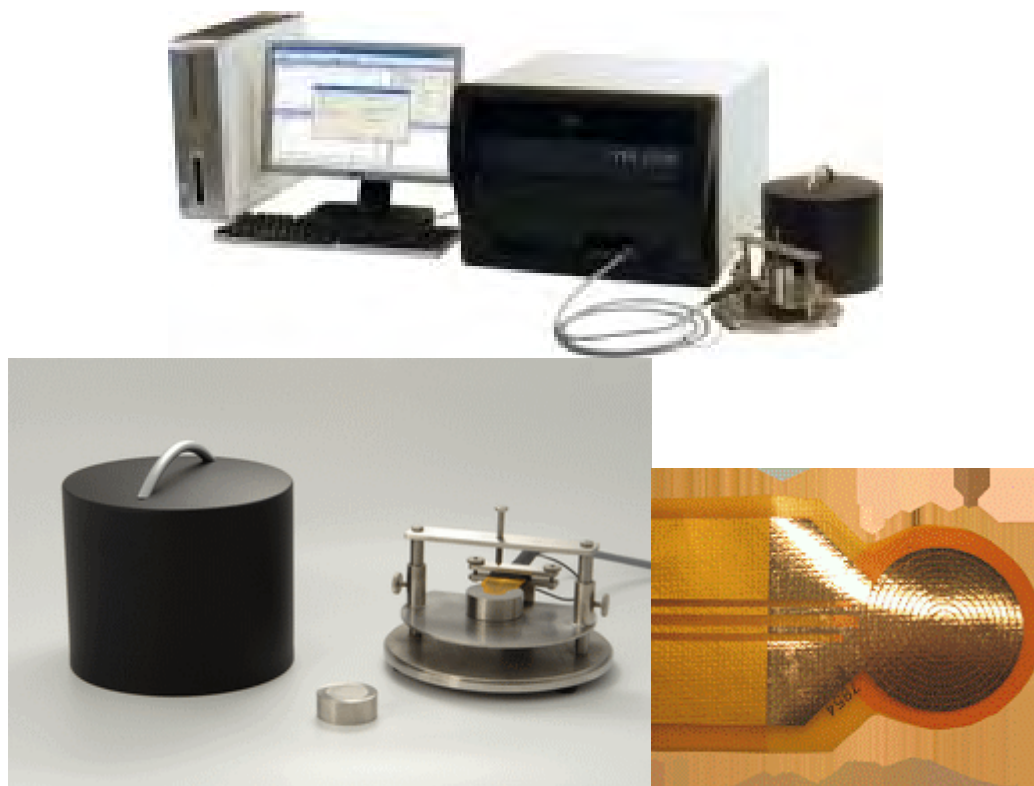
การทดสอบความทนทานต่อการดัดโค้งของฟิล์มกระทำตามมาตรฐาน ASTM D522 (2001) โดยใช้เครื่องมือ Mandrel set รุ่น MG 1412 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ทดสอบโดยการดัดแผ่นทดสอบที่มีฟิล์มเคลือบอยู่ ไม่ให้ด้านที่มีฟิล์มสัมผัสแกนทรงกระบอก เริ่มดัดแผ่นทดสอบโดยใช้แกนทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดไปต่ำสุดเมื่อดัดแล้วตรวจสอบแผ่นทดสอบว่ามีรอยร้าวหรือแตกบนฟิล์มหรือไม่ รายงานผลว่าฟิล์มไม่แตกร้าวที่ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง ทำการทดสอบชิ้นงาน จำนวน 3 ครั้ง เพื่อยืนยันผลทดสอบที่ได้



รูปที่ 3.7 เครื่องมือทดสอบ Mandrel set รุ่น MG 1412

งานหมายเลข 7.2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทนที่เดิมผงไททานเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้เครื่องทดสอบ Thermal Conductivity Analysis (Hot Disk TCA) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้หลักการนำความร้อน โดยที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัสดุ ให้พลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ตามมาตรฐาน ISO/DIS 2207-2 (2007)



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบ Thermal Conductivity Analysis (Hot Disk TCA)

วิธีการเตรียมตรวจสอบ Thermal conductivity (k) ของวัสดุ

- 1) เตรียมชิ้นงานทดสอบขนาด $5.5 \times 5.5 \times 1.0 \text{ cm}^3$
- 2) ทำความสะอาดที่ผิวหน้าชิ้นงานก่อนทดสอบ
- 3) จากนั้นนำเข้าเครื่องทดสอบค่า Thermal conductivity (k) โดยเครื่องทดสอบมีแผ่นตัวรับสัญญาณ (Sensor) ที่ทำหน้าที่ให้ความร้อน และวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปหลังทดสอบเสร็จ และวางแผ่นทดสอบให้ผิวหน้าด้านที่ต้องการทดสอบอยู่ระหว่างแผ่นตัวรับสัญญาณ โดยมีสถานะในการทดสอบพลังงานที่ใช้ทดสอบ 0.08 วัตต์ เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 60 วินาที และอุณหภูมิบรรยากาศ 27 องศาเซลเซียส โดยตรวจสอบผลต่างของอุณหภูมิของแผ่นตัวรับสัญญาณ โดยเครื่องทดสอบแปรผลตามสูตรคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

งานหมายเลข 7.2.7 ตรวจสอบการกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน การตรวจสอบการกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ และนำไปตรวจสอบ X-ray mapping ของธาตุไททาเนียม โดยใช้เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM) ของบริษัท JEOL Ltd. รุ่น JSM-6380LV, EDS OXFORDIE 300 ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscope

งานหมายเลข 8 การเตรียมสีเคลือบพอลิยูรีเทน การพ่นเคลือบชิ้นงานแผ่นยางและการทดสอบสมบัติของผิวเคลือบที่ศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน

งานหมายเลข 8.1 การเตรียมสีเคลือบพอลิยูรีเทน และการพ่นเคลือบชิ้นงานแผ่นยาง

ขั้นตอนการพ่นเคลือบ ดังนี้

- 1) นำสารเคลือบพอลิยูรีเทน (เกรด 602A) และผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ผสมในเครื่องปั่นที่ความเร็วประมาณ 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
- 2) ใส่สารช่วยแข็ง (เกรด 602B) ที่สัดส่วนเท่ากับสารเคลือบพอลิยูรีเทน (1:1) ปั่นกวนกับสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์และสารช่วยแข็งรวมกันเป็นเวลา 15 นาที
- 3) นำสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละสูตร ตรวจสอบค่าความหนืดโดยใช้ถ้วยวัดความหนืด (Viscosity cups) ทำการพ่นสารเคลือบพอลิยูรีเทน บนชิ้นงานแผ่นยางธรรมชาติ

- (1) ระยะในการพ่น 30 cm (ระยะห่างระหว่างชิ้นงานถึงปืนพ่น)
- (2) แรงดันลมในการพ่นคงที่ 6 - 6.5 kg/cm²
- 4) ชิ้นงานแผ่นยางที่ผ่านการพ่นเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน รอให้ชิ้นงานแห้งที่อุณหภูมิห้องใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง เพื่อเตรียมทดสอบต่อไปในงานหมายเลข 8.2

งานหมายเลข 8.2 การตรวจสอบชิ้นงานยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน (มีรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบเหมือนงานหมายเลข 7.2) มีการทดสอบดังนี้

- 1) การตรวจสอบความหนาของผิวเคลือบของชิ้นงานแผ่นยาง
- 2) การยึดเกาะของฟิล์มผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
- 3) การสะท้อนรังสีอาทิตย์ผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
- 4) ความทนทานต่อการตัดโค้งของฟิล์ม

งานหมายเลข 9 ศึกษาการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV

สภาวะในการทดสอบ

- 1) ชิ้นงานหลังยางที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 นำมาทดสอบการเร่งสภาวะโดยใช้เครื่องเร่งสภาวะยูวี Accelerated Weathering Tester; QUV ดังแสดงในรูปที่ 3.11
- 2) ใช้หลอดทดสอบที่ให้กำเนิดรังสี UV ชนิด UVB 313 (ความยาวคลื่น 280-315 nm)
- 3) Irradiance 0.63 W/m²
- 4) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G154 (2006); Cycle 2 (use for coating) โดยมีสภาวะทดสอบ 2 Step สลับกัน ดังนี้
 - (1) Step I: ทดสอบ UV ที่อุณหภูมิทดสอบ 60°C เวลา 4 ชั่วโมง
 - (2) Step II: ทดสอบ Condensation ที่อุณหภูมิทดสอบ 50°C เวลา 4 ชั่วโมง
- 5) หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการเร่งสภาวะที่เวลา ดังนี้ 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง ทำการตรวจสอบการสะท้อนแสงโดยใช้เครื่อง UV-VIS-NIS Recording spectrophotometer ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-3100



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทนสำหรับทดสอบการเร่งสภาวะด้วยรังสี UV



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบ Accelerated Weathering Tester; QUV

งานหมายเลข 9.1 การเตรียมสีเคลือบพอลิยูรีเทน การพ่นเคลือบชิ้นงานแผ่นยาง
ขั้นตอนการพ่นเคลือบ ดังนี้

- 1) นำสารเคลือบพอลิยูรีเทน (เกรด 602A) และผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ผสมในเครื่องปั่นที่ความเร็วประมาณ 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที
- 2) เติมสารช่วยแข็ง (เกรด 602B) ที่สัดส่วนเท่ากับสารเคลือบพอลิยูรีเทน (1:1) ปั่นกวนกับสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ และสารช่วยแข็งรวมกันเป็นเวลา 15 นาที

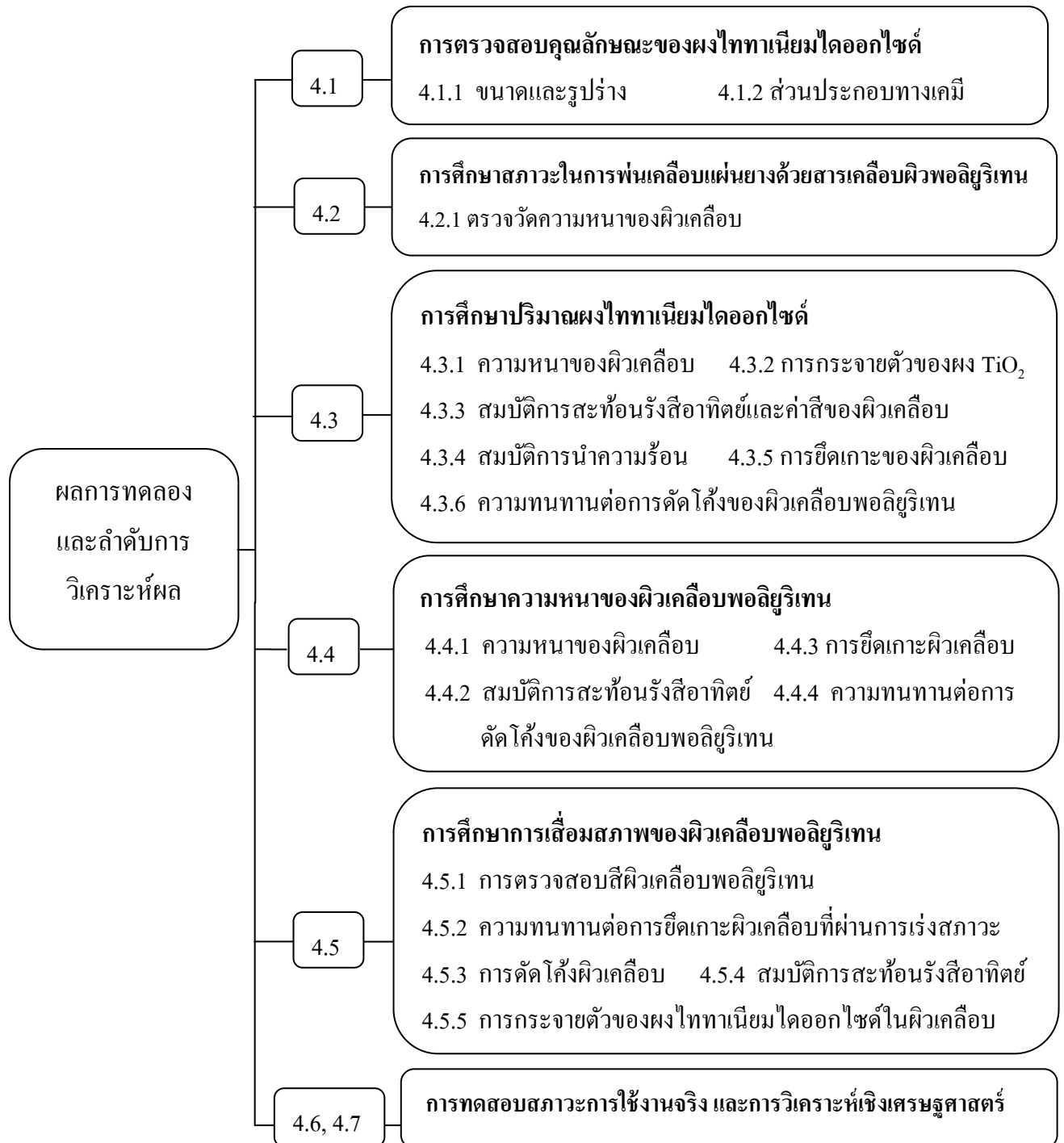
- 3) นำสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละสูตร ตรวจสอบค่าความหนืดโดยใช้ถ้วยวัดความหนืด (Viscosity cups) ทำการพ่นสารเคลือบพอลิยูรีเทนบนชิ้นงานแผ่นยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อยไม้ โดยใช้สภาวะการพ่นเคลือบ ดังนี้
 - (1) ระยะในการพ่น 30 cm (ระยะห่างระหว่างชิ้นงานถึงปืนพ่น)
 - (2) แรงดันลมในการพ่นคงที่ 6 - 6.5 kg/cm²
 - (3) จำนวนรอบการพ่น 2 รอบ
- 4) ชิ้นงานแผ่นยางที่ผ่านการพ่นเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน รอให้ชิ้นงานแห้งที่อุณหภูมิห้องใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง เพื่อเตรียมทดสอบต่อไปในงานหมายเลข 9.2

งานหมายเลข 9.2 การตรวจสอบชิ้นงานยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ 130 ± 10 ไมครอน (มีรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบเหมือนงานหมายเลข 7.2) รายละเอียดดังนี้

- 1) การขีดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
- 2) การสะท้อนรังสีอาทิตย์ผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
- 3) การตรวจสอบสีของชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทน
- 4) ความทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบ

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองทั้งหมดในภาพรวม และลำดับการวิเคราะห์ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1

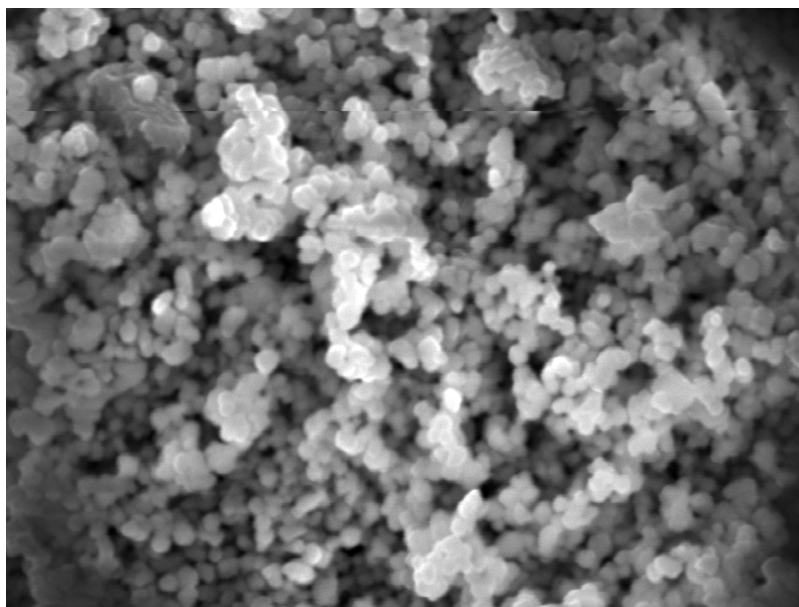


รูปที่ 4.1 ลำดับการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของผงไททาเนียมไดออกไซด์

4.1.1 การตรวจสอบขนาด และรูปร่างของผงไททาเนียมไดออกไซด์

การตรวจสอบภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของผง TiO_2 โดยใช้เทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าลักษณะอนุภาคของผง TiO_2 มีลักษณะทรงกลม ขนาดอนุภาคประมาณ 0.4 ไมครอน เกาะตัวกันเป็นกลุ่ม (Agglomerate)



รูปที่ 4.2 ลักษณะอนุภาคของผง TiO_2 โดยใช้เทคนิค SEM

4.1.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงไททาเนียมไดออกไซด์

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบทางเคมีของผง TiO_2 โดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ด้วยเครื่อง Rigaku รุ่น ZSX Primus II เป็นการวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนส์ที่ปลดปล่อยออกมาจากองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดที่มีในผง TiO_2 แสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของผงไททานเนียมไดออกไซด์

องค์ประกอบ	สัดส่วน (%)
ไททานเนียมไดออกไซด์; TiO_2	93.60
ซิลิกอนไดออกไซด์; SiO_2	2.55
อะลูมิเนียมออกไซด์; Al_2O_3	2.48
กลุ่มโลหะออกไซด์อื่นๆ	4.42
Compton และ Rayleigh	1.98

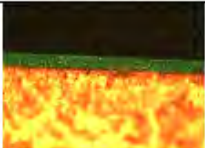
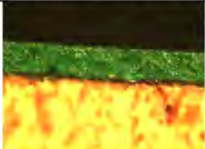
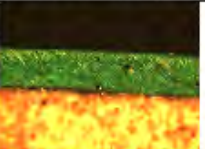
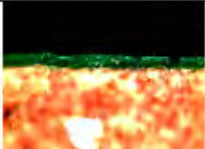
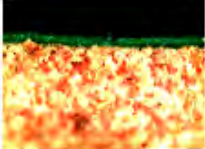
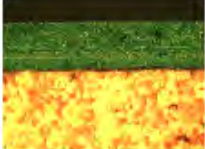
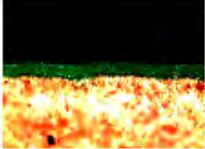
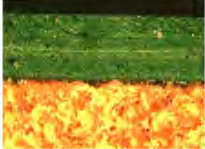
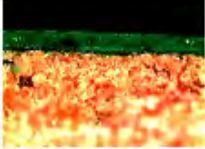
ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผงไททานเนียมไดออกไซด์ พบว่า องค์ประกอบของไททานเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก 93.6% และมีกลุ่มโลหะออกไซด์อื่นๆ ประมาณ 6.4% เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น

4.2 การศึกษาสถานะในการพ่นเคลือบแผ่นยางด้วยสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

การนำชิ้นงานแผ่นยางที่ผ่านการพ่นสารเคลือบพอลิยูรีเทนแล้ว ตรวจสอบความเรียบ และความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ระยะการพ่นเคลือบที่ 20 30 และ 40 cm ของระยะชิ้นงานที่ห่างจากหัวพ่น และจำนวนรอบการพ่น ดังนี้ 1 2 3 4 5 6 และ 7 รอบ

4.2.1 การตรวจสอบพื้นผิวและความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

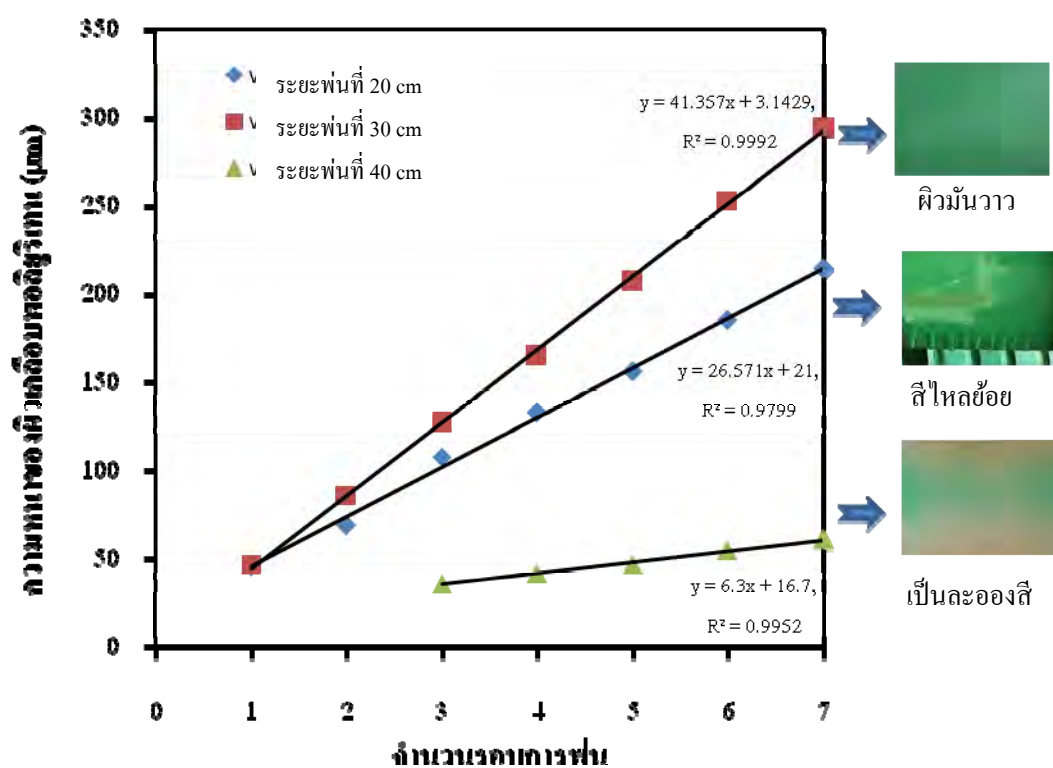
ในการตรวจสอบผิวเคลือบของหลังคาที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทน ตรวจสอบความหนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ของบริษัท Olympus optical, Model BHM-112KL โดยใช้กำลังขยายวัตถุ 10 เท่า ดังรูปที่ 4.3 - 4.4 และตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาความหนาและลักษณะผิวเคลือบที่ระยะการพ่น 20 30 และ 40 cm พบว่าระยะห่างของการพ่นเคลือบที่ 20 cm จำนวนรอบในการพ่นที่เพิ่มขึ้น ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้น ประมาณ 30 μm ต่อรอบการพ่น และพบว่าเมื่อจำนวนรอบการพ่นเคลือบเพิ่มขึ้น พบว่าสีเคลือบมีการไหลย้อยที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นยาง

จำนวนรอบการพ่น	ความหนาเฉลี่ยและลักษณะผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนชั้นงานยาง ที่ระยะทางของชั้นงานด้วยหัวพ่นเล็		
	ระยะ 20 ซม.	ระยะ 30 ซม.	ระยะ 40 ซม.
1	 ความหนาเฉลี่ย 46 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 47 μm .	เป็นละอองสีที่ผิวหน้า
2	 ความหนาเฉลี่ย 69 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 86 μm .	เป็นละอองสีที่ผิวหน้า
3	 ความหนาเฉลี่ย 108 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 127 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 36 μm .
4	 ความหนาเฉลี่ย 133 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 165 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 42 μm .
5	 ความหนาเฉลี่ย 156 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 207 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 47 μm .
6	 ความหนาเฉลี่ย 180 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 253 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 55 μm .
7	 ความหนาเฉลี่ย 214 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 295 μm .	 ความหนาเฉลี่ย 61 μm .

รูปที่ 4.3 ลักษณะผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนชั้นงานยาง ที่ระยะการพ่นเคลือบ 20 30 และ 40 cm และปรับเปลี่ยนจำนวนรอบการพ่นเคลือบ

ตารางที่ 4.2 ความหนาผิวเคลือบที่ปรับเปลี่ยนระยะการพ่นเคลือบ และจำนวนรอบการพ่นเคลือบ

จำนวนรอบ การพ่น	ความหนาเฉลี่ยของผิวเคลือบ (ไมครอน) ที่ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับหัวพ่นสี		
	ระยะ 20 cm	ระยะ 30 cm	ระยะ 40 cm
1	46	47	ผิวเคลือบบางมาก
2	69	86	ผิวเคลือบบางมาก
3	108	127	36
4	133	165	42
5	156	207	47
6	165	253	55
7	214	295	61



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนจำนวนรอบการพ่น

ส่วนการปรับระยะห่างการพันเคลือบเพิ่มขึ้นที่ 30 cm พบว่าผิวเคลือบพอลิยูรีเทนมีความหนาเพิ่มขึ้นประมาณ 40 μm ในแต่ละรอบการพัน ส่วนที่ระยะห่างการพันเคลือบที่ 40 cm พบว่า เมื่อพันเคลือบที่จำนวนรอบต่ำ (1-2 รอบ) ที่ผิวเคลือบหน้าขึ้นงานบางมาก และเป็นละอองสี แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบ ส่งผลทำให้ความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นประมาณ 6 μm ทั้งนี้เนื่องจากระยะการพันเคลือบห่างเกินไป จากผลการทดลองการพันเคลือบสามารถวิเคราะห์ลักษณะผิวและความหนาผิวเคลือบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนจำนวนรอบการพันเคลือบ พบว่า ระยะการพันที่ 20 cm จำนวนรอบของการพันที่ 3 รอบ มีความหนาผิวเคลือบประมาณ 108 μm แต่พบว่าผิวเคลือบไม่มีความมันวาว และพบการไหลย้อยของสารเคลือบที่บริเวณผิวหน้าขึ้นงาน ส่วนระยะการพันที่ 30 cm พบว่า ความหนาผิวเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบการพัน และพบว่าที่จำนวนการพัน 3 รอบ ผิวเคลือบมีความหนาผิวเคลือบที่ได้ มีความหนาสม่ำเสมอประมาณ $130 \pm 10 \mu\text{m}$ ลักษณะของผิวเคลือบมีความเรียบ มีความมันวาว และไม่พบการไหลย้อยของสีเคลือบ ดังนั้น ผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น จึงสามารถสรุปสภาวะการพันเคลือบบนแผ่นยางที่เหมาะสม ได้ดังนี้

- 1) ระยะห่างการพันเคลือบระหว่างหัวพันกับขึ้นงานที่ 30 cm
- 2) จำนวนรอบการพันเคลือบที่ 3 รอบ
- 3) แรงดันลมการพันเคลือบอยู่ระหว่าง 6 – 6.5 kg/cm^2
- 4) ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหัวพันเคลือบที่ 0.4 m/s
- 5) ความหนาที่เหมาะสมผิวเคลือบบนแผ่นยางที่ $130 \pm 10 \mu\text{m}$

4.3 การศึกษาผลปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

งานส่วนนี้ศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน ดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน โดยตรวจสอบความหนาและการกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ตามรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

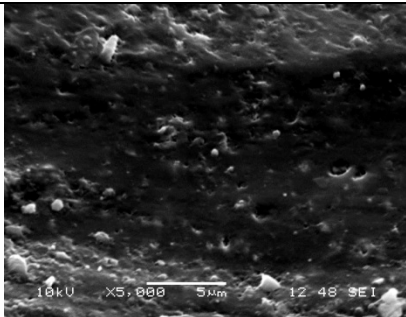
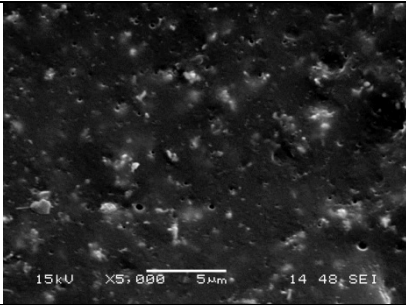
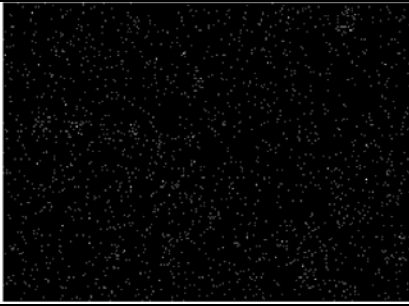
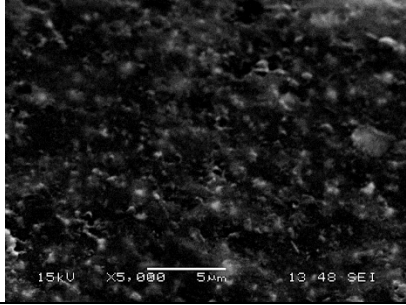
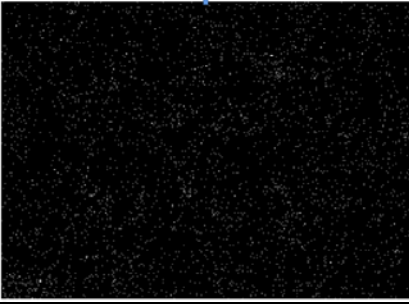
การตรวจสอบความหนาของผิวเคลือบของขึ้นงานแผ่นยางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ส่งผลทำให้ความหนาผิวเคลือบเพิ่มขึ้น ตามปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบที่ไม่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 4.3 ความหนาของผิวเคลือบที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทน

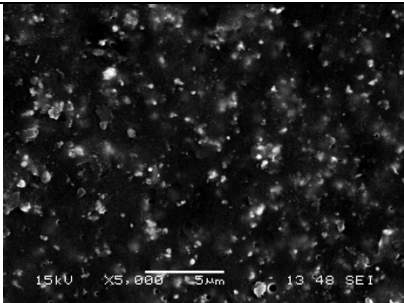
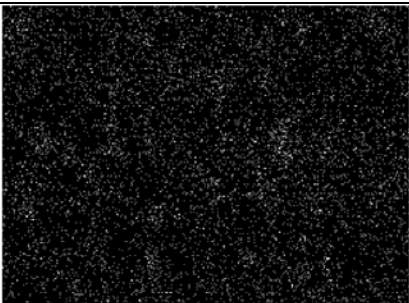
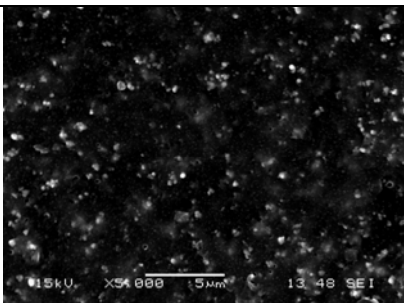
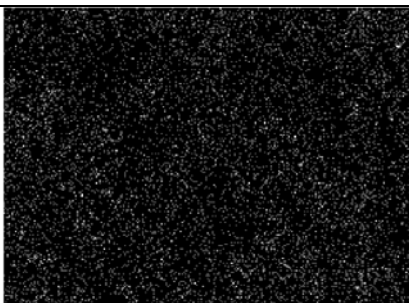
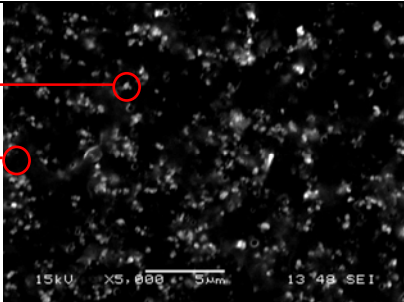
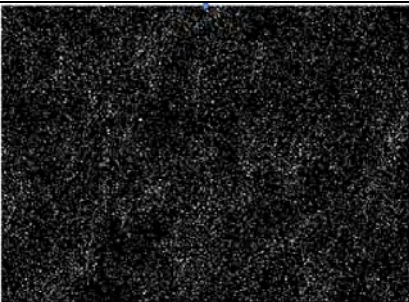
ปริมาณ TiO_2 ที่เติมในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน (ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน)	ความหนาของผิวเคลือบ (μm)
0	127 ± 5
1	132 ± 3
3	137 ± 4
5	136 ± 4
7	144 ± 3
9	135 ± 3
15	138 ± 5

4.3.2 การกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ

การศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน โดยการตรวจสอบการกระจายตัวของผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนของชิ้นงานแผ่นยางโดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ กับผิวเคลือบที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ 1 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน การกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ยังเห็นไม่ชัดเจน เนื่องจากมีปริมาณที่น้อยอยู่ และเมื่อพิจารณาการทำ X-ray mapping ของธาตุไททาเนียม พบว่า ผงไททาเนียมไดออกไซด์กระจายทั่วทั้งผิวเคลือบ ส่วนผิวเคลือบที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วน 3 และ 5 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน มีการกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่สม่ำเสมอไม่รวมเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อพิจารณาการทำ X-ray mapping ของธาตุไททาเนียม พบว่าตัวผงไททาเนียมไดออกไซด์กระจายทั่วทั้งผิวเคลือบ ส่วนผิวเคลือบที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วน 7 9 และ 15 ส่วน พบว่าผงไททาเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นในผิวเคลือบ และมีการเกาะกลุ่มกัน และเมื่อพิจารณาการทำ X-ray mapping ของธาตุไททาเนียม พบว่าผงไททาเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่หนาแน่นทั่วทั้งผิวเคลือบตามปริมาณของผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

การเติมปริมาณผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	
โครงสร้างพื้นฐานของผิวเคลือบด้วยเทคนิค SEM	X-ray mapping ของธาตุไททาเนียม
	N/A (ไม่มีผลทดสอบ)
PU pure	PU pure
	
PU + ผง TiO_2 1 g	PU + ผง TiO_2 1 g
	
PU + ผง TiO_2 3g	PU + ผง TiO_2 3g
	
PU + ผง TiO_2 5g	PU + ผง TiO_2 5g

รูปที่ 4.5 ลักษณะการกระจายตัวของ TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงปริมาณ TiO_2 ที่ปริมาณต่างๆ

การเติมปริมาณผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	
โครงสร้างพื้นฐานของผิวเคลือบด้วยเทคนิค SEM	X-ray mapping ของธาตุไททาเนียม
	
PU + ผง TiO_2 7g	PU + ผง TiO_2 7g
	
PU + ผง TiO_2 9g	PU + ผง TiO_2 9g
	
PU + ผง TiO_2 15g	PU + ผง TiO_2 15g

รูปที่ 4.5 ลักษณะการกระจายตัวของ TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงปริมาณ TiO_2 ที่ปริมาณต่างๆ (ต่อ)

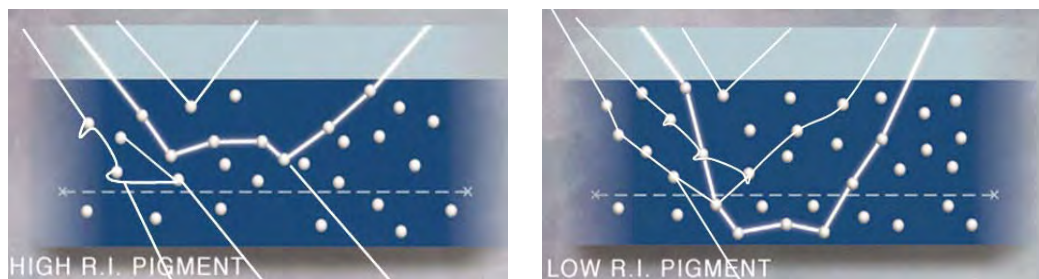
4.3.3 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ และค่าสีของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

การศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน โดยการตรวจสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ที่ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ จากตารางที่ 4.4 พบว่า เมื่อเติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการเติมปริมาณผงไททา

ตารางที่ 4.4 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณผง TiO_2

ผง TiO_2 (ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิ ยูรีเทน 100 ส่วน)	ค่าเฉลี่ยการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบ PU (%)		
	Visible (380 – 780 nm)	NIR (780-2100 nm)	Solar (190 -2100 nm)
0	9.30	31.30	20.03
1	10.14	27.28	18.44
3	11.57	29.78	20.36
5	12.71	29.78	22.06
7	14.99	36.20	25.20
9	15.94	37.61	26.35
15	17.84	40.11	28.54

ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นมีความหนาแน่นของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทนมาก เป็นผลทำให้ระยะทางในการส่องผ่านของรังสีสั้นลง ทำให้รังสีสามารถเลี้ยวเบนและหักเหออกจากผิวเคลือบได้มากกว่าในระยะที่ความลึกเท่ากัน [38] และเมื่อพิจารณาเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณน้อย พบว่า ความหนาแน่นของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบน้อย ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์มาก เป็นผลให้ระยะทางในการส่องผ่านของรังสีมาก ทำให้รังสีสามารถเลี้ยวเบน และหักเหออกจากสารเคลือบได้น้อย แสงถูกดูดกลืนไปที่ชั้นอย่างมาก จึงทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ได้มีค่าน้อย ซึ่งแสดงแบบจำลองการเดินทางของแสงผ่านผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6



(ก)

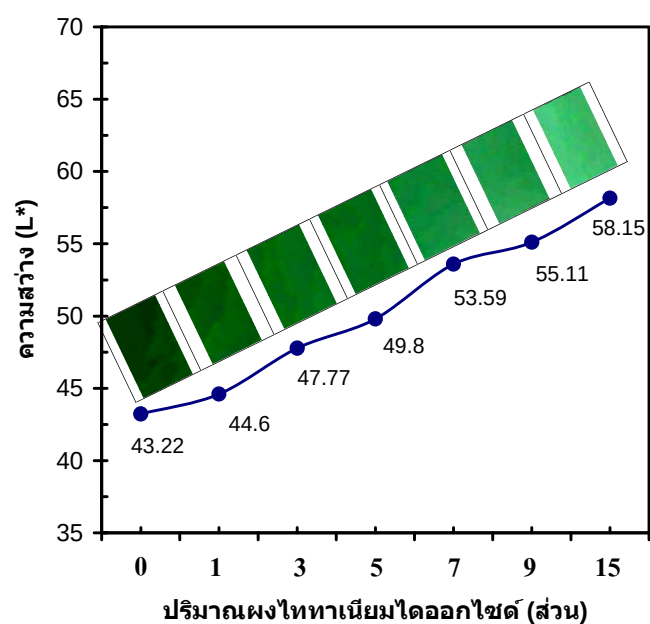
(ข)

รูปที่ 4.6 แบบจำลองการผ่านของแสงที่ผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์

(ก) ผง TiO_2 ปริมาณน้อย

(ข) ผง TiO_2 ปริมาณมาก

ส่วนค่าสีของชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผง TiO_2 พบว่า สีเคลือบชิ้นงานมีความสว่างมากขึ้น เมื่อเทียบกับสีเคลือบที่ไม่ได้เติมผง TiO_2 ทั้งนี้เนื่องจากผง TiO_2 มีสีขาว จึงส่งผลทำให้สีเคลือบพอลิยูรีเทนมีความสว่างเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงไททาเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสว่างของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์

4.3.4 สมบัติการนำความร้อนของวัสดุ

การศึกษาสมบัติการนำความร้อนของหลังคาYang ที่เคลือบผิวด้วย PU ที่ไม่เติมและเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่สัดส่วน ดังนี้ 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน และเปรียบเทียบกับกระเบื้องชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

ชนิดของผลิตภัณฑ์	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
หลังคาYang	0.369
หลังคาYangเคลือบด้วยสารเคลือบ PU	0.363
หลังคาYangเคลือบด้วยสารเคลือบ PU ที่เติมผง TiO_2 ที่ปริมาณ ดังนี้	
1	0.347
3	0.380
5	0.399
7	0.394
9	0.397
15	0.370
กระเบื้องบานเกล็ด [53]	1.226
กระเบื้องคอนกรีต [53]	0.500
กระเบื้องหลังคา [53]	0.836

พบว่า ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานหลังคาYang ที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน มีค่าใกล้เคียงชิ้นงานหลังคาYangที่มีการเคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.363- 0.369 W/m K และเมื่อทำการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ค่าการนำความร้อนของผิวเคลือบ อยู่ในช่วงระหว่าง 0.347 - 0.397 W/m K มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่า ผงไททาเนียมไดออกไซด์มีส่วนต่อการกระเจิงแสงของรังสีความร้อนมากกว่าการส่งผ่านความร้อน และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้ทำวัสดุหลังคา พบว่าหลังคาYangพ่นเคลือบด้วยสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนซึ่งเติมผง TiO_2 ที่ศึกษามีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ

4.3.5 ความทนทานต่อการยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

การศึกษานี้ปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนา 130 ± 10 ไมครอน โดยการตรวจสอบการยึดเกาะของฟิล์มของผิวเคลือบที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณต่างๆ ดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ไม่พบการหลุดลอกของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนทุกสูตรส่วนผสม ที่มีการยึดเกาะกับแผ่นยางที่ดี ซึ่งมีค่าตามมาตรฐานการยึดเกาะสูงสุด (5B) ของผิวเคลือบ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลของการยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ

ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน (μm)	ผง TiO_2 (ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน)	การยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
130 ± 10	0	5B*
	1	5B*
	3	5B*
	5	5B*
	7	5B*
	9	5B*
	15	5B*

หมายเหตุ: *0B: พื้นที่การหลุดลอกของผิวเคลือบ มากกว่า 65%– 5B: พื้นที่การหลุดลอกของผิวเคลือบ 0%

เนื่องจากผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ได้ผ่านการบ่มเต็มที่แล้ว จะมีแรงยึดผิวหน้าดี เพราะมีหมู่ที่มีขั้วอยู่มากในสายโซ่พอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีหมู่อะมิโน ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้กับผิวหน้าของชิ้นงานยาง และกับออกซิเจนอะตอมของหมู่คาร์บอนิล [6] และทางคณะวิจัยฯ ได้ทำการขัดผิวชิ้นงานก่อนทำการพ่นเคลือบพอลิยูรีเทนเป็นการเพิ่ม Mechanical interlocking ระหว่างผิวหน้าของชิ้นงานยางกับสารรองพื้น (Primer) ให้มีการยึดเกาะที่ดียิ่งขึ้น และได้ทำการพ่นสารรองพื้นซึ่งเป็นการเพิ่ม Chemical interlocking ระหว่างสารรองพื้นกับผิวเคลือบพอลิยูรีเทนให้มีการยึดเกาะที่ดียิ่งขึ้นด้วยเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ ผิวเคลือบพอลิยูรีเทนมีความทนทานต่อการยึดเกาะชิ้นงานหลังการใช้งานได้ดี

4.3.6 การทนทานต่อการดัดโค้งผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

การศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนา 130 ± 10 ไมครอน โดยการตรวจสอบความทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4. 7

ตารางที่ 4.7 ผลของความทนทานต่อการดัดโค้งผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ

ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน (μm)	ผง TiO_2 (ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน)	ความทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
130 ± 10	0	ไม่แตกร้าว
	1	ไม่แตกร้าว
	3	ไม่แตกร้าว
	5	ไม่แตกร้าว
	7	ไม่แตกร้าว
	9	ไม่แตกร้าว
	15	ไม่แตกร้าว

ผลของการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วนในผิวเคลือบ เมื่อตรวจสอบความทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่ปริมาณต่างๆ จากผลการทดลองไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวชิ้นงานเมื่อผ่านการทดสอบการดัดโค้ง เนื่องจากสารเคลือบพอลิยูรีเทนมีสมบัติการยึดตัวได้สูงและอนุภาคของผง TiO_2 สามารถเข้ากับสารเคลือบพอลิยูรีเทนได้ดี ดังนั้นเมื่อทดสอบดัดโค้งผิวเคลือบพอลิยูรีเทนจึงมีการยึดตัวตามแผ่นยางได้ดี

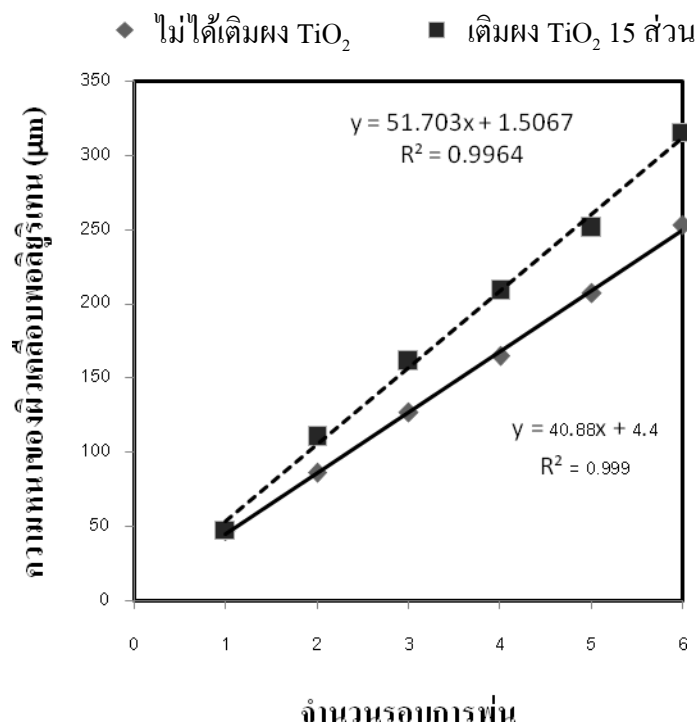
4.4 การศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนแผ่นยาง

ในส่วนนี้ทำการศึกษาผลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ความหนาต่างๆ ดังนี้ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเลือกปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ส่วน ค่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน มาทำการศึกษาต่อเนื่องจากเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง 4.3 ที่ศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 0 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วน ค่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนา 130 ± 10 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณผง TiO_2 สมบัติเชิงกลด้านการยึดเกาะของผิวเคลือบ การคัดโค้งของผิวเคลือบ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ผลที่ได้พบว่า ปริมาณผง TiO_2 ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติดังกล่าวไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ พบว่า การเพิ่มปริมาณผง TiO_2 ในสารเคลือบส่งผลทำให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้น จึงเลือกปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ส่วน ศึกษาผลความหนาของผิวเคลือบที่มีต่อสมบัติของผิวเคลือบต่อไป

4.4.1 การศึกษาสถานะในการพ่นผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ความหนาต่างๆ

ในส่วนนี้ทำการศึกษาผลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ความหนาต่างๆ ดังนี้ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเลือกปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ส่วน ค่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน โดยทำการพ่นเปรียบเทียบความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ กับ ไม่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันจึงได้สถานะในการพ่นเคลือบผิวพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วน ค่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน โดยใช้จำนวนรอบการพ่นเคลือบที่เพิ่มขึ้นทีละรอบ เป็นควบคุมความหนาที่เพิ่มขึ้นดังนี้ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ดังนั้น ผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปสถานะในการพ่นเคลือบที่เหมาะสมที่ใช้ในการศึกษาผลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ความหนาต่างๆ ดังนี้ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ส่วน ค่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ดังนี้

- 1) ระยะห่างการพ่นเคลือบที่ระยะ 30 cm
- 2) จำนวนรอบการพ่นที่ 2 3 4 5 และ 6 รอบ ซึ่งส่งผลให้ได้ความหนาของผิวเคลือบ $130 \pm 10 \mu\text{m}$, $150 \pm 10 \mu\text{m}$, $200 \pm 10 \mu\text{m}$, $250 \pm 10 \mu\text{m}$ และ $300 \pm 10 \mu\text{m}$ ตามลำดับของจำนวนรอบการพ่นเคลือบ
- 3) แรงดันลมอยู่ระหว่าง $6 - 6.5 \text{ kg/cm}^2$
- 4) ความเร็วในการพ่นเคลือบที่ 0.4 m/s



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทน โดยเติมผง TiO₂ ปริมาณ 15 ส่วน ที่ปรับเปลี่ยนจำนวนรอบการปั่นเคลือบ

4.4.2 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่มีต่อความหนาผิวเคลือบ

การศึกษาความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ดังนี้ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมปริมาณผง ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน โดยทำการตรวจสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ความหนาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า เมื่อความหนาที่ 130 150 200 250 ถึง 300 ไมครอน ไม่ส่งผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ทุกความยาวคลื่น พบว่าช่วงความยาวคลื่นของ Visible มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 17-18% ช่วงความยาวคลื่น 780-2100 nm ของ NIR มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ 40% และช่วงความยาวคลื่นของ Solar มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ อยู่ในช่วงระหว่าง 28.54-28.78% ทั้งนี้เนื่องจาก รังสีไม่สามารถส่องผ่านทะลุผ่านผิวเคลือบได้ จึงส่งผลให้รังสีตกกระทบเกิดการดูดกลืน การสะท้อน และหักเหกลับของรังสี [35] จึงไม่มีรังสีที่ผ่านไปถึงแผ่นยางแล้ว ดังนั้น ความหนาของผิวเคลือบที่เพิ่มขึ้น จึงไม่ส่งผลต่อความสามารถของการหักเหรังสีหรือการสะท้อนต่อไปอีก [39]

ตารางที่ 4.8 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆที่ปรับเปลี่ยนความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน

ผง TiO_2 (ส่วนต่อน้ำหนักสาร พอลิยูรีเทน 100 ส่วน)	ความหนา เฉลี่ย (μm)	ค่าเฉลี่ยการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบ PU (%)		
		Visible (380 – 780 nm)	NIR (780-2100 nm)	Solar (190 -2100 nm)
0	130 ± 10	9.50	27.99	18.48
15	130 ± 10	17.95	40.20	28.61
	150 ± 10	17.87	40.11	28.54
	200 ± 10	17.84	40.48	28.70
	250 ± 10	17.72	40.47	28.63
	300 ± 10	18.09	40.40	28.78

4.4.3 ความทนทานต่อการยืดเกาะของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

การตรวจสอบความทนทานต่อการยืดเกาะของผิวเคลือบที่ความหนาต่างๆ ดังนี้ 100 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน เมื่อนำมาตรวจสอบการยืดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนวัสดุยาง ไม่พบการหลุดลอกผิวเคลือบพอลิยูรีเทนสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.3.5 ความทนทานต่อการยืดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ปรับเปลี่ยนความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทน 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน

ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน (μm)	ผง TiO_2 (ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน)	การยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
130 ± 10	15	5B*
150 ± 10	15	5B*
200 ± 10	15	5B*
250 ± 10	15	5B*
300 ± 10	15	5B*

หมายเหตุ: *0B: พื้นที่การหลุดลอกของผิวเคลือบ มากกว่า 65% 5B: พื้นที่การหลุดลอกของผิวเคลือบ 0%

4.4.4 การทนทานต่อการตัดโค้งของผิวเคลือบที่ความหนาต่างๆ

การตรวจสอบความทนทานต่อการตัดโค้งของผิวเคลือบที่ความหนาต่างๆ ดังนี้ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน เมื่อนำมาตรวจสอบความทนทานต่อการตัดโค้งของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนแผ่นยางธรรมชาติไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวเคลือบชิ้นงาน สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.3.6 ดังแสดงในตารางที่ 4.10

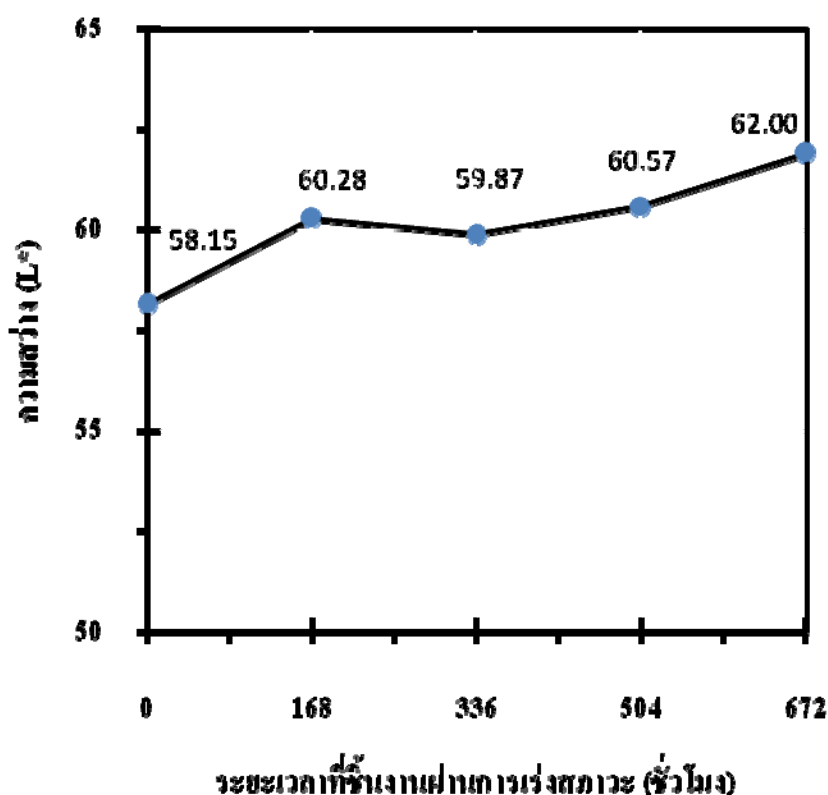
ตารางที่ 4.10 ความทนทานต่อการตัดโค้งผิวเคลือบ ที่ปรับเปลี่ยนความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน

ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน (μm)	ผง TiO_2 (ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน)	ความทนทานต่อการตัดโค้งผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
130 ± 10	15	ไม่แตกร้าว
150 ± 10	15	ไม่แตกร้าว
200 ± 10	15	ไม่แตกร้าว
250 ± 10	15	ไม่แตกร้าว
300 ± 10	15	ไม่แตกร้าว

4.5 การศึกษาการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

4.5.1 การตรวจสอบสีผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีของผิวเคลือบที่ความหนา 130 ± 10 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน และผ่านการเร่งสภาวะในเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี ที่ระยะเวลา 0 168 336 504 672 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนก่อนการเร่งสภาวะมีค่าความสว่างเท่ากับ 58 และเมื่อทำการเร่งสภาวะชิ้นงานนานขึ้น ตั้งแต่ระยะเวลา 336 ถึง 672 ชั่วโมง พบว่า สีเคลือบพอลิยูรีเทนมีค่าความสว่างเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 62 ทั้งนี้อาจเนื่องจากอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเลต และไอน้ำที่สีเคลือบได้รับ ทำให้เกิดปฏิกิริยา Photo-oxidation โดยสีเคลือบดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลต เป็นผลให้เกิดการสลายตัวเกิดหมู่ฟังก์ชันขึ้น ซึ่งทำให้สารเคลือบมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 ความสว่างของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนหลังผ่านการเร่งสภาวะในเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี

4.5.2 ความทนทานต่อการยืดเกาะผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะ

การตรวจสอบความทนทานต่อการยืดเกาะฟิล์มที่ความหนา 130 ± 10 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะและผ่านการบ่มเร่งสภาวะที่ระยะเวลา 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง เมื่อนำมาตรวจสอบการยืดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนวัสดุยางธรรมชาติ ไม่พบการหลุดลอกผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การยืดเกาะผิวเคลือบที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะในเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี

ระยะเวลาขึ้นงานผ่านการบ่มเร่งสภาวะ (ชั่วโมง)	การยืดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน
0	5B*
168	5B*
336	5B*
504	5B*
672	5B*

หมายเหตุ: *0B: พื้นที่การหลุดลอกของผิวเคลือบ มากกว่า 65%– 5B: พื้นที่การหลุดลอกของผิวเคลือบ 0%

4.5.3 การทนทานต่อการตัดโค้งของผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะ

การตรวจสอบความทนทานต่อการตัดโค้งของผิวเคลือบที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี ที่ระยะเวลา 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง เมื่อนำมาตรวจสอบความทนทานต่อการตัดโค้งของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนวัสดุยางธรรมชาติไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวขึ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ความทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี

ระยะเวลาขึ้นงานผ่านการบ่มเร่งสภาวะ (ชั่วโมง)	ความทนทานต่อการดัดโค้งผิวเคลือบ PU
0	ไม่แตกร้าว
168	ไม่แตกร้าว
336	ไม่แตกร้าว
504	ไม่แตกร้าว
672	ไม่แตกร้าว

4.5.4 สมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะ

การตรวจสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะที่ระยะเวลา 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.13

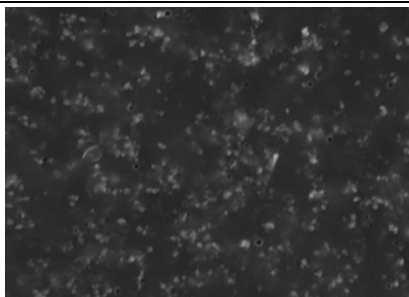
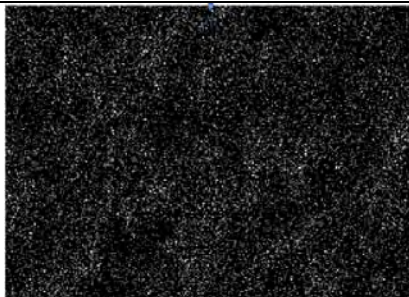
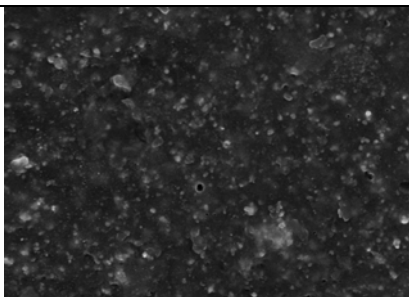
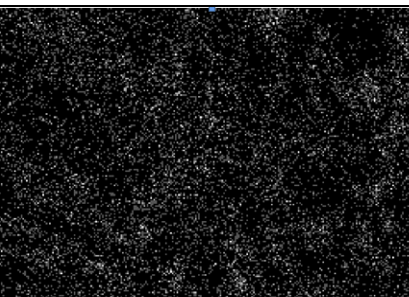
ตารางที่ 4.13 การสะท้อนรังสีอาทิตย์ ที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี ที่ระยะเวลา 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง

การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบ PU (%)	ระยะเวลาที่ขึ้นงานผ่านการเร่งสภาวะ (ชั่วโมง)				
	0	168	336	504	672
Visible (380 – 780 nm)	18.93	22.10	20.59	21.36	22.31
NIR -IR (780-2100 nm)	40.97	41.36	40.58	40.55	40.98
Solar wave (190 -2100 nm)	29.47	31.31	30.13	30.51	31.19

เห็นได้ว่า ขึ้นงานเคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนก่อนและหลังการเร่งสภาวะ มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นของ Visible มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ประมาณ 18.9-22.3% เป็นช่วงที่กว้างมากขึ้น เนื่องจากสีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปในโทนสีที่จางมากขึ้น วัตถุที่มีสีต่างกันเมื่อสะท้อนแสงของสีนั้นออกมา ก็จะทำให้มีความยาวคลื่นที่ต่างกัน ส่วนช่วงความยาวคลื่นของ NIR มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ประมาณ 41% และช่วงความยาวคลื่นของ Solar มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ประมาณ 29.5-31.2% ซึ่งค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีค่าใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบ

4.5.5 การกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ

การตรวจสอบการกระจายตัว และ X-ray mapping วัสดุไททาเนียมของผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ชี้นงานแผ่นยางด้วยเทคนิค SEM โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน เคลือบที่ความหนา 130 ± 10 ไมครอน ตรวจสอบผิวเคลือบชี้นงานแผ่นยางที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี ที่เวลา 672 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.10

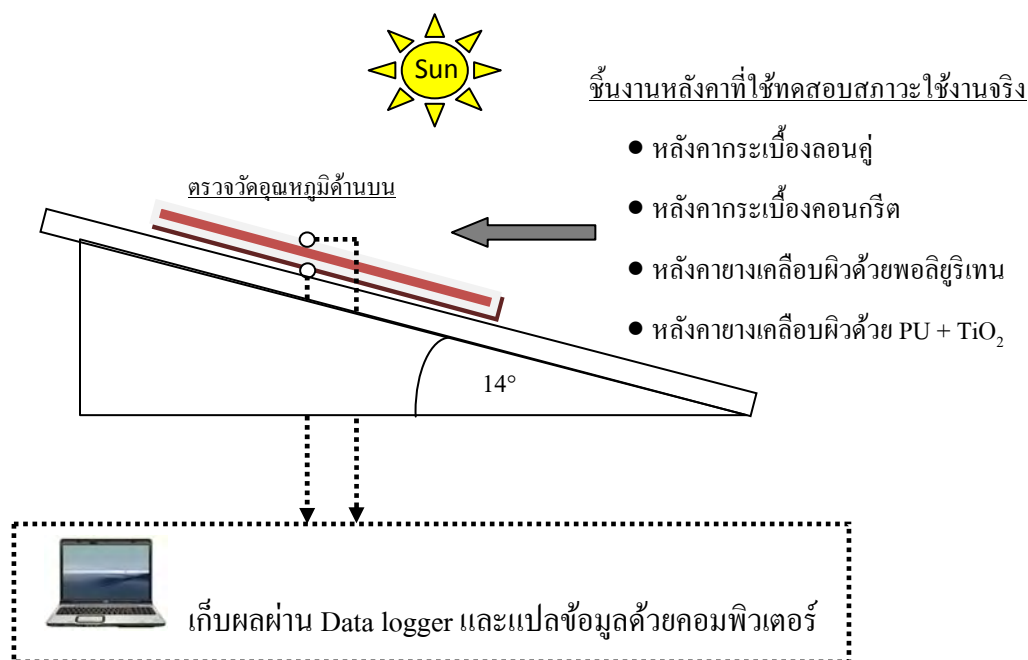
ลักษณะการกระจายตัวของผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน	
โครงสร้างพื้นฐานของผิวเคลือบด้วยเทคนิค SEM	X-ray mapping ของธาตุไททาเนียม
	
ผิวเคลือบ PU + ผง TiO_2 ที่ไม่ผ่านการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี	
	
ผิวเคลือบ PU + ผง TiO_2 ที่ผ่านการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี	

รูปที่ 4.10 ลักษณะการกระจายตัวของผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี ที่เวลา 672 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการกระจายตัวของผง TiO_2 ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่ผ่านและผ่านการเร่งสถานะด้วยรังสียูวี ที่เวลา 672 ชั่วโมง ผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วนเคลือบบนแผ่นยางที่ผ่านการเร่งสถานะด้วยรังสียูวี พบว่าผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบมีการเกาะกลุ่มอย่างหนาแน่นมากกว่าผิวเคลือบที่ไม่ผ่านการเร่งสถานะ ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบ X-ray mapping ของธาตุไททาเนียม

4.6 การทดสอบสถานะการใช้งานจริง

การทดสอบสถานะการใช้งานจริงโดยทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานหลังคา โดยหลังคาที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบกับชิ้นงานหลังคาอย่างที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน และหลังคาอย่างที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 15 ส่วน ที่ได้จากงานวิจัย มี 2 ชนิด คือ หลังคากระเบื้องลอนคู่ หลังคากระเบื้องคอนกรีต ในการทดสอบวางชิ้นงานกลางแจ้ง โดยวางชิ้นงานหลังคาบนแท่นวางชิ้นงานไปทางทิศใต้ เอียงทำมุม 14 องศา กับแนวราบ (มุมที่ชิ้นงานรับรังสีอาทิตย์มากที่สุด) ดังแสดงรูปแบบจำลองการทดสอบในรูปที่ 4.11 ทำการตรวจวัดค่าอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล และบันทึกข้อมูลอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของหลังคาชนิดต่างๆ ด้วย Data logger ข้อมูลที่ได้แปลผลผ่านคอมพิวเตอร์ ทดสอบเป็นเวลา 30 วัน ตั้งแต่เวลา 9.00 น. ถึง 16.00 น. [54] ส่วนการทดสอบชิ้นงานหลังคาจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.12

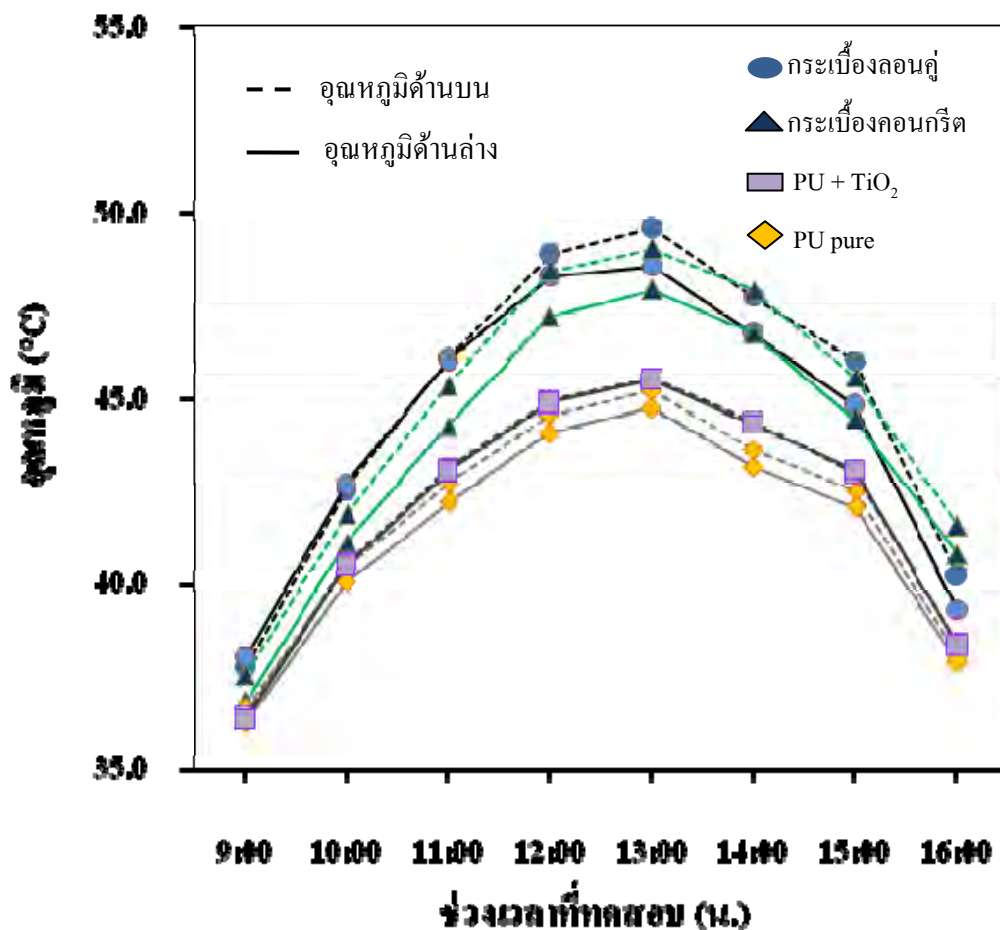


รูปที่ 4.11 แบบจำลองการทดสอบชิ้นงานหลังคาที่สถานะการใช้งานจริง



รูปที่ 4.12 การติดตั้งชิ้นงานทดสอบที่สภาวะการใช้งานจริง

ผลการทดสอบตรวจวัดอุณหภูมิของหลังคากระเบื้องลอนคู่ หลังคากระเบื้องคอนกรีต หลังคายางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน ที่ไม่เติมและเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 15 ส่วน ที่ช่วงเวลาทดสอบต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.13 โดยพบว่า อุณหภูมิของหลังคาทุกชนิดเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ช่วงเวลา 9.00 น. เป็นต้นไป และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ช่วงเวลา 12.00 ถึง 13.00 น. จากนั้นอุณหภูมิมิแนวโน้มลดลงที่เวลา 14.00 ถึง 16.00 น. โดยที่กระเบื้องลอนคู่มีอุณหภูมิสูงสุด และกระเบื้องคอนกรีต กระเบื้องหลังคายางที่เติมและไม่เติมมีอุณหภูมิลดลง ตามลำดับ โดยที่กระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องคอนกรีต มีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าหลังคายางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ไม่เติมและเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ประมาณ 10-12% และยังพบว่า อุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของหลังคากระเบื้องลอนคู่ และกระเบื้องคอนกรีตมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันประมาณ 2-3°C ส่วนหลังคายางมีอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.13 อุณหภูมิของหลังคาชนิดต่างๆ ที่ทดสอบสภาวะการใช้งานจริง

4.7 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

เมื่อพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่ใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์หลังคาขยงธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ ดังแสดงในตารางที่ 4.14 ผลิตภัณฑ์หลังคาขยงธรรมชาติผสมผงซีลี้อยไม้ ที่มีการเติมสารเติมแต่งต่างๆ มีราคาขยงคอมพาวด์ 62.11 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนทางด้านราคาของสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน เคลือบชั้นงานหลังคาขนาด 500x1200x5 มม. ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน มีราคาเฉพาะสารเคลือบ 41 บาทต่อแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และเมื่อพิจารณาราคารวมของผลิตภัณฑ์หลังคาขยงที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทนโดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน มีราคา 363.17 บาทต่อแผ่น (เทียบกับหลังคาขนาด 500x1200x5 มม.) ซึ่งในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตด้านวัสดุไม่รวมถึงค่าเครื่องจักรและค่าแรงงานดังแสดงในตารางที่ 4.16 และพบว่าหลังคาขยงที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทน

ตารางที่ 4.14 ราคาสารเคมีที่ใช้ในสูตรผลิตภัณฑ์หลังคายางธรรมชาติผสมผงขี้เลื่อยไม้ [4]

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ราคา/บาท/กก	สัดส่วน (ปริมาณที่ใช้จริง/ราคา)
ยางธรรมชาติ เกรด STR20 *ราคาขาง ณ วันที่ 8/4/53 [55]	100 ส่วน	114.4*	11440.0
สารกระตุ้นปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	33.4	26.0	868.4
สารกระตุ้นปฏิกิริยากรดสเตียริก (Stearic acid)	13.4	20.0	268.0
เป็นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (MBT)	3.4	172.7	587.4
เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (DPG)	1.4	150.0	210.0
กำมะถัน ขนาด 450 Mesh (Flour Sulfur)	20.0	7.0	140.0
สารเสริมแรง Silica (TOKUSIL 233)	45.0	28.0	1260.0
ผงขี้เลื่อยไม้ (Wood Sawdust)	40.0	2.0	80.0
สารเพิ่มสีแดง (Iron Oxide Red 690 B)	4.0	40.0	160.0
สารดูดซับกลิ่น (KBM 603 A)	0.2	2889.0	577.8
สารป้องกันยูวี (TINUVIN 234)	0.1	2000.0	200.0
สารแอนติออกซิแดนท์ (IRGANOX 1076)	0.1	900.0	90.0
สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน (Enhance)	3.0	75.0	225.0
สารหน่วงการลามไฟ (APYRAL 40 CD)	100.0	65.0	6500.0
ปริมาณและราคารวม	364	6489.1	22606.6
ราคารายคอมพาวด์ (บาท/กิโลกรัม)			62.11

หมายเหตุ: *ราคาขาง ณ วันที่ 8/4/53 [55]

ตารางที่ 4.15 ราคาสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วนที่เคลือบชิ้นงานหลังคาลอนคู่ ขนาด 500x1200x5 มม. ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน

สารเคมี	ปริมาณ (กรัม)	ราคา/กก. (บาท/กก.)	สัดส่วน (ราคาที่ใช้จริง)
สี Polyurethane	100	320	32
สีรองพื้น (Primer)	20	320	6.4
ผงไททาเนียมไดออกไซด์	15	120	1.8
ปริมาณและราคารวม	135	760	40.2
ราคาสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ (บาท/แผ่น)			40.2

ตารางที่ 4.16 ค่าการนำความร้อน และราคาของวัสดุหลังคาชนิดต่างๆ [53]

วัสดุ	ราคา (บาท)	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
กระเบื้องใยหินลอนคู่	60 บาท	0.836
กระเบื้องคอนกรีต (กระเบื้องโมเนีย)	11 บาท	0.500
ราคารายคอมพาวด์: หลังคา 1 แผ่น (ใช้ยางคอมพาวด์ 5.2 กก./แผ่น ที่มีขนาด 500x1200x5 มม.)	322.97	0.370
หลังคาเคลือบผิวด้วย PU/TiO ₂ /แผ่น (ราคาเคลือบด้วยพอลิยูรีเทน เท่ากับ 40.2 บาท/แผ่น)	363.17*	

หมายเหตุ: *ราคานี้ไม่รวมค่าเครื่องจักรและค่าแรงงาน

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบราคาวัสดุหลังคาชนิดต่างๆ (ราคาต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร) [56]

รายการ	ชนิดวัสดุหลังคา			
	หลังคาแผ่นเคลือบสังกะสี	กระเบื้องคอนกรีต (โมเนีย)	กระเบื้องใยหินลอนคู่	กระเบื้องยาง PU/TiO ₂
ปริมาณการใช้	0.79 แผ่น	10.70 แผ่น	2.2 แผ่น	2.2 แผ่น
น้ำหนัก	6.3 ก.ก.	44.94 ก.ก.	13.64 ก.ก.	11.44 ก.ก.
สีที่เลือกใช้	สีมาตรฐาน	สีมาตรฐาน	สีมาตรฐาน	สีเขียว
จำนวนราคาต่อแผ่น	490 บาท	11 บาท	60 บาท	363 บาท
จำนวนราคาต่อตรม.	387 บาท	118 บาท	132 บาท	799 บาท

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

5.1 คุณลักษณะของผงไททาเนียมไดออกไซด์

ลักษณะอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะทรงกลม มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.4 ไมครอน โดยมีองค์ประกอบของผงไททาเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก 93.6% และมีกลุ่มโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบรอง ประมาณ 6.4% ดังนี้ ซิลิกอนไดออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ และโลหะออกไซด์อื่นๆ

5.2 การศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบแผ่นยางด้วยสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

การศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบสารเคลือบพอลิยูรีเทนบนแผ่นยาง ที่มีการปรับเปลี่ยนระยะการพ่น และจำนวนรอบการพ่น โดยที่ผิวเคลือบมีความเรียบ ความหนาที่สม่ำเสมอ มีความมันวาว และไม่พบการไหลย้อยของสีเคลือบ ในงานนี้สามารถสรุปสภาวะที่เหมาะสมการเคลือบได้ดังนี้

- 1) ระยะห่างการพ่นเคลือบระหว่างหัวพ่นกับชิ้นงานที่ 30 cm
- 2) จำนวนรอบการพ่นเคลือบที่ 3 รอบ
- 3) แรงดันลมการพ่นเคลือบอยู่ระหว่าง $6 - 6.5 \text{ kg/cm}^2$
- 4) ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของหัวพ่นเคลือบที่ 0.4 m/s
- 5) ความหนาเฉลี่ยผิวเคลือบบนแผ่นยางที่ $130 \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$

5.3 การศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วน 1 3 5 7 9 และ 15 ส่วน ต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ในสารเคลือบพอลิยูรีเทน ที่เคลือบบนแผ่นยางที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน จากการศึกษาพบว่า

- 1) การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ทำให้ความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ไม่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์
- 2) การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 3 และ 5 ส่วนในผิวเคลือบพอลิยูรีเทน พบว่ามีการกระจายตัวของผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอ และพบว่าผงไททาเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นในผิวเคลือบ

- 3) การเติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทนส่งผลต่อสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 28.54% ที่เติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วน
- 4) ความสว่างของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น
- 5) แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ทุกสัดส่วน โดยมีค่าการนำความร้อน ระหว่าง 0.347-0.397 W/m K โดยที่ค่าสภาพการนำความร้อนสูงขึ้นตามปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น
- 6) การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบพอลิยูรีเทนทุกสัดส่วน พบว่าผิวเคลือบมีการยึดเกาะกับแผ่นยางที่ดี ไม่เกิดการหลุดลอกของผิวเคลือบ ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานระดับ 5 B และไม่พบรอยแตกร้าวของผิวเคลือบ เมื่อทดสอบการดัดโค้งผิวเคลือบ

5.4 การศึกษาผลของความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

ในส่วนของการศึกษาที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วน โดยทดสอบที่ความหนาผิวเคลือบบนแผ่นยาง ดังนี้ 130 150 200 250 และ 300 ไมครอน สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- 1) ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ศึกษาในงานนี้ไม่ส่งผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทน
- 2) แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ความหนาต่างๆ ไม่พบการหลุดลอก มีการยึดเกาะที่ดีผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานระดับ 5B และไม่พบรอยแตกร้าวของผิวเคลือบเมื่อทดสอบความทนทานต่อการดัดโค้งของผิวเคลือบ

5.5 การศึกษาการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนโดยการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี

การนำแผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ 15 ส่วน ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน ทดสอบผิวเคลือบที่ผ่านการเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะรังสียูวี ที่ระยะเวลา ดังนี้ 168 336 504 และ 672 ชั่วโมง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน มีความสว่างเพิ่มขึ้นตามเวลาการเร่งสภาวะผิวเคลือบด้วยรังสียูวี ซึ่งผิวเคลือบมีค่าความสว่างสูงสุดที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลา 672 ชั่วโมง

- 2) แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ผ่านการเร่งสภาวะที่เวลาต่างๆ ไม่พบการหลุดลอก ผิวเคลือบ มีการขีดเกาที่ดี มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับสูงสุดระดับ 5B และไม่พบรอยแตกร้าวของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเมื่อทดสอบการดัดโค้งผิวเคลือบ
- 3) ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของแผ่นยางที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทนที่ผ่านการเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี ที่เวลาต่างๆ พบว่ามีค่าการสะท้อนของผิวเคลือบอยู่ระหว่าง 29.5-31.2%

5.6 การทดสอบสภาวะการใช้งานจริงของแผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน

ในงานวิจัยนี้นำหลังคายางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ไม่เดิมและเดิมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ตรวจสอบอุณหภูมิด้านบนและด้านล่าง โดยการรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่จำลองสภาวะการใช้งานจริง ช่วงเวลาการทดสอบต่างๆ และเปรียบเทียบกับหลังคาที่ใช้ทั่วไป คือ หลังคากระเบื้องลอนคู่ และหลังคากระเบื้องคอนกรีต สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) อุณหภูมิของหลังคายาง หลังคากระเบื้องและหลังคากระเบื้องคอนกรีต มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ช่วงเวลา 9.00 น. เป็นต้นไป และมีอุณหภูมิสูงสุดที่ช่วงเวลา 12.00 ถึง 13.00 น. และมีแนวโน้มลดลงที่ช่วงเวลา 14.00 – 16.00 น. เป็นต้นไป โดยที่กระเบื้องลอนคูมีอุณหภูมิสูงสุด กระเบื้องคอนกรีต และกระเบื้องหลังคายางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนมีอุณหภูมิลดลงตามลำดับ
- 2) อุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของหลังคากระเบื้องลอนคู่ และกระเบื้องคอนกรีตมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันประมาณ 2-3°C ส่วนหลังคายางมีอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างไม่แตกต่างกันมากนัก
- 3) กระเบื้องลอนคู่และกระเบื้องคอนกรีต มีอุณหภูมิโดยรวมสูงกว่าหลังคายางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่ไม่เดิมและเดิมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ประมาณ 10-12%

5.7 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

เมื่อพิจารณาราคาของผลิตภัณฑ์หลังคายางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน โดยเดิมผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 15 ส่วน ที่ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 ไมครอน มีราคา 363.17 บาทต่อแผ่น (เทียบกับหลังคาขนาด 500x1200x5 มม.) ซึ่งในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตด้านวัสดุไม่รวมถึงค่าเครื่องจักรและค่าแรงงาน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุหลังคาชนิดต่างๆ ดังนี้ กระเบื้องแผ่นเรียบ กระเบื้องลอนคู่ กระเบื้องคอนกรีต และหลังคายางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน ที่เดิมผงไททาเนียมไดออกไซด์ มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุหลังคากระเบื้องคอนกรีต

5.8 ข้อได้เปรียบ และการใช้งานของแผ่นยางที่เคลือบผิวพอลิยูรีเทน

งานวิจัยนี้ คณะวิจัยฯ ได้มุ่งเน้นการพัฒนาสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่นยางธรรมชาติผสมผงจีเลอียัม มีข้อได้เปรียบ ดังนี้

- จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3, 4] สมบัติแผ่นยางมีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ไม่มีการติดหรือลามไฟ ทนทานต่อสภาพแวดล้อม (แสงแดด น้ำฝน และรังสียูวี) และไม่มีสารพิษตกค้าง
- สีเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน การสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ดีขึ้น เมื่อเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ในสารเคลือบผิว ที่ใช้สำหรับเคลือบบนผลิตภัณฑ์หลังคายาง
- แผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทน มีความทนทานต่อแรงกระแทก และการตัดโค้งที่ดี
- เป็นการส่งเสริมและเพิ่มทางเลือกในการใช้สีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ เพื่อการอนุรักษ์พลังงานสำหรับวัสดุก่อสร้างที่ผลิตจากวัตถุดิบยางธรรมชาติที่ผลิตได้ภายในประเทศ

ส่วนแนวทางในการนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์นั้น ในปัจจุบันได้ทดลองนำหลังคายางพาราที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนทดลองวิจัยนำไปใช้ในฟาร์มปศุสัตว์ในโรงเรียนเลี้ยงวัว ซึ่งอาจนำแผ่นยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ไปทดลองใช้กับโรงเรียนปศุสัตว์อื่นๆ เช่น โรงเรียนเลี้ยงไก่ และโรงเรียนเลี้ยงสุกร เป็นต้น

5.9 ข้อเสนอแนะขยายผลการวิจัย และแนวทางการนำไปใช้งานจริง

จากงานวิจัยในโครงการนี้ สามารถทำการวิจัยต่อยอดเพื่อศึกษาเพิ่มเติมได้ ดังนี้

- 1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสารเคลือบผิวชนิดต่างๆ ที่ใช้เกี่ยวกับเคลือบผิววัสดุยาง และสีของผิวเคลือบที่มีผลต่อการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ ที่เน้นผิวเคลือบวัสดุด้านการประหยัดพลังงาน
- 2) ควรศึกษาทดลองเคลือบผิวของวัสดุยาง ที่ปรับเปลี่ยนชนิดของสารเคลือบในแต่ละชั้นของผิวเคลือบ โดยศึกษาถึงสมบัติการยึดเกาะ การทนทานต่อการตัดโค้ง และสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผิวเคลือบบนวัสดุยาง
- 3) ควรมีการจัดสร้างชุดทดสอบจำลองสภาพการใช้งานในระบบปิดที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ การทดสอบ ทิศทางลม ความเร็วลม และสามารถตรวจวัดค่า รายงานผลเชิงปริมาณได้
- 4) การขยายผลนำหลังคายางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนไปติดตั้งใช้งานจริง ควรมีการปรับลดระยะ Span โครงสร้างให้แคบลง ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาคาการแอ่นตัวของแผ่นหลังคายางได้ และทำให้รอยต่อของแผ่นหลังคายางซ้อนทับกันได้พอดี

เอกสารอ้างอิง

1. คณะกรรมการการพาณิชยกรรมความต้องการในการใช้ไฟฟ้า, 2550, การพาณิชยกรรมความต้องการไฟฟ้า [online], Available : [Http://www.eppo.go.th/load/LF-2007-03-26.pdf](http://www.eppo.go.th/load/LF-2007-03-26.pdf), [วันที่ 20 เมษายน 2553].
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, No. 5, pp. 743-762.
3. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ เอกชัย วิมลมาลา ชีระศักดิ์ หมากรบิน และชัชวาลย์ กันทะลา, 2548, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการผลิตและทดสอบหลังคายางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับขี้เลื่อย, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, ฝ่ายอุตสาหกรรม
4. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ เอกชัย วิมลมาลา ชีระศักดิ์ หมากรบิน แววนุญ เข้มแสงสังข์ และชัชวาลย์ กันทะลา, 2550, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคายางประหยัดพลังงานจากวัสดุผสมยางและขี้เลื่อย, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, ฝ่ายอุตสาหกรรม
5. Siamresearch, 2007, **Analysis tool** [online], Available: <http://www.siamresearch.com/analysis/tool>, [2010, April 20].
6. อรุษา สรวารี, 2544, “การผลิตสีเคลือบ”, สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์), สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, หน้า 71-171.
7. GlobalSpec, 2010, **Major Polyurethane Adhesive Types** [online], Available: <http://www.global-spec.com/reference/13455/121073/Chapter-13-4-3-Major-Polyurethane-Adhesive-Types>, [2010, April 20].

8. Andrew P.L. and Robinson, 2001, **Crystal structure** [online], Available: <http://web.ukonline.co.uk/aplr/structure.htm>, [2010, April 20].
9. ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์, 2551, **ไททานีย: ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม** [online], Available: <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
10. สุพิน แสงสุข, 2550, **ไทเทเนียมไดออกไซด์** [online], Available: <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=5&ID=3>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
11. The Green Innovations Group, 2004, **Applications of Photocatalyst** [online], Available: <http://www.greeninnovationsgroup.com/Titania/applications.htm>, [2010, April 20].
12. Dupont, 2010, **Coating** [Online], Available: http://www2.dupont.com/Titanium_Technologies/en_US/tech_info/literature/Coatings/CO_B_H_65969_Coatings_Brochure.pdf [2010, April 20].
13. ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์ (LESA), 2546, **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** [online], Available: http://203.114.105.84/virtual/lesa/energy/em_wave/em_wave/em_wave.htm, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
14. ภิญโญ ชาญอาหาร, 2553, **รังสีอินฟราเรด** [online], Available: http://www2.diw.go.th/mac/index_c_omr/forms_1/thermography_pty.pdf, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
15. ศูนย์ตรวจวิเคราะห์ไอโซนและรังสี สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2550, **รังสีอัลตราไวโอเล็ต** [online], Available: <http://ozone.tmd.go.th/uvbasic.htm>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
16. ศูนย์วิจัยภูมิสารสนเทศเพื่อประเทศไทย คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553, **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** [online], Available: <http://www.gisthai.org/about-gis/electromagnetic.html>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].

17. ศูนย์ตรวจวิเคราะห์โอโซนและรังสี สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2550, **ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต** [online], Available: <http://ozone.tmd.go.th/uvibasic.htm>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
18. ศูนย์ตรวจวิเคราะห์โอโซนและรังสี สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา, 2550, **ค่าประมาณรายวันดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ตในประเทศไทย** [online], Available: http://ozone.tmd.go.th/UV_index/uvitoday.txt, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
19. นารี คำจันะ, **การนำความร้อน (conduction)** [online], Available: <http://courseware.rmutl.ac.th/courses/57/unit102.htm>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
20. มณฑล สุขใส, **การพาความร้อน (Convection)** [online], Available: http://pirun.ku.ac.th/~g4765306/heat_transfer/convection.htm, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
21. ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์, 2551, **ความร้อนและอุณหภูมิ** [online], Available: http://203.114.105.84/virtual/lesa/energy/heat_energy/heat_energy.htm, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
22. นารี คำจันะ, **การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)** [online], Available: <http://courseware.rmutl.ac.th/courses/57/unit104.htm>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
23. Pantown, **คุณสมบัติของวัสดุ** [online], Available: <http://www.pantown.com/group.php?display=content&id=36011&name=content4&area=3>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
24. The Engineering Toolbox, 2005, **Thermal Conductivity of some common Materials** [online], Available: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html, [2010, May 15].
25. The Engineering Toolbox, 2005, **Conductive Heat Transfer** [online], Available: http://www.engineeringtoolbox.com/conductive-heat-transfer-d_428.html, [2010, May 15].

26. Supradit, **ความรู้เรื่องสี** [online], Available: <http://www.supradit.com/contents/colour/paint.htm>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
27. บริษัทดิงโก้ (ประเทศไทย), 2553, **เทคนิคการพ่นสี** [online], Available: <http://www.dincothailand.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=408625&Ntype=777>, [2010, April 20].
28. อรุษา สรวารี, 2544, **สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์)**, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, หน้า 169-171
29. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **วิธีทดสอบสี วาร์นิช และวัสดุที่เกี่ยวข้อง มอก. 285**, เล่ม 1-44 (2521-2531)
30. ภัคณัฏ ทองทิอัมพร, 2550, **การมองเห็นและการวัดสี** [online], Available: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_7_2550_Color_Measurement.pdf, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
31. Chandra S. and Moalla S., 1991, “Saving from energy-efficient industrialized housing for the U.S.”, **Energy**, Vol. 16, No. 8, pp. 1119-1123.
32. Danny, S., Jeffrey, K. and 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, pp.1-40.
33. Smith, G.B., 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, No. 2, pp. 179–197.
34. Ferro, 2010, **Degussa Metal Catalyst Cerdec Cool Pigment** [Online], Available: <http://www.ferro.com.>, [2010, April 20].

35. Paul, B. and Sarah, E., 1997, "Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials", **Journal of Energy and Buildings**, Vol. 25, No. 2, pp. 149-158.
36. Oren, M. and Nayan, S., 1986, "Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision", **Journal of Computer Vision**, Vol. 14, No. 3, p. 227.
37. Smith, G., Gentle, A. and Mronga N., 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, No. 2, pp. 179-197.
38. Guo, H., Li, X.Y. and Wang, P., 2001, "Characterization of absorptivities to solar radiation for colored pigments in coating", **Journal of Coatings Technology**, Vol.73, No.923, pp. 71- 75.
39. Norman, S., Michele, E., Amaya, O., Christopher, M., John, S. and 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", **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 78, No. 3, pp. 467-478.
40. Michael, I., Larry, D. and Andrew, A., 2006, **Multiscattering of light by particles**, Cambridge University, Cambridge, England, pp. 124-135.
41. วัลลภ หาญณรงค์ชัย, 2549, **สีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 51-79.
42. อนุสรณ์ ศรีสรवल, 2545, **การศึกษาวัสดุผิวเคลือบสะท้อนความร้อน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 63-77.

43. Guo, L., Gao, G., Liu, X. and Liu, F., 2008, Preparation and characterization of TiO₂ nanosponge, **Materials Chemistry and Physics**, Vol. 111, Nos. 2-3, pp. 322-325.
44. Gupta, V., Bamzai, K.K., Kotru, P.N. and Wanklyn, B.M., 2006, Dielectric properties, ac conductivity and thermal behaviour of flux grown cadmium titanate crystals, **Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology**, Vol. 130, Nos. 1-3, pp. 163-172.
45. Chen, J., Zhou, Y., Nan, Q., Sun, Y., Ye, X., Zhang, F. and Wang, Z., 2007, "Synthesis, characterization and infrared emissivity study of polyurethane/TiO₂ nanocomposites", **Applied Surface Science**, Vol. 253, No. 23, pp. 9154-9158.
46. Sabataityte, J., Oja, I., Lenzmann, F., Volobujeva, O. and Krunk, M., 2006, Characterization of nanoporous TiO₂ films prepared by sol-gel method, **Comptes Rendus Chimie**, Vol. 9, Nos. 5-6, pp. 708-712.
47. Chen, J., Zhou, Y., Nan, Q., Sun, Y., Ye, X., Zhang, F. and Wang, Z., 2007, Synthesis, characterization and infrared emissivity study of polyurethane/TiO₂ nanocomposites, **Applied Surface Science**, Vol. 253, No. 23, pp. 9154-9158.
48. พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกุล, 2548, การเคลือบนาโนฟิล์มบางบนวัสดุสำหรับการป้องกันสิ่งแวดล้อม, การประชุมประจำปี สวทช. 2548, 27-30 มีนาคม, ศูนย์การประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, จ.ปทุมธานี.
49. จิตติพร เครือเนตร, 2551, นักวิจัยเอ็มเทคคิดค้นแผ่นฟิล์มนาโนกันแสงยูวี [online], Available: http://www.vcpbook.com/vcp_news/vcp_news_detail.php?vn_id=12, [วันที่ 20 เมษายน 2553].

50. Changhoon, L., Hanshin, C., Changhee, L. and Hyungjun, K., 2003, Photocatalytic properties of nano- structured TiO₂ plasma sprayed coating, **Surface and Coatings Technology**, Vol. 173, Nos. 2-3, pp. 192-200.
51. Ronnen, L., Paul, B., Hashem, A., William, M., Ingo, J., Joseph, Reilly, Yoshi, S. and Michelle, V., 2007, Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 91, No. 4, pp. 304-314.
52. Ming, J., Xintong, Z., Alexei, V., Takafumi, N., Taketoshi, M., Akira F., 2007, Surface modification of natural rubber by TiO₂ film, **Surface and Coatings Technology**, Vol. 202, No. 8, pp. 1364-1370.
53. คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, **ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุหลังคาต่างๆ** [online], Available: <http://smd.kku.ac.th/bchumn/chapter2.pdf>, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
54. กรีน เอ็มเพาเวอร์เมนต์ และ พลังไท, 2547, **ชั่วโมงแสงอาทิตย์สูงสุด (Peak Sun Hour)** [online], Available: [http://www.palangthai.org/docs/PVTrainingManual_\(Thai\).pdf](http://www.palangthai.org/docs/PVTrainingManual_(Thai).pdf), [วันที่ 20 เมษายน 2553].
55. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2553, **ราคายาง** [online], Available: http://www.rubberthai.com/price/price_index.htm, [วันที่ 20 เมษายน 2553].
56. กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์, 2554, **วัสดุถุงหลังคา: เลือกซื้ออย่างไรจึงคุ้มค่าเงิน** [online], Available: <http://www.dit.go.th/contentdetail.asp?ID=82&catid=102&typeid> [วันที่ 4 เมษายน 2554].

ภาคผนวก

1. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมระดับชาติ

N. Hamaviriyapornwattana, E.Wimolmala, T. Markpin and N. Sombatsompop, 2010, “Effects of Coating Thickness and TiO_2 dosage in Polyurethane Coating on Solar Reflective Index and Adhesion of Wood-Natural Rubber Sheet” – **11th Graduate Research Conference**, 12th January 2010, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, pp. 369-379.

2. ตอบข้อเสนอนแนะและข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมระดับชาติ

The 11th Khon Kaen University 2010
Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21

อิทธิพลความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่มีต่อ
การสะท้อนรังสีอาทิตย์ และการยึดเกาะของแผ่นวัสดุยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อยไม้

Effects of Coating Thickness and TiO_2 dosage in Polyurethane Coating on Solar Reflective Index
and Adhesion of Wood-Natural Rubber Sheet

ณัฐตา เหมะวิริยาพรวัฒนา (Natita Hamaviriyapornwattana)* เอกชัย วิมลมาลา (Ekachai Wimolmala)**

ธีระศักดิ์ หมากพิน (Teerasak Markpin)** ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ (Narongrit Sombatsompop)***

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาผลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบ ที่มีต่อสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์และการยึดเกาะของแผ่นวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้ โดยเติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ 1, 3, 5, 7, 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน และปรับเปลี่ยนความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่ 130, 150, 200, 250 และ 300 ไมครอน ผลการทดลอง พบว่า ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนของวัสดุผสมยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อยไม้มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงไททาเนียม แต่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของผิวเคลือบ นอกจากนี้ ไม่พบการหลุดลอกผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนแผ่นวัสดุยางธรรมชาติ โดยผลการยึดเกาะซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และไม่พบรอยแตกร้าวของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนหลังจากผ่านการดัดโค้ง

ABSTRACT

This research studied the effects of coating thickness and Titanium dioxide (TiO_2) dosage in polyurethane (PU) coating on solar reflective index and adhesion properties of wood-natural rubber sheet. The filled titanium dioxide powder content was varied at 1, 3, 5, 7, 9 and 15 parts per hundred of polyurethane. The PU coating thickness was varied at 130, 150, 200, 250 and 300 microns. The experimental results suggested that the solar reflective index increased with increasing TiO_2 powder, but did not change with varying the coating of PU. The adhesion properties of the PU coating on wood/natural rubber sheet passed a standard peel test with no observations of cracks under a bending test.

คำสำคัญ : สารเคลือบพอลิยูรีเทน ผงไททาเนียมไดออกไซด์ ยางธรรมชาติ

Key Words : Polyurethane Coating, Titanium dioxide, Natural rubber

* มหามบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*** ศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

The 11th Khon Kaen University 2010 Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 2

บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน ทำให้ต้องใช้พลังงานในการใช้เครื่องปรับอากาศภายในอาคาร สำนักงาน หรือที่พักอาศัยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (คณะกรรมการการพาณิชย์ความต้องการในการใช้ไฟฟ้า, 2550) พบว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ภายในอาคารมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ใช้เครื่องปรับอากาศ (Chirattananon and Taweekun, 2002) ปัจจุบันจึงมีการรณรงค์การใช้ไฟฟ้าอย่างประหยัด และลดความร้อนเข้าสู่ภายในตัวอาคาร ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยลดการทำงานของเครื่องปรับอากาศ ปัจจุบันนิยมการติดตั้งวัสดุฉนวนกันความร้อนใต้หลังคา แต่การใช้ฉนวนกันความร้อนมีปัญหาหลายด้าน เช่น การออกแบบติดตั้ง การบำรุงรักษา การหลุดลอก และการเสื่อมสภาพของฉนวนกันความร้อน เป็นต้น กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) ทำวิจัยเกี่ยวกับวัสดุผสมยางธรรมชาติและซีเมนต์ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลังคาขางพารา มีรายละเอียด ดังนี้ การผลิตและทดสอบหลังคาขางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับซีเมนต์ (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2548) ศึกษาสมบัติของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและซีเมนต์ขางพาราเพื่อผลิตเป็นหลังคาขางพารา พบว่า สามารถเติมปริมาณซีเมนต์ได้ถึง 80 phr ในยางธรรมชาติเกรด STR 20 โดยเพิ่มสมบัติทางด้านความแข็งแรงและความแข็งผิวที่มีความเหมาะสม ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลังคาขาง ที่พัฒนาในรูปแบบของยางแข็ง (Ebonite Rubber) โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ 20-30 phr ที่ด้านทานต่อแรงกระทำภายนอก และสภาวะแวดล้อมขณะใช้งานได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้มีการเติมสารควบคู่ สารหน่วงการลามไฟ ผงสี สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เช่น สารต้านทานต่อออกซิเจน สารต้านทานต่อโอโซน สารต้านทานต่อแสงยูวี ในผลิตภัณฑ์หลังคาขาง จึงเป็นทางเลือกสามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้หลังคาชนิดอื่นๆ ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันได้ ซึ่งวัสดุหลังคาขางพารายังมีสมบัติเด่น

ด้านความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าวัสดุหลังคาประมาณ 2-3 เท่า (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2548) แต่ยังมีปัญหาทางด้านการทนต่อสภาวะแวดล้อม ที่ยังมีการหลุดลอกของซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ จึงนำไปสู่โครงการวิจัย "การพัฒนาวัดและเทคนิคการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคาขางประหยัดพลังงานจากวัสดุผสมยางและซีเมนต์" (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2550) ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลผลิตภัณฑ์หลังคาขาง โดยใช้สารเคลือบพอลิยูรีเทน ซึ่งสารเคลือบพอลิยูรีเทนเหลวสามารถยึดติดกับผลิตภัณฑ์ขางได้ดี และทนต่อสภาวะแวดล้อม (ความร้อน โอโซนและแสงยูวี) ได้ค่อนข้างดีมาก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยทางด้านการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์ หลังคาขาง มีรายงานการวิจัยที่ยังไม่แพร่หลาย จึงมีแนวคิดในการนำผงไททาเนียมไดออกไซด์เติมลงในสารเคลือบพอลิยูรีเทน เพื่อลดปริมาณการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคาขาง เนื่องจากผงไททาเนียมไดออกไซด์สามารถสะท้อนรังสีอาทิตย์ (Solar reflectance) ได้สูง ซึ่งสามารถลดปริมาณความร้อนที่สะสมบนแผ่นวัสดุหลังคา และผลิตภัณฑ์ขางพารามีสมบัติเด่นทางด้านความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี ซึ่งสามารถลดพลังงานความร้อนปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท จากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลง นอกจากนี้ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์หลังคาขาง เป็นการลดต้นทุน และลดปัญหาการใช้วัสดุฉนวนกันความร้อนด้วย และปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และการยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

อิทธิพลของความเรียบของผิวเคลือบ (Paul and Sarah, 1997) ศึกษาการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบ โดยเปรียบเทียบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบสีขางบนกระเบื้องคอนกรีต (Asphalt shingles) ที่มีผิวขรุขระ เทียบกับสีเคลือบสีขางของวัสดุแก้วซึ่งมีผิวเรียบ โดยมีความหนาสีเคลือบเท่ากัน พบว่า ลักษณะการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบมีแนวโน้มเหมือนกัน แต่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์แตกต่างกันที่

The 11th Khon Kaen University 2010 Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 3

ความยาวคลื่น 0.5 ไมโครเมตร โดยที่ผิวเคลือบที่เรียบ มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่สูงกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดกลืนพลังงานแสง พบว่า ชิ้นงานผิวเรียบ มีค่าดูดกลืนพลังงานแสงน้อยกว่าผิวขรุขระที่มีการดูดกลืนพลังงานแสงถึง 40 เปอร์เซ็นต์

ความหนาของผิวเคลือบ (Hong and Xiu, 2001) ศึกษาอิทธิพลของความหนาผิวเคลือบต่อการสะท้อนความร้อนของผิวเคลือบ ที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ปริมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ โดยศึกษาความหนาผิวเคลือบ ในช่วงระหว่าง 28-163 ไมโครเมตร พบว่า ค่าการสะท้อนของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นตามความหนาของผิวเคลือบ และมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ 93 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนา 134 ไมโครเมตร จากนั้นค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่เมื่อความหนาผิวเคลือบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีการศึกษาอิทธิพลของความหนาผิวเคลือบต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์ (อนุสรฯ, 2545) พบว่าความหนาผิวเคลือบมีผลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์ อยู่มีค่าคงที่ที่ความหนาในระดับหนึ่ง แต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีแนวโน้มลดลง

ส่วนปริมาณผง ไททาเนียม ไดออกไซด์ (วัลลภ, 2549) ศึกษาความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงไททาเนียม ไดออกไซด์ต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยใช้สีย้อมครีโอลิน พบว่า ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จากนั้นค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่เมื่อความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของสีเคลือบโดยทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะพบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดสอบ

นอกจากนี้มีการศึกษาอนุภาคในระดับนาโนผงไททาเนียมไดออกไซด์ (Michael et al., 2006) ศึกษาการกระเจิงแสงของอนุภาค TiO_2 พบว่า อนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตร สามารถกระเจิงแสงได้ดีในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร โดยความเข้มแสงที่ถูกกระเจิงโดย TiO_2 ที่มีขนาด

เล็ก เป็นสัดส่วนกับ Fourth Power ของความยาวคลื่น ส่วนอนุภาคขนาดเล็กระหว่าง 5-15 นาโนเมตร มีการกระเจิงแสงลดลง และช่วงความยาวคลื่นแสงที่ 200-300 นาโนเมตร สามารถส่องผ่านอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงพฤติกรรมเป็นสารกึ่งตัวนำ ทำให้พลังงานแสงถูกดูดกลืนได้ดี

ในงานวิจัยนี้ จึงมีความสนใจที่ศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบที่มีการเติมปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ลงในผิวเคลือบ พอลิยูรีเทน และความหนาที่เหมาะสมของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และการสะท้อนรังสีอาทิตย์

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะการพ่นเคลือบ และปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และการยึดเกาะของวัสดุผสมยางธรรมชาติผสมซีเมนต์
2. เพื่อศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีคุณสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และการยึดเกาะของวัสดุผสมยางธรรมชาติผสมซีเมนต์

วัตถุดิบและสารเคมีวิจัย

- ยางธรรมชาติ (Natural rubber) เกรด STR20 จากบริษัท สยามยูไนเต็ด รีบเบอร์ จำกัด
- สารเร่งและกระตุ้นปฏิกิริยา ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide; ZnO) จาก อูทิส อินเดอร์ไพรส์ จำกัด กรดสเตียริก (Stearic acid) และสารเร่งปฏิกิริยาลวดลายไนซ์ Diphenylguanidine จาก บริษัท อิมพีเรียล เคมีเคิล จำกัด เมอร์แคปโตเบนโซไทโธลล์ เกรด ZAP ACCEL M-R จากบริษัท Zeon Advanced Polymix จำกัด
- สารคงรูปกำมะถัน (Sulphur) ขนาด 450 mesh จากบริษัท สยามเจมิตัล จำกัด
- สารเพิ่มสีแดง (Iron oxide red 690 B) จากห้างหุ้นส่วนจำกัด เกียรติมงคล
- สารแต่งเติมเสริมแรง ซิลิกา ชนิด Precipitate

The 11th Khon Kaen University 2010 Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 4

Silica เกรด TOKUSIL 233 จาก Tokuyama siam silica Co., LTD (Thailand) และผงขี้เลื่อยไม้ยางพารา (Wood sawdust) ขนาดอนุภาคประมาณ 200-300 ไมครอน จากบริษัท วี.พี. วัสดุ จำกัด

- สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling) ชนิด KBM 603A จากบริษัท Kishimoto Sangyo (Thailand) จำกัด

- สารแต่งเติมอื่นๆ ได้แก่ สารเพิ่มเสถียรภาพต่อรังสียูวี (UV Stabilizer) เกรด TINUVIN 234 และสารแอนติออกซิเดนต์ (Antioxidant) เกรด IRGANOX 1076 จาก Global Connection Co., LTD (Thailand), สารป้องกันปฏิกิริยากับโอโซน (Antiozonant) และสารหน่วงการลามไฟ (APYRAL40 CD) จาก Behn Meyer Chemical(T) Co.,LTD (Thailand)

- ผงไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2) ชนิด Rutile เกรด Ti-pure R-902 สีขาว ขนาดอนุภาค 0.405 ไมครอนเมตร และค่า Specific gravity เท่ากับ 4.0 จากบริษัท Dupont (ประเทศไทย) จำกัด

- สารเคลือบพอลิยูรีเทน ชนิด Anti-UV Coating โดยใช้สารเคลือบผิวรองพื้นเกรด C-501 และสารเคลือบผิวหน้า ชนิด C-602A ในงานวิจัยนี้เลือกสีเขียว และสารทำให้แข็ง (Hardener) ชนิด C-602B ผสมที่สัดส่วน 1:1 จากบริษัท Sea Chief Enterprise Co., LTD (Thailand)

วิธีการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 ตรวจสอบคุณสมบัติของรูปร่างและขนาดของผงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค SEM และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค XRF

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมส่วนผสมในการผลิตชิ้นงานวัสดุผสมยางธรรมชาติกับขี้เลื่อยไม้ และการเตรียมสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

การผลิตชิ้นงานวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับผงขี้เลื่อยไม้

ทำการผสมยางตามสูตรส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ ที่อุณหภูมิห้อง และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปพร้อมด้วยระบบแรงดัน ผลิตเป็นชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 1 สูตรส่วนประกอบของสารประกอบยาง

Ingredients	Content (phr)
Natural Rubber; STR 20	100 Part
ZnO (Zinc Oxide)	33.4
Steric acid	13.4
MBT (Mercaptobenzothiazoles)	3.4
DPG (Diphenylguanidine)	1.4
Sulfur powder 450 mesh	20
Silica (TOKUSIL 233)	45.0
Wood Sawdust	40-80
Iron Oxide Red 690 B	4.0
Silane (KBM 603A)	0.5% by weight sawdust
UV Stabilizer (TINUVIN 234)	0.1
Anti-Oxidant (IRGANOX 1076)	0.1
Anti-Ozonant (Enhance)	3.0
Flame retardant (APYRAL 40 CD)	100

The 11th Khon Kaen University 2010 Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอมผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 5



ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์ในการพ่นเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

การออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการพ่นเคลือบ

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบใช้รางเลื่อนควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของกระบอปป่นพ่นสี โดยรางเลื่อนนี้ใช้ระบบนิวแมติก (แรงดันลม และบนรางเลื่อนทำการยึดด้วยกล่องวัสดุอะคริลิกที่ใช้ในการติดตั้งกระบอปป่นพ่นสี โดยมีแผ่นป้องกันอะคริลิกติดตั้งไว้ตำแหน่งด้านหน้าของรางเลื่อน เพื่อป้องกันละอองสีมาติดที่รางเลื่อนขณะทำการพ่น และใช้หัวส้วควบคุมแรงดันลมเพื่อควบคุมการเคลื่อน ของภาพพ่นสี แสดงในภาพที่ 1

การเตรียมชิ้นงานและการพ่นเคลือบ ดังนี้

1. การเตรียมผิวชิ้นงานแผ่นยางโดยการขัดผิวชิ้นงานเพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. พ่นเคลือบด้วยสารรองพื้น (Primer) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะกับผิวชิ้นงานทดสอบ
3. นำสารเคลือบพอลิยูรีเทน (เกรด 602A) และผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 1, 3, 5, 7, 9, และ 15 ส่วน ค่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ทำการผสมในเครื่องปั่นที่ความเร็วประมาณ 300 รอบ/นาที่ เวลา 15 นาที

4. จากนั้นใส่สารช่วยแข็ง (เกรด 602B) ที่สัดส่วนเท่ากับสารเคลือบพอลิยูรีเทน ปั่นรวมกับสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผงไททาเนียมไดออกไซด์และสารช่วยแข็งเป็นเวลา 15 นาที นำสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละสูตรตรวจสอบค่าความหนืดโดยใช้ถ้วยวัดความหนืด (Viscosity Cups)

5. ทำการพ่นสารเคลือบพอลิยูรีเทนบนชิ้นงานแผ่นยางธรรมชาติที่ผสมซีลีเนียม โดยใช้สภาวะการพ่นเคลือบเหมือนกันทุกสูตร ดังนี้

- ระยะการพ่น 20 30 และ 40 cm (ระยะห่างระหว่างชิ้นงานถึงปืนพ่น)

- จำนวนรอบการพ่นเคลือบที่ 1-7 รอบ

- แรงดันลมในการพ่นอยู่ที่ 6 - 6.5 kg/cm²

6. ชิ้นงานแผ่นยางที่ผ่านการพ่นเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิยูรีเทน เพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดสอบสมบัติของผิวเคลือบ แบ่งเป็น 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 ทดสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และค่าสีของชิ้นงาน

ส่วนที่ 2 ทดสอบการยึดเกาะ และ ความทนทานต่อการคัดโค้งของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

The 11th Khon Kaen University 2010 Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 6

โดยศึกษาปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนดังนี้ 1, 3, 5, 7, 9 และ 15 ส่วนต่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ที่ความหนา 100 ไมครอน และเมื่อได้ปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่เหมาะสมต่อนั้นนำมาศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่ 130, 150, 200, 250 และ 300 ไมครอน

การตรวจสอบสมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และทางกลของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

- การตรวจสอบขนาดและรูปร่างของผงไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope; SEM ของบริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-5800

- การสะท้อนรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ASTM E691 (มีค่าการเคลื่อนไม่เกิน 0.15%) และค่าสี ตามมาตรฐานในการวัดสีของ CIE System (Commission International de l' Eclairage); CIE (L* a* b*) ของชิ้นงานยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้เครื่อง UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer รุ่น UV-3100 จากบริษัท Shimadzu

- ตรวจสอบพื้นผิวชิ้นงานและความหนาผิวเคลือบ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) รุ่น BHM-112KL ของบริษัท Olympus Optical

- การขีดเกาของฟิล์มตามมาตรฐาน ASTM D3359-08 โดยใช้เครื่องมือ Cross hatch cutter

- การดัดโค้งของฟิล์มตามมาตรฐาน ASTM D 522 โดยใช้ Mandrel set รุ่น MG 1412

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ตรวจสอบคุณลักษณะรูปร่างและขนาดของผงไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าอนุภาคของผง TiO_2 มีลักษณะทรงกลม มีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่ม และมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.4 ไมโครเมตร และองค์ประกอบของไททาเนียมไดออกไซด์เป็น

องค์ประกอบหลักมากถึง 93.6% และมีกลุ่มโลหะออกไซด์ ประมาณ 6.4%

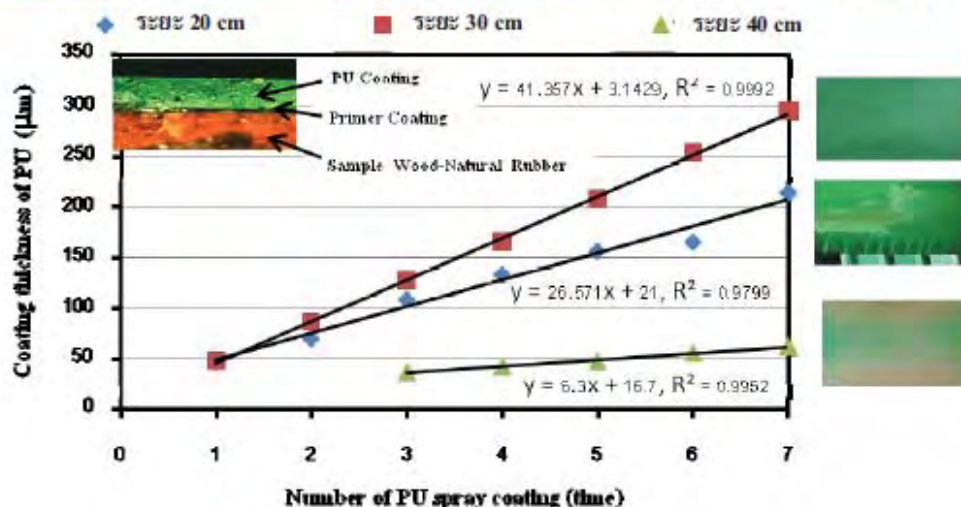
2. ศึกษาสถานะในการพ่นเคลือบพอลิยูรีเทน โดยการปรับเปลี่ยนระยะชิ้นงานห่างจากหัวพ่นปืนต่างๆ และเพิ่มจำนวนรอบการพ่นชิ้นงานครั้งนี้ ระยะที่ตำแหน่งชิ้นงานถึงหัวพ่นเคลือบที่ระยะ 20, 30 และ 40 cm และผลตรวจสอบความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ของชิ้นงานยางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยปรับระยะการพ่น 20-40 cm ที่มีการพ่นเคลือบที่จำนวนรอบต่างๆ พบว่า ที่ระยะห่างของการพ่นเคลือบที่ 20 cm พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการพ่น ความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณ 30 μm และพบว่าเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ผิวชิ้นงานมีการไหลย้อยของสีที่ผิวหน้าชิ้นงานยาง และเมื่อเพิ่มระยะห่างการพ่นเคลือบที่ 30 cm พบว่าความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้นประมาณ 40 μm ในแต่ละรอบการพ่น ส่วนที่ระยะห่างการพ่นเคลือบ ที่ 40 cm พบว่า เมื่อพ่นเคลือบที่จำนวน 1-2 รอบ ที่ผิวชิ้นงานบางมากพบแต่ละองสี แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบมากขึ้น ความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นประมาณ 6 μm เนื่องจากระยะการพ่นเคลือบห่างเกินไป

จากการพ่นเคลือบ ลักษณะผิวและความหนาผิวเคลือบ พบว่าที่ระยะการพ่น ที่ให้ความหนาของผิวเคลือบตรงความต้องการในช่วงแรก (ประมาณ 100 μm) คือ ระยะการพ่นที่ 20 cm จำนวนรอบการพ่นที่ 3 รอบ ซึ่งมีความหนาประมาณ 100 μm แต่พบว่าผิวเคลือบที่ได้ไม่มีความมันวาว และพบการไหลย้อยของผิวเคลือบ ส่วนที่ระยะการพ่น 30 cm ที่จำนวนการพ่น 3 รอบ ความหนาผิวเคลือบที่ได้ มีความหนามากกว่า 130 $\pm 10 \mu\text{m}$ และพบว่า ผิวเคลือบมีความเรียบ และมีความหนาสม่ำเสมอ มีความมันวาว ไม่พบการไหลย้อยของสีที่ผิวเคลือบ และไม่พบการนูนของอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์บนผิวเคลือบ

The 11th Khon Kaen University 2010 Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 7



ภาพที่ 2 ผลของจำนวนครั้งในการพ่นเคลือบที่มีต่อความหนาผิวเคลือบชิ้นงานยาง

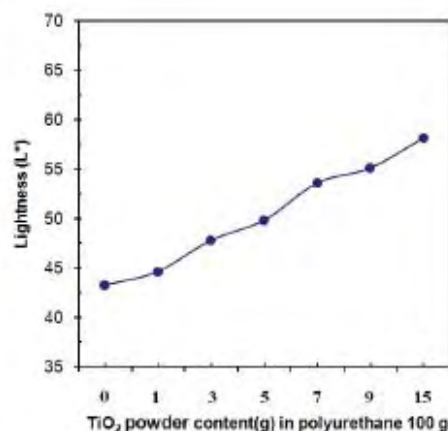
จากการศึกษาสภาวะในการพ่นเคลือบผิวชิ้นงานยางที่เหมาะสม ดังนี้

- ระยะห่างการพ่นเคลือบ 30 cm
- จำนวนรอบการพ่นที่ 3 รอบ
- แรงดันลมอยู่ระหว่าง 6 – 6.5 kg/cm²
- ความเร็วในการพ่นเคลือบที่ 0.4 m/s
- ความหนาของผิวเคลือบ 130 ± 10 µm

3. ผลการตรวจสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และค่าสีของชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทน

ตารางที่ 2 พบว่าการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ดังนี้ 1, 3, 5, 7, 9, และ 15 ส่วน ค่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นของสารเคลือบเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ระยะห่างระหว่างผงไททาเนียมไดออกไซด์ลดลง เป็นผลให้ระยะทางในการส่องผ่านของรังสีสั้นลง ทำให้รังสีสามารถเลี้ยวเบนและหักเหออกจากสารเคลือบได้มากกว่าที่ความลึกเท่ากัน (วัลลภ, 2549)

ส่วนผลสีของชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ ดังนี้ 1, 3, 5, 7, 9 และ 15 ส่วน ค่อน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน พบว่าชิ้นงานแผ่นยางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทนที่เติมผง TiO₂ ที่ปริมาณมากขึ้น สีของชิ้นงานมีความสว่างมากขึ้น เมื่อเทียบกับผิวเคลือบผิวที่ไม่ได้เติมผง TiO₂ เนื่องจากอนุภาคของผง TiO₂ มีสีขาว จึงทำให้สีเคลือบพอลิยูรีเทนจางลง (มีสีขาวเพิ่มขึ้น) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลของ TiO₂ ที่เติมในสารเคลือบพอลิยูรีเทน ที่มี ความสว่างของชิ้นงานยาง

The 11th Khon Kaen University 2010 Graduate Research Conference

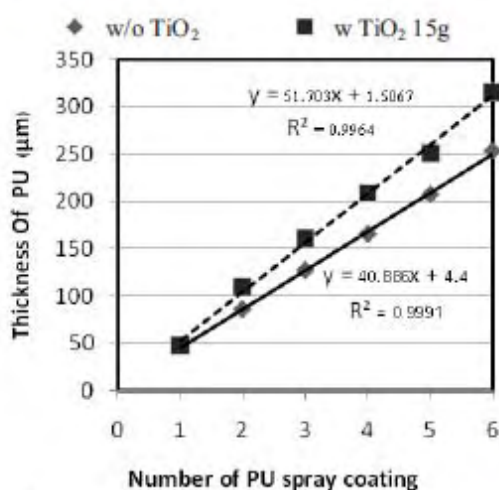
การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 8

ตารางที่ 2 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผง TiO_2

TiO_2 powder content in PU coating (%wt of PU coating)	Solar reflective at wave length (%)		
	Visible wave length at between 380 – 780 nm	NIR -IR wave length at between 780-2100 nm	Solar wave length at between 190 -2100 nm
0	9.50	27.99	18.48
1	10.14	27.28	18.44
3	11.57	29.78	20.36
5	12.71	29.78	22.06
7	14.99	36.20	25.20
9	15.94	37.61	26.35
15	17.87	40.11	28.54

ส่วนการศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่ความหนาต่างๆ ดังนี้ 130, 150, 200, 250 และ 300 ไมครอน โดยเลือกปริมาณผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 15 ส่วน คือน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ศึกษาความหนาของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ กับไม่เติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลของจำนวนครั้งในการเคลือบผิวพอลิยูรีเทนที่มีผง TiO_2 ที่มีต่อความหนาผิวเคลือบชั้นงานยาง

และเมื่อตรวจสอบการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่ความหนาดังนี้ 130, 150, 200, 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน คือน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการสะท้อนรังสีอาทิตย์ เนื่องจากรังสีไม่สามารถส่องผ่านผิวเคลือบได้ ทำให้รังสีตกกระทบเกิดการดูดกลืน และมีการสะท้อนหักเหของรังสี (Hong and Xiu, 2001) จึงไม่มีรังสีที่ทะลุผ่านไปถึงแผ่นยาง ดังนั้นความหนาจึงไม่มีผลต่อการสะท้อน (อนุสร, 2545)

4. ผลการตรวจสอบการยึดเกาะ และการดัดโค้งของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

ตารางที่ 4 พบว่า การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ ดังนี้ 1, 3, 5, 7, 9 และ 15 ส่วน คือน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน และที่ความหนาผิวเคลือบ ดังนี้ 130, 150, 200, 250 และ 300 ไมครอน โดยเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณ 15 ส่วน คือน้ำหนักสารพอลิยูรีเทน 100 ส่วน เมื่อนำมาตรวจสอบการยึดเกาะของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนบนวัสดุยางธรรมชาติ ไม่พบการหลุดลอกผิวเคลือบพอลิยูรีเทน และไม่พบรอยแตกร้าวของผิวเคลือบ

The **11th** Khon Kaen University 2010
Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอมผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 9

ตารางที่ 3 ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีผง TiO_2 ที่มีต่อความหนาผิวเคลือบ

TiO_2 content in polyurethane coating (%wt of PU coating)	Coating thickness (μm)	% Solar reflective at wave-lengths		
		Visible wave length at between 380 – 780 nm	NIR -IR wave length at between 780-2100 nm	Solar wave length at between 190 -2100 nm
0	130 $\pm$ 10	9.50	27.99	18.48
15	130 $\pm$ 10	17.95	40.20	28.61
	150 $\pm$ 10	17.87	40.11	28.54
	200 $\pm$ 10	17.84	40.48	28.7
	250 $\pm$ 10	17.72	40.47	28.63
	300 $\pm$ 10	18.09	40.40	28.78

ตารางที่ 4 ค่าการยึดเกาะและดัดโค้งของชิ้นงานยางที่เคลือบผิวด้วยพอลิยูรีเทนที่เติมผง TiO_2

Thickness of polyurethane coating	TiO_2 content in polyurethane (%wt of PU coating)	Properties	
		Surface adhesion	Blending
130 $\pm$ 10	0	5B*	Non crack
	1	5B*	Non crack
	3	5B*	Non crack
	5	5B*	Non crack
	7	5B*	Non crack
	9	5B*	Non crack
	15	5B*	Non crack
150 $\pm$ 10	15	5B*	Non crack
200 $\pm$ 10	15	5B*	Non crack
250 $\pm$ 10	15	5B*	Non crack
300 $\pm$ 10	15	5B*	Non crack

*5B: High adhesion

The 11th Khon Kaen University 2010 Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 10

สรุปผลการวิจัย

1. อนุภาคของผงไททาเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะทรงกลม มีการเกาะกันเป็นกลุ่ม และมีองค์ประกอบของไททาเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักมากถึง 93.6% และมีกลุ่มโลหะออกไซด์ ประมาณ 6.4 %

2. สภาพะในการพ่นเคลือบผิวที่เหมาะสมสำหรับสารเคลือบพอลิยูรีเทนบนชิ้นงานยาง มีดังนี้

- ระยะห่างการพ่นเคลือบ 30 cm
- จำนวนรอบการพ่นที่ 3 รอบ
- แรงดันลมในการพ่นอยู่ระหว่าง 6–65 kg/cm²
- ความเร็วในการพ่นเคลือบที่ 0.4 m/s
- ความหนาผิวเคลือบ 130 ± 10 μm

3. ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ และค่าความสว่างของผิวเคลือบพอลิยูรีเทนเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงไททาเนียมส่วนการเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์ทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน

4. การขีดเกาะ และความทนทานต่อการกัดกร่อนของผิวเคลือบพอลิยูรีเทน ไม่พบการหลุดลอกผิวเคลือบพอลิยูรีเทน และไม่พบรอยแตกร้าวที่ผิวชิ้นงาน

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (Medium – Size Projects on Rubber; MPR) ปี 2551 ตามสัญญาโครงการเลขที่ RDG5150066

เอกสารอ้างอิง

คณะกรรมการการพยากรณ์ความต้องการในการใช้ไฟฟ้า

2550 การพยากรณ์ความต้องการ ไฟฟ้า. ค้นเมื่อ

วันที่ 23 ธันวาคม 2551, จาก

<Http://www.eppo.go.th/load/>

LF-2007-03-26.pdf.

Chirattananon, S., and Taweekun, J. 2002. A

technical review of energy conservation

programs for commercial and government

buildings in Thailand [Electronic version].

Energy Conversion and Management, (44) :

743-762.

พรรคฤทธิ์ สมบัติสมบัติ และคณะ 2548. รายงานฉบับ

สมบูรณ์โครงการการผลิตและทดสอบหลังคา

ยางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับซีเมนต์.

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. ฝ่าย

อุตสาหกรรม

พรรคฤทธิ์ สมบัติสมบัติ และ คณะ 2550. รายงานฉบับ

สมบูรณ์ โครงการการพัฒนาวัสดุและเทคโนโลยี

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หลังคาประเภทหลังคา

จากวัสดุผสมยางและซีเมนต์. สำนักงานกองทุน

สนับสนุนการวิจัย. ฝ่ายอุตสาหกรรม

Paul, B., and Sarah, E. 1997. Preliminary survey of the

solar reflectance of cool roofing materials. J.

Energy Build. 22: 149-158

Hong, Y., and Xiu, Y. 2001. Characterization of

absorptivities to solar radiation for comode

pigments in coating. J. Coatings Technol. 73:

71-75.

The **11th** Khon Kaen University 2010
Graduate Research Conference

การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 11

PMO21- 11

อนุสรณ์ศรีสวัสดิ์ 2545 การศึกษาวัสดุผิวเคลือบ

สะท้อนความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา

เทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและ

วัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี.

Michael, I., Larry, L., and Andrew, A. 2006.

Multiscattering of light by particles. J. Optic,

Cambridge University, Cambridge, England.

124-135.

วัลลภ หาญณรงค์ชัย 2549 ศึกษาเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์

เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา

เทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและ

วัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี.

2. ตอบข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ (รายงานฉบับสมบูรณ์)

โครงการ “อิทธิพลของความหนาผิวเคลือบพอลิยูรีเทนและปริมาณผงไททานเนียมไดออกไซด์ในผิวเคลือบที่มีต่อสมบัติการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์หลังคายางจากวัสดุผสมยางธรรมชาติและขี้เลื่อยไม้” สัญญาเลขที่ RDG5150066

ลำดับที่	ข้อเสนอแนะ	ตอบข้อเสนอแนะ
1	นักวิจัยควรปรับปรุงการแสดง รูปที่ 4.3 ลักษณะผิวเคลือบแผ่นยางฯ หน้า 61 ให้ชัดเจนกว่านี้ เนื่องจาก รูปที่นำเสนอไม่ชัดเจน เปรียบเทียบค่อนข้างยาก ไม่สามารถเห็นความแตกต่าง	คณะวิจัยฯ ได้ดำเนินการปรับปรุง รูปที่ 4.3 ลักษณะผิวเคลือบแผ่นยางฯ หน้า 61 เรียบร้อยแล้ว โปรดพิจารณาในหน้าที่ 61 ของรายงานฉบับสมบูรณ์ที่แก้ไขแล้ว
2	นักวิจัยควรตรวจสอบคำผิดในรายงานวิจัยด้วย เช่น หน้า 32 บรรทัดที่ 2 ในย่อหน้าที่ 2 (คำว่า “คือ”)	คณะวิจัยฯ ตรวจสอบคำผิดและแก้ไขในรายงานวิจัย ตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำแล้ว โปรดพิจารณาในรายงานฉบับสมบูรณ์ที่แก้ไขแล้ว
3	นักวิจัยควรเพิ่มข้อมูล ดังนี้ ในส่วนของการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ น่าจะมีข้อมูลเพิ่มเติมด้านราคาโดยทั่วไปของกระเบื้องชนิดต่างๆ (ตารางที่ 4.17) และในส่วนของหลังคายางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทนฯ ก็ควรประเมินต้นทุนด้านพลังงาน และค่าแรง ระบุเป็น % ของค่าที่ทำการประเมิน	คณะวิจัยฯ เพิ่มเติมข้อมูลทางด้านราคาของกระเบื้องชนิดต่างๆ และหลังคายาง ในตารางที่ 4.17 หน้า 84 เรียบร้อยแล้ว ส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ของหลังคายางที่เคลือบด้วยพอลิยูรีเทน มีข้อมูลทางด้านราคาของวัตถุดิบโดยละเอียด ส่วนข้อมูลทางด้านพลังงาน และค่าแรง คณะวิจัยฯ ไม่สามารถทราบข้อมูลในระดับโรงงานการผลิตด้านดังกล่าวได้อย่างแม่นยำ จึงไม่ได้เพิ่มเติมในส่วนนี้
	ควรเสนอความเห็นเกี่ยวกับสมบัติการติดไฟ - ลามไฟที่อาจเป็นประเด็นข้อด้อยไว้ด้วย	จากข้อมูลโครงการที่ผ่านมา โครงการ “การผลิตและทดสอบหลังคายางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับขี้เลื่อย” สัญญาเลขที่ RDG4650054 ได้ทำการเดิมสารหน่วยงานลามไฟในสูตรยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อยไม้ ทดสอบสมบัติการติด-ลามไฟของหลังคายางฯ ซึ่งผ่านมาตรฐานการทดสอบ UL 94 Clause 8-20 mm Vertical Burning Test; ซึ่งผลการทดสอบอยู่ในระดับ V-0 (ไม่มีการติด-ลามไฟ) นอกจากนี้ โครงการ “การพัฒนาวัสดุและ

ลำดับที่	ข้อเสนอแนะ	ตอบข้อเสนอแนะ
	● ประเด็น “ราคา” จะเป็นสิ่งบ่งชี้ความเป็นไปได้ของการขยายผลการวิจัย หรือพัฒนาเพิ่มเติมสู่การใช้จริง ดังนั้น นักวิจัยควรเสนอความเห็นเกี่ยวกับความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาว่าจะพัฒนาอย่างไร เพื่อให้สามารถขยายผล และมีผู้สนใจนำไปใช้ เช่น วิธีการยุ่งยากหรือไม่ ต้องปรับอย่างไร ต้นทุนของวิธีการ กระบวนการ เครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง เป็นอย่างไร จะต้องปรับปรุงหรือพัฒนาให้ง่าย หรือสะดวก ต้นทุนต่ำอย่างไร เป็นต้น	คณะวิจัยฯ เพิ่มเติมข้อเสนอแนะการขยายผลการวิจัย และแนวทางการนำไปใช้งานจริงของโครงการวิจัยแล้ว ในหัวข้อที่ 5.9 ข้อย่อยที่ 4 ในหน้าที่ 88 ของรายงานฉบับสมบูรณ์ที่แก้ไขแล้ว