บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผิวเคลือบสะท้อนความร้อนมีสมบัติพิเศษในเรื่องความสามารถในการสะท้อนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ซึ่งนิยมนำมาใช้เคลือบผิวหลังคาเพื่อลดปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร ส่งผลให้ช่วยลดภาระของระบบปรับอากาศโดยตรง ดังนั้นการศึกษาเรื่องผิวเคลือบสะท้อนจึงควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติสะท้อนของเม็ดสีและผิวเคลือบ งานวิจัยเรื่องการพัฒนาเม็ดสีเขียวอ่อนจากโครเมียมออกไซด์ให้มีสมบัติสะท้อนรังสีอาทิตย์สำหรับวัสดุหลังคานี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาโดยมีเนื้อหาครอบคลุมตามลำดับดังต่อไปนี้

2.1 รังสีอาทิตย์และความร้อนในอาคาร

ดวงอาทิตย์แผ่รังสีความร้อนและแสงสว่างให้กับโลก ซึ่งรังสีความร้อนเข้ามาถึงผิวโลกประมาณ 420 Btu/ft^2/hr หรือเท่ากับ 1.94 cal/cm^2/min [1] ทั้งนี้โลกได้รับรังสีความร้อนน้อยกว่าที่ควรจะเป็นมาก เนื่องจากมีบรรยากาศโลกห่อหุ้มไว้ ส่วนหนึ่งของรังสีถูกดูดซึมไว้ในบรรยากาศบางส่วนกระจายออกเพราะกระทบกับโมเลกุลของบรรยากาศ ส่วนหนึ่งพื้นดินจะรับไว้และเก็บในรูปของความร้อนและค่อยๆคายออกมาสู่อากาศผิวดินยิ่งผิวโลกที่มีความสูงจากระดับทะเลมากเท่าไร รังสีความร้อนที่ได้รับก็จะเพิ่มขึ้นตามความสูง

การถ่ายเทรังสีความร้อนมีอยู่หลายลักษณะตามชนิดของต้นกำเนิดและลักษณะการถ่ายเท คือ

1) คลื่นรังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์
2) คลื่นรังสีแผ่กระจาย
3) คลื่นรังสีสะท้อนจากพื้นดินและสิ่งใกล้เคียง
4) คลื่นรังสียาวจากพื้นดิน หรือสิ่งใกล้เคียงที่ร้อน
5) คลื่นรังสียาวที่อาคารแผ่กลับให้บรรยากาศ

คลื่นรังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์กับคลื่นรังสีแผ่กระจาย รวมกันเรียกว่า คลื่นรังสีรวม หรือการแผ่รังสีรวม (total radiation) ซึ่งมีความสำคัญในการพิจารณาเรื่องการได้รับความร้อนทางด้านต่างๆของอาคาร วิเคราะห์ในเรื่องทิศทางการวางอาคาร รูปร่างสัดส่วนของอาคารในเขตร้อน การควบคุมอุณหภูมิของอาคารเทคนิคการก่อสร้างอาคารในเขตร้อน เป็นต้น

การแผ่รังสีสะท้อนจากสิ่งที่อยู่ใกล้เคียง ปกติพื้นที่แนวนอนได้รับรังสีเป็น 2 เท่าของพื้นที่แนวตั้ง ในช่วงเวลาที่เกิดความร้อนวิกฤต (overheated period) เช่นช่วง 14.00-16.00 น. ส่วนของอาคาร หรือ ระดับพื้นแนวนอนที่มีผิววัสดุบางอย่างที่จะสะท้อนความร้อนจำนวนมากที่เข้ามาในอาคารโดยง่าย การออกแบบอาคาร โดยมีดาดฟ้าคอนกรีตเสริมหลักขนาดใหญ่ จะสะท้อนแสง และส่งผ่านความร้อนเข้าในห้องชั้นบนจึงควรหลีกเลี่ยงให้มาก

ความร้อนภายในอาคารเกิดขึ้นจาก 2 ส่วน คือ ความร้อนจากภายนอกและความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารเอง โดยส่วนมาก ความร้อนรวมในอาคารจะมาจากภายนอกมากกว่าและเป็นความร้อนที่ได้รับอิทธิพลจากรังสีดวงอาทิตย์ โดยการส่งผ่านความร้อนมาจากตัวกลางหลายชนิดมาสู่อาคาร และความร้อนเหล่านี้ก็จะส่งผ่านวัสดุทำอาคารมาสู่ภายในอีกทีหนึ่ง

2.1.1 ที่มาของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร [1]

2.1.1.1 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในอาคาร (internal heat gain : Qi) เป็นความร้อนที่อาจเกิดได้ทั้งจากคน หรือมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในอาคารเช่น ความร้อนจากหลอดไฟฟ้า ตู้เย็น เป็นต้น

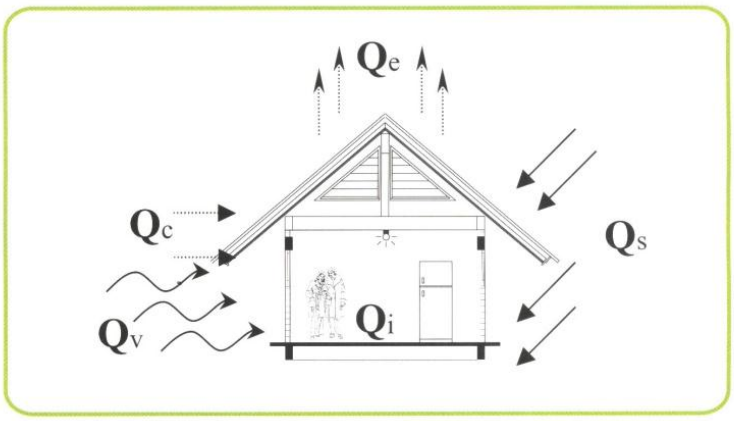
2.1.1.2 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายนอกอาคาร (external heat gain) เป็นความร้อนที่จะเกิดจากอิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

1) conduction heat gain/loss (Qc) การนำความร้อน ซึ่งอาจเกิดได้ทั้งการนำความร้อนเข้ามาภายในอาคารหรือการสูญเสีย ความร้อนสู่ภายนอกโดยตัวนำความร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิระหว่างภายนอกและภายในอาคาร โดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเสมอ

2) solar radiation (Qs) การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ ในกรณีของประเทศไทยที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร จะได้รับผลกระทบจากรังสีดวงอาทิตย์เป็นอย่างมาก

3) ventilation heat gain/loss (Qv) ความร้อนที่มาจากการระบายอากาศ จะมีลักษณะคล้ายกับการนำความร้อนแต่จะมีตัวกลางในการพาความร้อนมาโดยอากาศ ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับทิศทางและความเร็วของกระแสลมด้วย

4) evaporative heat loss (Qe) การระเหยหรือความร้อนที่กลายเป็นไอ และในขณะที่เกิดการระเหยจำเป็นจะต้องใช้พลังงาน (ความร้อน)ในการเปลี่ยนสถานะ ทำให้สามารถช่วยลดความร้อนในบริเวณนั้นได้



รูปที่ 2.1 แสดงความร้อนที่เข้าสู่อาคาร [1]

เมื่อพิจารณาถึงวิธีป้องกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารโดยตรง หลังคาอาคารเป็นส่วนที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ในเวลากลางวันซึ่งมีอุณหภูมิสูง การส่งผ่านความร้อนจากหลังคาเข้าสู่อาคารจึงเป็นไปได้ง่าย แม้ว่าจะมีฝ้ากันความร้อน แต่ก็เพียงแค่ลดความร้อนลงเล็กน้อยเท่านั้น ภาระจึงไปตกอยู่กับเครื่องปรับอากาศ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานของประเทศ ดังนั้นการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารประการแรกคือ การใช้วัสดุสะท้อนความร้อนในการมุงหลังคาอาคาร กระเบื้องมุงหลังคาจึงเป็นวัสดุหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง การศึกษาความสามารถในการสะท้อนความร้อนของผิวหลังคามีความเป็นไปได้ที่จะช่วยให้อากาศภายในห้องมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งจะช่วยลดการทำงานของเครื่องปรับอากาศ จึงเป็นการช่วยชาติประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่ง เนื่องจากพลังงานที่ผลิตในประเทศยังไม่เพียงพอต่อการบริโภค จึงจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้รัฐบาลต้องเสียค่าใช้จ่ายมหาศาล หากสามารถลดภาระค่าใช้จ่ายส่วนนี้ลงไปได้ ย่อมส่งผลดีต่อเศรษฐกิจด้วย

2.1.2 การป้องกันความร้อนทางหลังคา

หลังคาเป็นพื้นที่ที่มีระดับใกล้เคียงแนวนอนจึงมีผลให้มีปริมาณการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์สูงกว่าพื้นที่ในแนวระนาบตั้ง เช่น ผนังอาคาร นอกจากนี้หลังคายังเป็นส่วนบนสุดของอาคาร ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแสงอาทิตย์ให้กับอาคารทั้งหลัง หลังคาที่มีสีเข้ม เช่น สีน้ำตาลแดง หรือสีน้ำเงินเข้ม อาจมีอุณหภูมิผิวภายนอกสูง ถึง 60 องศาเซลเซียส ในช่วงที่มีแดดจัด

การป้องกันความร้อนจากหลังคาจึงเป็นจุดวิกฤตในการป้องกันความร้อนที่จะแพร่ผ่านเข้าสู่ภายในอาคาร เนื่องจากสภาพแวดล้อมภายนอก หลังคาเป็นส่วนหนึ่งของอาคารที่สำคัญที่ช่วยป้องกันอาคารจากสภาพแวดล้อมภายนอกเพราะหลังคาเป็นกรอบอาคารที่ต้องรองรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ถ่ายเทเข้ามาในอาคารโดยตรง วัสดุหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนได้แก่

2.1.2.1 วัสดุมุงหลังคา (roofing) หมายถึง วัสดุที่ใช้มุงหลังคาของอาคาร เป็นส่วนที่รองรับการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรง ประเภทวัสดุมุงหลังคาที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ได้แก่

กระเบื้องซีเมนต์ใยหิน กระเบื้องคอนกรีต กระเบื้องเซรามิกส์ กระเบื้องดินเผา แผ่นหลังคาแอสฟัลท์และหลังคาแผ่นโลหะ

2.1.2.2 ฉนวนกันความร้อน (insulation) ฉนวนกันความร้อนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ฉนวนแบบมีมวลและฉนวนแบบสะท้อนความร้อน

2.1.2.3 ฉนวนกันความร้อนแบบมีมวล (mass insulation) หมายถึง วัสดุที่ใช้ป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัสดุ โดยอาศัยความเป็นฉนวนของวัสดุที่มีสมบัติการต้านทานความร้อนที่สูงของตัววัสดุเอง วัสดุส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย มีโพรงหรือช่องกลาง เช่น ฉนวนใยแก้ว (fiber glass) ฉนวนใยหิน (rock fiber) ฉนวนใยเซลลูโลส (cellulose fiber) โฟมพอลีสไตรีน (polystyrene foam, PS) โฟมพอลียูรีเทน(polyurethane foam, PU) และโฟมพอลีเอทธีลีน (polyethelene foam, PE)

2.1.2.4 ฉนวนแบบสะท้อนความร้อน (reflective sheet) หมายถึงวัสดุที่ใช้ป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัสดุ โดยอาศัยสมบัติสะท้อนรังสีความร้อนของวัสดุ เพื่อที่จะลดค่าพลังงานความร้อนไม่ให้ถูกดูดซับ และทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางหรือมีผิวที่มีการสะท้อนสูง เช่น แผ่นอลูมินัมฟอยล์ (aluminium foil sheet) เซรามิกส์โคทติ้ง (ceramic coating) เป็นต้น

จากการหาข้อมูลเบื้องต้น จากสถาปนิกผู้ออกแบบอาคารและที่อยู่อาศัย ทำให้ทราบว่าสิ่งที่มีผลต่อความร้อนในอาคารจากมากไปน้อย คือ วัสดุหลังคา การออกแบบรูปแบบอาคาร ช่องเปิดระบายอากาศ ทิศทางลมและแสงแดด ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มุ่งความสนใจไปที่หลังคา ปัจจัยที่มีผลต่อความร้อนในอาคารอย่างมากคือสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำหลังคา ได้แก่ ค่าการนำความร้อน การดูดซับความร้อนและการสะท้อนความร้อน

กฎกระทรวงที่ออกตามความในพระราชบัญญัติการอนุรักษ์พลังงานปี 2535ในส่วนของอาคารที่ต้องปฏิบัติตามพระราชบัญญัติ เรียกว่า “อาคารควบคุม” ซึ่งจะกล่าวถึงค่ามาตรฐานของอาคารควบคุม ตามกฎกระทรวง ทางด้านค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value, RTTV) ในส่วนของอาคารที่มีการปรับอากาศคือ 25 W/m^2 และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังอาคาร(overall thermal transfer value, OTTV) คือ 55 W/m^2 สำหรับอาคารเก่า และ 45 W/m^2 สำหรับอาคารใหม่ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเพียงค่า RTTV ที่เกี่ยวข้องกับหลังคาอาคารเท่านั้น ซึ่งตามปกติแล้วพบว่าหลังคาอาคารมีค่า RTTV เกินมาตรฐาน (มากกว่า 25 W/m^2) โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีลดค่า RTTV ด้วยวิธีที่ยกมาเป็นตัวอย่างดังนี้

1) การบุฉนวนกันความร้อนแบบฉนวนใยแก้ว (glass wool) ที่ฝ้าเพดาน

2) การติดตั้งแผ่นสะท้อนความร้อนแบบแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil)

3) การใช้สีเซรามิกส์ลดความร้อน (ceramic coating)

4) การใช้ฉนวนกันความร้อนแบบโฟม (polyurethane foam, polyethylene foam)

ประโยชน์ของการลดค่า RTTV คือเครื่องปรับอากาศจะทำงานน้อยลง พลังงานที่ต้องใช้กับเครื่องก็ลดลง ดังนั้นการใช้วัสดุหลังคาที่เหมาะสมจึงเป็นการประหยัดพลังงานได้อีกทางหนึ่ง

2.2 ชนิดและสมบัติของวัสดุที่ใช้มุงหลังคา

วัสดุที่ใช้ทำหลังคามีหลายชนิดแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันไป ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้น โดยทั่วไปแล้ววัสดุทำหลังคาที่ใช้กันอย่างแพร่หลายแบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

2.2.1 ซีเมนต์ใยหิน, ไฟเบอร์ซีเมนต์

หลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์เป็นวัสดุที่พัฒนามาจากหลังคาซีเมนต์ใยหินในสมัยก่อน เนื่องจากเส้นใยหินเป็นอันตรายต่อสุขภาพจึงเปลี่ยนมาเป็นเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งมีข้อดีในเรื่องที่ไม่ก่อให้เกิดสารพิษ มีความยืดหยุ่นตัวและมีความเหนียวมากกว่าเส้นใยหิน ไฟเบอร์ที่ใช้เป็นเส้นใยสังเคราะห์ (synthetic fiber) และเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำ หลังคาชนิดนี้ราคาไม่สูงใช้กันมากในปัจจุบัน

2.2.2 คอนกรีต

หลังคาคอนกรีตมีผู้บริโภคนิยมใช้มากเนื่องจากสวยงามและคงทน แต่มีข้อเสียคือมีค่าการนำความร้อนสูงมีความหนาแน่นมากจึงคายคายความร้อนช้า ทำให้ความร้อนในบ้านค่อนข้างสูง ด้วยข้อเสียด้านน้ำหนักมากจึงต้องทำโครงหลังคาด้วยเหล็กทำให้ค่าใช้จ่ายสูง

2.2.3 พลาสติก

พลาสติกเริ่มเข้ามาแทนที่ผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น หลังคาพลาสติกก็เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีผู้ผลิตเมื่อไม่นานมานี้ มีจุดขายเรื่องราคาถูกและน้ำหนักเบาแต่มีข้อเสียด้านอายุการใช้งานสั้น(ประมาณ 8 - 10 ปี) เนื่องจากพลาสติกไม่คงทนต่อความร้อนและรังสีอาทิตย์ ทำให้กรอบและแตกได้ง่ายจึงต้องเปลี่ยนบ่อย

2.2.4 แผ่นโลหะ

ผู้บริโภคที่ใช้แผ่นโลหะมุงหลังคาที่อยู่อาศัยส่วนใหญ่เป็นผู้บริโภคที่มีรายได้ไม่สูง แผ่นโลหะใช้ต้นทุนไม่สูง น้ำหนักไม่มากเมื่อเทียบกับพื้นที่ของแผ่นโลหะ ในการก่อสร้างไม่ต้องใช้แปรมากนักเนื่องจากแผ่นโลหะเป็นแผ่นขนาดใหญ่ปูได้ครั้งละมากๆ นอกจากนี้มีผู้นิยมใช้มุงหลังคาโรงงานอุตสาหกรรม คลังสินค้าหรือห้างสรรพสินค้าที่มีขนาดใหญ่ ข้อเสียของแผ่นโลหะคือนำความร้อนเร็วแต่ก็คายเร็วด้วยเช่นกันเมื่อเทียบกับวัสดุหลังคาที่ทำด้วยคอนกรีต การนำความร้อน

เร็วของโลหะทำให้ต้องบุฉนวนกันความร้อนใต้หลังคาด้วยจึงจะช่วยลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ

2.2.5 เซรามิกส์

หลังคาเซรามิกส์ชนิดเคลือบผิวมีผู้บริโภคเป็นส่วนน้อยเนื่องจากราคาสูงมากที่สุดในบรรดาวัสดุหลังคาด้วยกัน ประมาณตารางเมตรละ 700 – 1000 บาท หลังคาชนิดนี้หรูหรา ดูภูมิฐาน สำหรับหลังคาเซรามิกส์ที่ไม่ได้เคลือบผิวมักใช้กับงานแนวศิลปะ เช่นหลังคาวัด หลังคารีสอร์ท ศาลานั่งเล่น เป็นต้น

ตามที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วว่า ความร้อนในอาคาร ส่วนใหญ่ 87 % เกิดขึ้นจากหลังคา ดังนั้นจึงได้ศึกษาสมบัติที่สำคัญของหลังคาในด้านความสัมพันธ์เชิงความร้อน ซึ่งได้แก่ การนำความร้อน (heat conduction) การสะท้อนความร้อน (heat reflection) และการปล่อยความร้อน (heat emittion)

จากตารางที่ 2.1 วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ คือ คอนกรีต และวัสดุในกลุ่ม เซรามิกส์ แต่ควรต้องพิจารณาถึงสมบัติด้านอื่นๆ ประกอบด้วย จึงได้ค้นคว้าต่อไปถึงสมบัติด้านอื่นที่ควรจะมี คือ ค่าการสะท้อนความร้อนและการปล่อยความร้อน แสดงในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 วัสดุมุงหลังคาและค่าการนำความร้อน [1]

วัสดุหลังคา	**ค่านำความร้อน (W/m K)**
กระเบื้องซีเมนต์	
- ซีเมนต์ใยหิน	0.198
- ไฟเบอร์ซีเมนต์	-
คอนกรีต	1.442
แอสฟัลต์	1.226
แผ่นโลหะ	
- โลหะผสมของอะลูมิเนียมแบบธรรมดา	211
- เหล็กกล้า	47.6
กระเบื้องเซรามิกส์	0.836

ตารางที่ 2.2 ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุชนิดต่างๆ [4]

วัสดุ	Range (nm)			
	UV	VIS	IR	Total
	290-380 (%)	380-780 (%)	782-2500 (%)	290-2500 (%)
เซรามิกส์แดง	9.10	33.10	78.90	67.70
เซรามิกส์ขาว	11.50	53.10	74.50	68.00
ไฟโบรซีเมนต์	25.00	36.08	40.87	39.35
Al-ไม่เคลือบ	73.40	72.53	73.74	73.19
Al-แดง	6.26	27.34	52.04	45.69
St-ไม่เคลือบ	78.49	69.67	73.03	72.64
St-ขาว	7.95	78.46	59.53	60.82
Al-Zn	74.63	65.17	68.85	68.42
ซีเมนต์สีเข้ม	13.63	16.61	12.42	13.23
ซีเมนต์สีอ่อน	22.78	32.20	33.42	32.76

ตารางที่ 2.3 ค่า emittance ของรังสีอาทิตย์ของวัสดุชนิดต่างๆ [4]

วัสดุ	Aged albedo	Emittance	อุณหภูมิผิว (°C)
เซรามิกส์แดง	0.53	0.9	36.8
เซรามิกส์ขาว	0.54	0.9	36.2
แอสเบสตอสซีเมนต์	0.34	0.9	47.1
Al-ไม่เคลือบ	0.57	0.05	69.4
Al-แดง	0.38	0.9	45.0
St-ไม่เคลือบ	0.57	0.25	57.9
St-ขาว	0.49	0.9	39.2
Al-Zn	0.54	0.25	60.1
ซีมนต์สีเข้ม	0.26	0.9	50.8
ซีเมนต์สีอ่อน	0.49	0.9	49.8

<u>หมายเหตุ</u> ตารางที่ 2.2 และ 2.3 สัญลักษณ์ Al คืออลูมิเนียม, St คือแผ่นโลหะและ Zn คือสังกะสี

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าวัสดุกลุ่มโลหะที่ไม่ได้เคลือบผิวและวัสดุกลุ่มเซรามิกส์ให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ในช่วง IR สูงกว่ากลุ่มอื่นๆ แต่เมื่อมาพิจารณาค่า emittance จากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่า วัสดุที่มีอุณหภูมิที่ผิวต่ำที่สุดคือ วัสดุกลุ่มเซรามิกส์ โดยที่วัสดุที่มีค่า emittance สูงมีส่วนช่วยให้ อุณหภูมิที่ผิวหลังคาต่ำ แต่ในวัสดุกลุ่มซีเมนต์แม้ว่าจะมีค่า emittance สูง แต่ไม่ได้ทำให้อุณหภูมิที่ผิวหลังคาต่ำลง

2.3 ความสามารถในการลดความร้อนจากการใช้ผิวเคลือบสะท้อนความร้อน

ความสามารถในการลดความร้อน เป็นประเด็นสำคัญในการนำผิวเคลือบมาใช้งาน ในอดีตที่ผ่านมาได้ปรากฏรายงานจำนวนมาก อาทิ บทความจาก Home energy magazine [5] ซึ่งได้กล่าวถึงค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุหลังคาชนิดต่างๆ พบว่าหลังคาที่มีลักษณะผิวเรียบและสีขาวจะมีค่าการสะท้อนสูงถึง 80 % นั่นคือพลังงานแสงอาทิตย์เพียง 20 % เท่านั้นที่จะดูดซับเป็นความร้อน ส่วนกรณีที่มีการเคลือบหลังคาด้วย ceramic coating ซึ่งได้จากการเพิ่มเนื้อสารเคลือบด้วยเม็ดเซรามิกส์จะได้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์มากกว่า 80 % นอกจากค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์แล้วตัวแปรที่จะทำให้หลังคามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ดีได้แก่ ค่าการคายความร้อน (infrared emittance) ซึ่งหลังคาที่ดีควรมีค่าการคายความร้อนสูง ซึ่งผลของค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการคายความร้อนของวัสดุหลังคาจะทำให้อุณหภูมิของหลังคาเปลี่ยนไป แสดงดังตารางที่ 2.4

นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาวัสดุอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า Radiation - control coating ซึ่งมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่า 75% และมีค่าการคายความร้อนต่ำสุด 0.75 วัสดุนี้มักถูกนำไปใช้กับผิวภายในอาคาร ในปี 1994 Yarbrough, D.W.และ Nachimuthu, R. [6] ได้ทำการศึกษาโดยการเตรียม Radiation- control coating ทั้งหมด 20 สูตร ด้วยการปรับส่วนสารเติมแต่งพบว่าผิวเคลือบที่ได้เมื่อนำไปเคลือบบนหลังคาจะทำให้อุณหภูมิหลังคาต่ำกว่าหลังคาที่ไม่ได้เคลือบ

ต่อมาในปี 1995 Yarbrough D.W. ร่วมกับ Dycus, P.J. [7] รายงานผลการศึกษาถึงประสิทธิภาพการลดความร้อนที่เข้าสู่ระบบและการลดภาระระบบการปรับอากาศพบว่าผิวหลังคาที่เป็น radiation- control coating จะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2.4 ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิหลังคาเทียบกับสิ่งแวดล้อมของวัสดุหลังคาชนิดต่างๆ [5]

วัสดุ	ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ (%)	อุณหภูมิหลังคาที่สูงกว่าอากาศ (^{o}F)
Bright white coating (ceramic) on smooth surface	80 %	15^{o}
White membrane	70 %- 80 %	15^{o} – 25^{o}
White metal	60 %- 80 %	25^{o} -36^{o}
Bright white coating (ceramic) on smooth surface	60 %	36^{o}
Bright aluminum coating	55 %	51^{o}
Premium white shingle	35 %	60^{o}
Generic whit shingle	25 %	70^{o}
Light brown/gray shingle	20 %	75^{o}
Dark red tile	18 % - 33 %	62^{o}-77^{o}
Dark shingle	8 % - 19 %	76^{o} – 87^{o}
Black shingle or materials	5 %	90^{o}

ในปี 1996 U.S. Department of Energy (DOE) ร่วมกับ Lockheed Martin Energy Research Corporation [8] ได้ทำการศึกษาพิสูจน์ผิวเคลือบสะท้อนความร้อนสำหรับผิวหลังคา (reflective coating for rooftops) โดยจัดทำการทดสอบขึ้นที่ Tyndall Air Force Base (AFB)ในรัฐฟลอริดา มีวัตถุประสงค์ในการคำนวณหาผลประหยัดในระบบทำความเย็น ซึ่งหาได้จากประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหลังคาและพลังงานที่ต้องการ การทดสอบการกระทำโดยการนำหลังคาที่มีการเคลือบสารเคลือบและไม่เคลือบไปวางไว้บนดาดฟ้าอาคาร สารเคลือบที่ทำการศึกษาเป็นสารเคลือบสีขาวทั้งคู่ได้แก่สารเคลือบลาเท็กซ์ที่มีการเติมเม็ดเซรามิกส์ (latex-based products with ceramic beads added) และสารเคลือบยางอะคริลิค (acrylic elastomeric products) โดยเม็ดเซรามิกส์ที่ใช้เป็นบอโรซิเกต(borosilicate micro sphere) ที่มีลักษณะใส เนื่องจากสมบัติที่สำคัญของวัสดุหลังคาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้แก่ ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์และค่าการคายความร้อน หรือค่าความสามารถของหลังคาในการปล่อยรังสีที่มีความยาวคลื่นออกสู่ท้องฟ้า ซึ่งพบว่าการคายความร้อนของผิวเคลือบสีขาวมีค่าเท่ากับหลังคาที่ไม่ได้ทำการเคลือบ จากผลการทดลองพบว่าการเคลือบผิวบนหลังคาสามารถลดฟลักซ์ความร้อนลงได้ในปริมาณที่ไม่เท่ากันในแต่

ละกรณี และพบว่าเม็ดเซรามิกส์ที่เติมเข้าไปมีผลต่อการเพิ่มเนื้อของผิวเคลือบเท่านั้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์แต่อย่างใด

2.4 กระบวนการเตรียมสารเคลือบ

กระบวนการเตรียมสารเคลือบเพื่อให้มีสมบัติสะท้อนความร้อนมีหลักการเหมือนกับการเตรียมสารเคลือบทั่วๆไป มีอุปกรณ์สำหรับเลือกใช้อยู่หลายแบบ ซึ่งหลักการสำคัญในการผลิตสารเคลือบสะท้อนความร้อนได้แก่ การกระจายเม็ดสี เพื่อให้ได้สารเคลือบที่มีคุณภาพและเสถียรภาพที่ดี Wicks, Z.W. และคณะ [9, 10, 11] ได้ทำการแบ่งขั้นตอนการกระจายเม็ดสีเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1) การเปียก (wetting)
2) การแยก (separation)
3) การทำให้เสถียร (stabilization)

การเปียก คือ เป็นขั้นตอนการทำให้สารยึดเปียกบนเม็ดสี ซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำให้สารยึดมีความตึงผิวต่ำกว่าเม็ดสีจึงจะเกิดการเปียกได้ หากสารยึดที่ใช้มีความตึงผิวสูงกว่าเม็ดสีจะไม่เกิดการเปียก ทำให้ต้องมีการใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant) เข้าช่วย

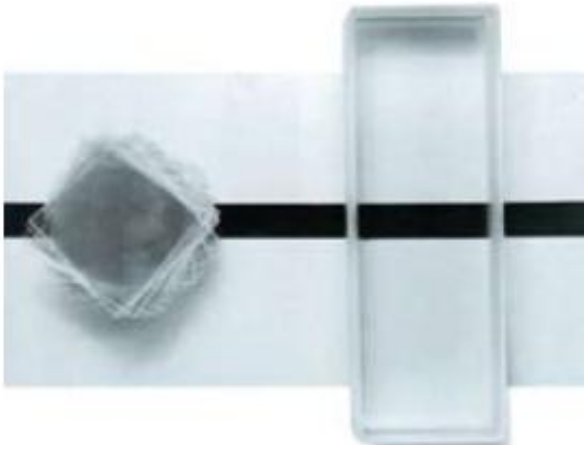
การแยก เป็นขั้นตอนการให้แรงเฉือนกับอนุภาคที่เกาะกันเป็นกลุ่ม ทำให้อนุภาคเม็ดสีกระจายตัว ซึ่งประสิทธิภาพของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้เครื่องมือให้เหมาะกับแรงเฉือนที่ต้องการ

การทำให้เสถียร บางกรณีต้องใช้สารลดแรงตึงผิวหรือสารเพิ่มเสถียร (stabilizer) ให้กับสารเคลือบ ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ เกลือของอะคริลิคพอลิเมอร์ที่ได้จากมอนอเมอร์ของกรดอะคริลิค (acrylic acid) กับไฮดรอกซิเอทิล อะคริเลต (hydroxyethyl acrylate) โดยหมู่เกลือจะดูดซับที่ผิวของเม็ดสี และหมู่ไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับน้ำ [10] สำหรับสารเคลือบผิวที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจะยากต่อการกระจายเม็ดสี เนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของน้ำที่มีความตึงผิวสูงทำให้เกิดปัญหาการเปียกที่ผิวเม็ดสีได้ยาก และในบางกรณีน้ำจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงกับเม็ดสี งานวิจัยที่ผ่านมา [10] พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์มีความเป็นขั้วสูงทำให้ไม่เกิดปัญหาเรื่องการเปียกเมื่อใช้ในสารเคลือบที่มีน้ำเป็นตัวกลาง และนอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถอยู่ได้อย่างเสถียรในสารเคลือบ

2.5 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์

ในการตรวจสอบหาค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของวัสดุผิวเคลือบด้วยเครื่อง spectrophotometer สารมาตรฐานที่ใช้ได้แก่แบเรียมซัลเฟต (barium sulphate, $BaSO_4$) ซึ่งในเอกสารอ้างอิง [12] กล่าวว่า แบเรียมซัลเฟตเหมาะสำหรับใช้เป็นสารมาตรฐาน เนื่องจากมีความสามารถสะท้อนรังสีกระทบ ช่วง 240 - 800 นาโนเมตร ได้ 100%

รูปที่ 2.2 แสดงการกระเจิงของแสงโดยการสะท้อน แท่งแก้วด้านขวามือเห็นได้อย่างชัดเจนเพราะแสงเกิดการสะท้อนเพียงสองครั้ง (หน้าและหลังแท่งแก้ว) ส่วนทางซ้ายมือเป็นแผ่นแก้วที่วางกองรวมกันอยู่ซึ่งแต่ละแผ่นมีความหนาเท่ากัน ไม่สามารถมองเห็นเส้นได้เนื่องจากแสงเกิดการสะท้อนไปมาระหว่างอากาศกับแก้วแต่ละแผ่น แต่ถ้านำแผ่นแก้วทั้งหมดไปจุ่มในน้ำมันจนกระทั่งอากาศเคลื่อนที่ออกไปหรือมีแรงกดเพียงพอที่จะทำให้อากาศเคลื่อนที่ออก กองแผ่นแก้วเหล่านี้จะโปร่งใสเหมือนแท่งแก้วปกติ ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงดรรชนีหักเหเป็นการเสริมการหักเหของแสง จากรูปที่ 2.2 ค่าดรรชนีหักเหของอากาศเท่ากับ 1 และของแก้วเท่ากับ 1.5 ซึ่งค่าดรรชนีหักเหที่ไม่เท่ากันนี้ทำให้เกิดการกระเจิงแสงที่ผิวหน้าของแผ่นกระจก ซึ่งเทียบได้กับการเกิดการสะท้อนของแสงที่ผิวหน้าของเม็ดไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าดรรชนีหักเห 2.7 เมื่ออยู่ในสารยึดทั่ว ๆ ไปที่มีค่าดรรชนีหักเห 1.5 นั่นคือค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสารเคลือบที่ได้จะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ตัวแปรสำคัญได้แก่ ค่าผลต่างของดรรชนีหักเหระหว่างเม็ดสีกับสารยึด กล่าวคือถ้าเม็ดสีมีดรรชนีหักเหสูงกว่าสารยึดมากพบว่า ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบก็จะสูงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.2 ค่าดรรชนีหักเหทำให้เกิดการกระเจิงแสง [13]

สำหรับค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.5.1 สารยึด

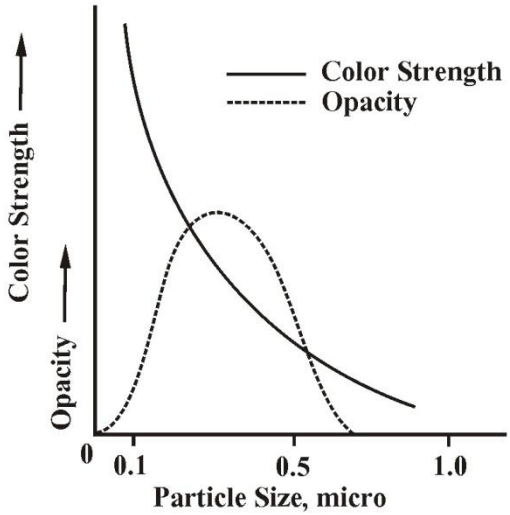
จากการศึกษาสารยึดที่ใช้กับวัสดุหลังคาที่ผ่านมา [12] ซึ่งให้ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์พบว่ามอนอเมอร์ที่ใช้ทำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการสะท้อนดีได้แก่ acrylic acid และ methacrylate ester แต่ในงานวิจัยนี้ใช้สารยึดที่เป็นวัสดุเคลือบเซรามิกส์ซึ่งเมื่อผ่านการเผาแล้วมีลักษณะเป็นแก้วใส มีผลด้านการหักเหของแสง

2.5.2 เม็ดสีหรือสารเพิ่มเนื้อ

ในหลายบทความ [11, 14, 15] กล่าวถึงความสามารถในการกระเจิงแสง (light – scattering ability) ของเม็ดสีว่าขึ้นอยู่กับค่าดรรชนีหักเหซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสาร ค่าดรรชนีหักเหยิ่งสูงความสามารถในการกระเจิงแสงยิ่งดี, ปริมาณเม็ดสี และขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของเม็ดสี ซึ่งขนาดอนุภาคที่เหมาะสมจะเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสงขาว (0.38 – 0.78) นาโนเมตร)

จากการศึกษาของ Yarbrough, D.W. และ Nachimuthu, R. ในปี 1994 [6] ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ผลการศึกษาพบว่า radiation-coating ที่มีส่วนผสมของไททาเนียมไดออกไซด์หรือ glass micro sphere จะให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่า 83 % ซึ่งให้ผลขัดแย้งกับการศึกษาของ U.S. Department of Energy (DOE) [8] ที่พบว่าเม็ดเซรามิกส์ที่เติมเข้าไปไม่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบที่ได้ แต่มีผลต่อค่าการคายความร้อนของผิวเคลือบ

Brockes, A. [16] และ Chromey, F.C. [17] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการกระจายตัวของเม็ดสีกับสมบัติของสีที่ได้รวมทั้งความทึบแสงและการโปรงแสง โดยใช้ Mie scattering theory [16] พบว่าเม็ดสีจะเกิดการดูดกลืนแสงที่มีขนาดต่ำสุดประมาณ 0.1 ไมโครเมตร และจะดูดกลืนแสงได้ดีที่สุดเมื่อมีขนาด 0.05 ไมโครเมตร นอกจากนี้แล้วเม็ดสีจะมีค่าความทึบแสงสูงสุดเมื่อมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในช่วง 0.25 ไมโครเมตร ขนาดอนุภาคที่ลดลงทำให้ค่าความทึบแสงลดลง ความโปร่งแสงและ color strength เพิ่มขึ้น และขนาดที่ใหญ่ขึ้นก็จะทำให้ความทึบแสงลดลงเช่นกัน ผลแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Color strength และความทึบแสงกับขนาดอนุภาค [14]

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นเม็ดสีที่มีค่าดรรชนีหักเหและให้ความทึบแสงสูงสุด แต่เนื่องจากมีราคาสูงทำให้มีความพยายามที่ลดต้นทุนการผลิตโดยใช้สารอื่นมาทดแทนไททาเนียมไดออกไซด์ ในบทความของ Lilli Manolis Sherman [15] กล่าวว่าสามารถทดแทนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) และเคาลิน (kaolin) ผสมกันจะทำให้ได้ความทึบแสงเท่าเดิมแต่สารเคลือบที่ได้จะมีความสามารถในการต้านทานรังสีอัลตราไวโอ เลตลดลง

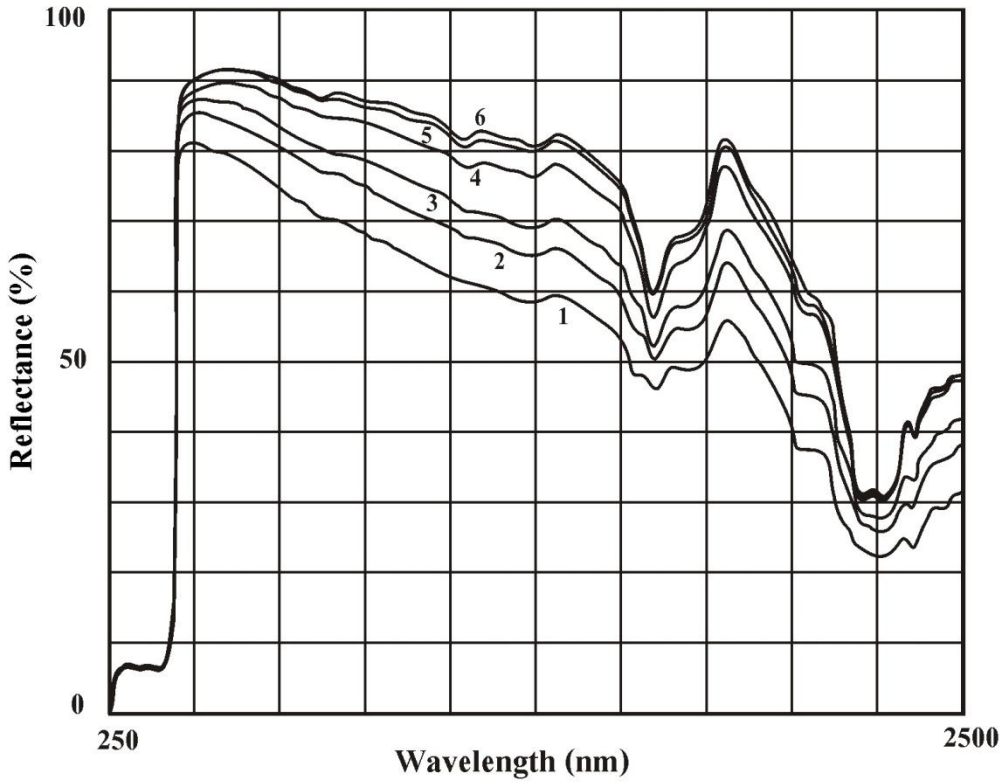
ค่าการบังแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดจาก diffuse reflectance โดยทำการวัดค่าการสะท้อนที่สเปกตรัมต่างๆ ในช่วงแสงที่ตามองเห็นและอินฟราเรด ของฟิล์มแห้งที่มีเม็ดสีอยู่ในสารยึดมาตรฐาน โดยทำการวัดค่าการสะท้อนแสงอินฟราเรดเมื่อเครื่องใช้สีขาวที่มีการสะท้อนสูง (R_w) และกรณีที่ใช้สีดำที่มีการดูดกลืนสูง (R_b) ข้อมูลที่แสดงสมบัติของเม็ดสี จะใช้ฟิล์มที่มีความหนา 75-88 ไมโครเมตร นำไปหาค่า contrast ratio (CR_{IR}) ที่ 800 นาโนเมตร จากสมการที่ 2.1

$$CR_{IR} = \frac{R_b}{R_w} \times 100 \qquad \text{..... (2.1)}$$

หากค่า R_w และ R_b ใกล้เคียงกันนั่นคือ CR_{IR} มีค่าสูง แสดงว่าค่าการบังแสงเกิดจาก Diffuse reflectance เป็นหลัก ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติดังนี้

2.5.3 ความหนาผิวเคลือบ

ในปี 2001 Hong-You Guo และคณะ [18] ได้ศึกษาอิทธิพลของความหนาต่อการสะท้อนของผิวเคลือบ โดยทำการทดลองด้วยสารเคลือบมาตรฐานที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ 17 % PVC ทำการปรับความหนาผิวเคลือบในช่วงระหว่าง 28 - 136 ไมครอน วัดค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ด้วยเครื่อง UV – 3100 recording spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250-2500 นาโนเมตร พบว่าค่าการสะท้อนของผิวเคลือบขึ้นกับความหนาของฟิล์ม ค่าการสะท้อนของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อความหนามากกว่า 134 ไมครอน ผิวเคลือบมีค่าสะท้อนถึง 93% และคงที่ ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.4 และตารางที่ 2.5 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากรังสีตกกระทบสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มบางๆได้ หากฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นค่าการส่งผ่านจะต่ำลงค่าการสะท้อนจะเพิ่มขึ้น และเมื่อฟิล์มหนาพอแสงจะไม่สามารถส่งผ่านได้อีกทำให้รังสีตกกระทบเกิดการดูดกลืนและสะท้อนกลับหมดอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเพิ่มความหนาพอ แสงจะไม่สามารถส่งผ่านได้อีกทำให้รังสีตกกระทบการดูดกลืนและสะท้อนกลับหมดอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเพิ่มความหนาไม่มีผลการสะท้อนรังสีต่อไป



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมสะท้อนที่ความหนาต่างกันของสารเคลือบที่ใช้เม็ดไททาเนียมไดออกไซด์ [18]

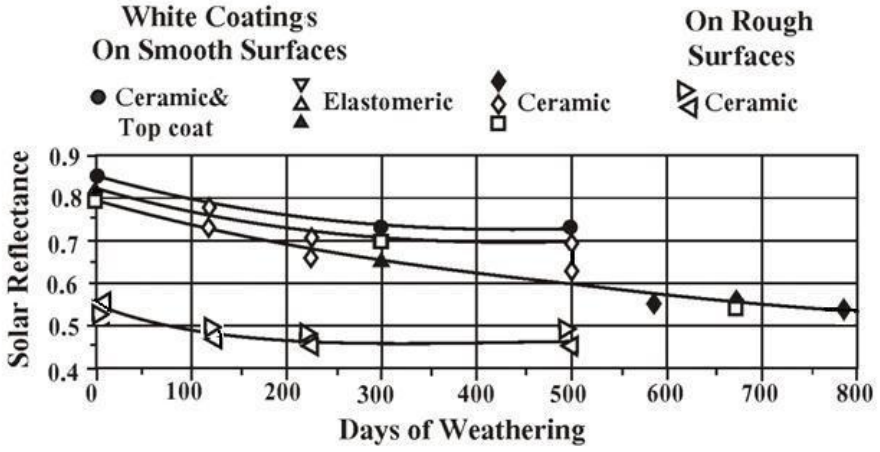
ตารางที่ 2.5 ค่าสะท้อนรังสีที่มีความหนาต่างๆ [18]

ลำดับ	ความหนา (μm)	ค่าสะท้อน
1	28	0.77
2	50	0.83
3	78	0.86
4	124	0.92
5	134	0.93
6	163	0.93

2.5.4 อายุการใช้งาน

วัสดุผิวเคลือบสะท้อนความร้อนที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงๆ (80% ขึ้นไป) ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีสีขาว ดังนั้นค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์จะมีค่าสูงเฉพาะในช่วงต้นของการใช้งานเท่านั้น เมื่อผ่านการใช้งานแล้ว การเกิดฝุ่นและสภาพอากาศ จะส่งผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบมีค่าลดต่ำลงถึง 50% [5]

ในช่วงเดือนกรกฎาคมปี 1996 ถึงเดือนตุลาคม ปี 1997 U.S. Department of Energy (DOE) [8] ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยน แปลงค่าการสะท้อนความร้อนเมื่อผ่านการใช้งานแล้วของ Radiation-control coating สำหรับผิวหลังคา ทำการทดสอบที่ Tyndall air Force Base (AFB) ในฟลอริดา โดยทาสารเคลือบลงบนหลังคาลักษณะต่างๆ แล้วนำไปรับแสงแดดบนดาดฟ้าอาคาร พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบมีค่าลดลง ผลแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 พฤติกรรมค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบสีขาวบนผิวเรียบและผิวขรุขระเมื่อผ่านการใช้งาน [5]

2.6 ตัวแปรที่มีผลต่อการต้านทานการเสื่อมสภาพ

ส่วนใหญ่การเสื่อมสภาพของผิวเคลือบชนิดเซรามิกส์มักจะไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นช้า แต่สำหรับพอลิเมอร์มักจะเสื่อมสภาพโดยรังสีอัลตราไวโอเลต ดังนั้นหากองค์ประกอบของสารเคมีมีความสามารถต้านทานรังสีอัลตราไวโอเลตก็จะสามารถต้านทานการเสื่อมสภาพของผิวเคลือบได้ มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาในกลุ่มของการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ดังนี้

2.6.1 สารยึด

จาก U.S. patent, Urbanek และ Thomas, w. [19] กล่าวไว้ว่า อะคริลิกพอลิเมอร์มีสมบัติเป็น UV blocking เนื่องจากสามารถนำมาใช้กั้นรังสีอัลตราไวโอเลตไว้ได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งรังสีนี้ เป็นสาเหตุหลักของการเกิดรอยแตกร้าวของผิวเคลือบบนหลังคา

2.6.2 เม็ดสีหรือสารเพิ่มเนื้อ

จากการศึกษา [19] แนะนำให้เติมไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งจัดว่าเป็นเม็ดสีชนิดหนึ่งลงในสารเคลือบผิวหลังคาเพื่อป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลตและช่วยสะท้อนความร้อน เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นสารกั้นอัลตราไวโอเลต (UV blocking agent)

2.6.3 สารเติมแต่ง

จาก U.S. patent, Seiner และ Jerome, A. [12] ได้กล่าวว่า สารเติมแต่งที่ใช้สำหรับป้องกันแสงอัลตราไวโอเลตได้แก่ UV blocking หรือ UV absorber ซึ่งเติมลงไปเพื่อช่วยกันแสงอัลตราไวโอเลตในกรณีที่สารยึดและเม็ดสีไม่สามารถป้องกันได้ หรือป้องกันได้แต่ไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ด้วย ตัวอย่าง UV blocking เช่น nakal silicate

ในปี 1998 Decker, C. และ Zahouily, K. [20] ได้ทำการทดสอบการเสื่อมสลายของ themoset acrylate (TSA) และ UV-cured acrylate coating (PUA) จากการเกิด photo degradation และ photo oxidation โดยนำเข้าเครื่องเร่งสภาวะด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (QUA-A) ในโครงสร้างของ PUA มีสายโซ่ยูรีเทน ซึ่งไวต่อ photo degradation แต่ก็ยังมีความต้านทานต่อสภาสะเร่งได้ดีกว่า TSA ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสารทั้งสองด้วย hydroxyphennel-s-triazine และ HALS radical scavenger ผลจากการเติมทำให้สามารถคงสภาพได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสายโซ่เมื่อมีการทำ UV-cured เป็นเวลา 2000 ชั่วโมง และยังเป็นการปรับปรุงความต้านทานต่อการเร่งสภาวะด้วยแสงอัลตราไวโอเลต และไอน้ำ

จากการศึกษาเบื้องต้นทางผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาถึงกระบวนการเตรียมผิวเคลือบที่มีสมบัติสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้มากกว่า 40 % สำหรับผิวเคลือบเซรามิกส์สีน้ำตาล ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ายังมีข้อบกพร่องของวัสดุด้านความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพน้อย เนื่องจากใช้สารยึดที่เป็นกลุ่มพอลิเมอร์ นอกจากนี้ออกไซด์ที่ให้สีและมีสมบัติสะท้อนรังสีอาทิตย์ยังมีข้อจำกัดด้านการใช้งาน จึงเป็นที่มาของการศึกษา สีน้ำตาลจากเฟอร์ริคออกไซด์ที่มีสมบัติสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อใช้ในวัสดุเคลือบเซรามิกส์

2.7 องค์ประกอบสารเคลือบ

องค์ประกอบของสารเคลือบผิวมีการแบ่งออกเป็นหลายประเภทแตกต่างกัน หากแบ่งตามลักษณะความต่อเนื่องในสารเคลือบสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่มใหญ่ๆ [21] ดังนี้

2.7.1 ส่วนของสิ่งนำสี (vehicle)

ส่วนของสิ่งนำสี เป็นองค์ประกอบที่มีลักษณะต่อเนื่อง (continuous phase) ได้แก่

2.7.1.1 สารยึด (binder) ได้แก่สารประกอบทางเซรามิกส์หรือสารประกอบที่ใช้ทำวัสดุเคลือบ ซึ่งประกอบไปด้วย เฟลด์สปาร์(feldspar) แคลเซียมคาร์บอเนต(calcium carbonate) ซิลิกา (silica)และ เคลย์(clay) ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะช่วยยึด pigment ได้เป็นอย่างดี ในกลุ่มของพอลิเมอร์หรือเรซินต่าง ๆ มีหน้าที่ยึดอนุภาคของสารประกอบในสารเคลือบไว้ด้วยกันให้เกิดเป็นฟิล์ม ติดแน่นกับผิวที่ถูกเคลือบ ตัวอย่างของสารยึดที่เป็นพอลิเมอร์ ได้แก่ อัลคิดเรซิน (alkyd) อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) อะคริลิคเรซิน (acrylic resin) สไตรีนเรซิน (styrenesin) และ พอลิไวนิลแอซิเตรต (polyvinyl acetate)

2.7.1.2 ตัวทำละลาย (solvent) หรือสารเจือจาง (diluent) มีหน้าที่ช่วยปรับความหนืดของสารเคลือบ เพื่อให้เหมาะสมต่อการผลิต หรือสะดวกต่อการใช้งาน สำหรับเคลือบเซรามิกส์ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

2.7.2 เม็ดสี (pigment)

เม็ดสีในที่นี้หมายรวมถึงทุกองค์ประกอบที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (discontinous) ในเนื้อสารเคลือบเป็นอนุภาคของสารอนินทรีย์ มีหน้าที่ให้สีหรือให้กำลังซ่อนแสง (hiding power) ทำให้เกิดการทึบแสง (opacity) มักใช้เพื่อความสวยงาม ตัวอย่างเช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (titaniumdioxide) ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide), ไชนาเคลย์ (china clay), แบเรียมซัลเฟต (barium sulphate), หรือสารประกอบอื่นๆที่ทำหน้าที่ให้สี

เม็ดสีมีหน้าที่หลักในการให้สี และความทึบแสง เพื่อความสวยงาม ป้องกันผิวหน้า และประโยชน์อื่น ๆ ตามการนำไปใช้งาน ซึ่งหากจัดประเภทของเม็ดสี ก็สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เม็ดสีหลัก (primary pigment) และเม็ดสีเอกซ์เทนเดอร์ (extender) หรือสารเพิ่มเนื้อ ประเภทของเม็ดสีที่จัดแบ่งตามค่าดรรชนีหักเห เม็ดสีหลักจะมีค่าดรรชนีหักเหสูงกว่าเม็ดสีเอกซ์เทนเดอร์ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ซึ่งค่าดรรชนีหักเหจะมีผลต่อสมบัติของผิวเคลือบดังจะได้กล่าวต่อไป

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าดรรชนีหักเหของเม็ดสีหลักและเม็ดสีเอกซ์เทนเดอร์ [21]

เม็ดสีเอ็กซ์เทนเดอร์	ค่าดรรชนีหักเห	เม็ดสีหลัก	ค่าดรรชนีหักเห
calcium carbonate	1.58	zinc oxide	2.01
china clay	1.56	zinc sulphide	2.37
talc	1.55	tianiumdioxide; anatase	2.55
barytes	1.64	titanium dioxid; rutile	2.76

2.8 สมบัติของเม็ดสี

สมบัติต่าง ๆ ของเม็ดสีที่ควรพิจารณามีดังต่อไปนี้

2.8.1 ธรรมชาติทางเคมี (chemical nature)

การเกิดสีของเม็ดสีเกิดจากการเลือกดูดกลืน (absorption) และการสะท้อน (reflection) ความยาวคลื่นในช่วง 0.4 ถึง 0.7 ไมครอน ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในช่วงแสงที่ตามองเห็น เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะของการดูดกลืนและการสะท้อนของเม็ดสี ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของการจัดเรียงอิเลคตรอนในโมเลกุลของเม็ดสีและพลังงานความถี่ของการสั่นธรรมชาติทางเคมีของเม็ดสี ยังเป็นสิ่งชี้ถึงสมบัติต้านทานต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความร้อน ตัวทำละลาย กรด อัลคาไลน์ และสารเคมีอื่นๆ

2.8.2 โครงสร้างผลึก (crystal structure)

เนื่องจากวัสดุบางชนิดสามารถมีโครงสร้างผลึกได้หลายแบบหรือที่เรียกว่าวัสดุพอลิมอ-ฟิค (polymorphic material) โครงสร้างผลึกบางรูปอาจจะเสถียรกว่า และบางรูปอาจเหมาะกับการใช้เป็นเม็ดสีมากกว่า ดังนั้นในการผลิตเพื่อให้ได้เม็ดสีที่ให้สีและประสิทธิภาพตามต้องการจึงจำเป็นต้องควบคุมรูปร่างและขนาดผลึก

2.8.3 รูปร่างอนุภาค (particle shape)

รูปร่างพื้นฐานของอนุภาคของเม็ดสีสามารถแบ่งออกเป็น 5 แบบ ได้แก่

2.8.3.1 ทรงกลม (spherical)

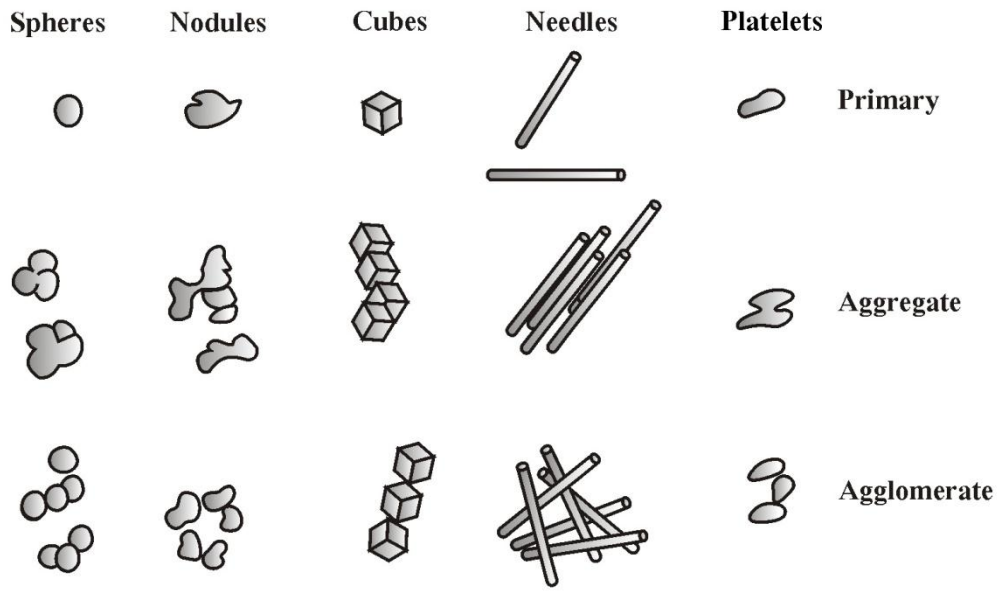
2.8.3.2 โนดูลาร์ (nodular) เป็นทรงกลมที่ผิวไม่เรียบ

2.8.3.3 ลูกบาศก์ (cubic)

2.8.3.4 รูปเข็ม (acicular or needle or rod-like)

2.8.3.5 แผ่น (lamellar or plate -like)

รูปและขนาดของเม็ดสีมีผลต่อการจัดเรียงตัวของเม็ดสีในเนื้อฟิล์มและในการผลิตเม็ดสีจะเกิดการรวมกัน (aggregate) หรือเกาะกันเป็นก้อน (agglomerate) ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการกระจายตัวของเม็ดสีดังจะได้กล่าวต่อไป รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นรูปร่างของเม็ดสี



รูปที่ 2.6 รูปร่างอนุภาคเม็ดสี [21]

2.8.4 ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาค (particle size particle size distribution)

ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาคแสดงถึงพื้นผิวเฉลี่ยของเม็ดสีและจำนวนอนุภาคเม็ดสีในหนึ่งหน่วยของเม็ดสี การรวมตัวและการเกาะกลุ่มกันของเม็ดสีจะทำให้เกิดการเพิ่มขนาดของอนุภาคเม็ดสี ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับความทึบแสง ตัวอย่างเช่น เม็ดสีขาวจะเกิดการกระเจิงแสง (scattering) มากขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคลดลงจนกระทั่งถึงค่าที่ดีที่สุด จากนั้นขนาดอนุภาคที่ลดลงจะทำให้ค่าการกระเจิงมีค่าต่ำลงจะเกิดการโปร่งใสมากขึ้น ดังนั้นอนุภาคต้องมีขนาดที่เหมาะสม

นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคยังส่งผลกับกำลังการผสม (tinting strength) และความเงา (gloss) ของผิวเคลือบที่ได้ โดยทั่วไปอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีกำลังการผสมสูง และขนาดอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความเงาลดลง แต่อาจมีเม็ดสีบางประเภทที่ให้ผลตรงข้าม

2.8.5 ดรรชนีหักเห (refractive index, RI)

ดรรชนีหักเหของวัสดุชี้ถึงประสิทธิภาพของเม็ดสี นั่นคือถ้าผลต่างระหว่างดรรชนีหักเหของเม็ดสีกับสารยึดมีค่ามากจะส่งผลให้มีค่าความทึบแสงสูง เนื่องจากค่าดรรชนีหักเหของเม็ดสีมีผลต่อการกระเจิงของแสง จากตารางที่ 2.6 พบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดรูไทล์มีค่าดรรชนีหักเหที่สูงเมื่อเทียบกับเม็ดสีอื่น ๆ ดังนั้นไททาเนียมไดออกไซด์ชนิดรูไทล์ จึงเป็นเม็ดสีที่ให้ความทึบแสงสูง

2.8.6 ธรรมชาติของผิวเม็ดสีและการเคลือบบนอนุภาคเม็ดสี (the nature of the pigment surface and coatings on the pigment particle)

ธรรมชาติของผิวเม็ดสีมีความสำคัญต่อการกระจายตัวของเม็ดสีในสารยึดและความมีเสถียรภาพของสารเคลือบที่เตรียมได้ โดยดูจากความมีขั้วของเม็ดสี หากเม็ดสีไม่มีขั้วและไม่เสถียรในสารเคลือบ จะต้องทำการเพิ่มสมบัติการมีขั้วให้กับเม็ดสีโดยการเคลือบด้วยสารอื่น เพื่อป้องกันการเกาะกันเป็นก้อนของเม็ดสีและปรับปรุงสมบัติการไหล

2.8.7 ลักษณะการกระจายตัว (dispersion characteristics)

กระบวนการกระจายเม็ดสี ถ้าการกระจายตัวของเม็ดสีไม่ดี เกาะกันเป็นก้อนทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่จะส่งผลให้การกระเจิงแสงลดลงส่งผลให้กำลังซ่อนแสง (hiding power) หรือความทึบแสงลดลงและยังส่งผลต่อความเงาของฟิล์มอีกด้วย [9, 10, 11, 21]

2.9 สารเคมีที่ใช้ในการผสม pigment

สารเคมีที่ใช้มีหลายชนิด สำหรับที่จะกล่าวต่อไปนี้คือสารประกอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวถึงสมบัติและการใช้งานของสารประกอบเหล่านั้นดังนี้

2.9.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นเม็ดสีที่ให้ความขาว ความสว่าง และให้ความทึบแสงเมื่ออยู่ในสิ่งนำสี การที่ให้ความขาวเนื่องจากตัวไททาเนียมไดออกไซด์สะท้อนแสงช่วงที่ตามองเห็นออกมาทั้งหมด ไททาเนียมไดออกไซด์จึงเป็นเม็ดสีที่ได้รับความนิยมใช้ในอุตสาหกรรมมาก เนื่องจากสมบัติที่ดีหลายประการดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

ไททาเนียมไดออกไซด์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

2.9.1.1 อะนาเทส (anatase) มีสมบัติดังนี้

- โครงสร้างเป็นเตตระโกนอล (tetragonal)
- ดรรชนีหักเห (refractive index) 2.55
- มีความขาวมาก
- มีแนวโน้มที่จะเกิดการเป็นฝุ่น (chalking) หากใช้งานภายนอก

2.9.1.2 รูไทล์ (rutile) มีสมบัติดังนี้

- โครงสร้างเป็น tetragonal
- ดรรชนีหักเห 2.76 ให้ความทึบแสงมากกว่า anatase
- สีที่ได้จะออกสีเหลืองเล็กน้อยหากเทียบกับ anatase
- ต้านทานการเกิดการเป็นฝุ่นหากใช้ภายนอก

2.9.1.3 brookite มีโครงสร้างเป็นออโธรอมบิค (orthorhombic) แต่ไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์เป็นเม็ดสี ไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกอยู่ 3 รูป โดยที่มีเพียง 2 รูปเท่านั้นที่เหมาะกับการใช้งานเป็นเม็ดสี ได้แก่ rutile และ anatase ซึ่ง rutile มีลักษณะโครงสร้างที่หนาแน่นกว่าและเสถียรกว่า anatase

ไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นเม็ดสีอนินทรีย์ที่มีเสถียรภาพสูง เฉื่อยต่อการเกิดต่อการปฏิกิริยากับน้ำ ตัวทำละลายอัลคาไลน์ กรดอินทรีย์ และอนินทรีย์ ไม่ละลายในส่วนผสมอื่น ทนความร้อน รักษาสภาพสีได้นาน

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นเม็ดสีที่ให้ความขาว ความทึบแสง และกำลังซ่อนแสงสูงสุด ซึ่งเป็นมาจากการที่ไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าดรรชนีหักเหสูงสุด และขนาดที่เหมาะในการกระเจิงแสงในช่วงแสงขาวคือประมาณ 1.25ไมโครเมตร [11, 14, 15, 21, 22] นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตได้ดีและสามารถป้องกันพอลิเมอร์ในฟิล์มซึ่งจะ

เสื่อมสภาพด้วยแสงอัลตราไวโอเลต ทำให้เพิ่มอายุการใช้งานของผิวเคลือบ [12, 19, 21] รูปที่ 2.7 แสดงเม็ดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 2.7 ไททาเนียมออกไซด์

2.9.2 ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2) [23, 24]

ซิลิกอน(Si) เป็นธาตุกึ่งโลหะอยู่ในหมู่ที่ IVA เป็นผลึกสีขาว-เทา มีโครงสร้างคล้ายเพชร เป็นธาตุที่มีในธรรมชาติมากเป็นอันดับสองรองจากออกซิเจนคือประมาณร้อยละ 25.67 โดยมวล ซิลิกอนไม่พบในรูปอิสระ มักพบในแร่ควอตซ์และทรายในรูปของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เรียกว่าซิลิกา (SiO_2)

ซิลิกอนเตรียมได้โดยนำซิลิกอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับถ่านโค้กให้ความร้อนในเตาไฟฟ้า จะได้ซิลิกอนบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 96-98 โดยมวล

ซิลิกาใช้เป็นวัสดุเบื้องต้นในการผลิตกระจก, แก้วน้ำและขวดแก้ว สายใยแก้วที่ใช้ในการโทรคมนาคมก็เป็นผลิตผลจากซิลิกาเช่นเดียวกันและยังใช้เป็นวัตถุดิบแรกเริ่มในผลิตผลิตภัณฑ์จำพวกเซรามิกส์เช่น เครื่องปั้นดินเผา, เครื่องลายคราม และการผลิตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์, ฟิลเลอร์สำหรับสี, พลาสติก, อีพ็อกซี, การทำกระจก, เครื่องสำอาง, การเก็บรักษาไม้และแม่พิมพ์โลหะ, สีรองพื้นและหน่วงเหนี่ยวน้ำเคลือบ เป็นต้น

เนื่องจากซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำจึงนำมาใช้ทำวงจรไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่นไมโครคอมพิวเตอร์ วิทยุ โทรทัศน์และใช้ทำเซลล์สุริยะ ซิลิกาใช้ทำแก้ว ทำส่วนประกอบของนาฬิกาควอตซ์ หากเป็นรูปซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ใช้ทำเครื่องสับ เครื่องบด เครื่องโม่ หากอยู่ในรูปซิลิกาเจลใช้ดูดความชื้น ใช้เป็นตัวดูดซับในการแยกสารโดยวิธีโครมาโทกราฟี ในรูปซิลิเกตใช้ทำเครื่องปั้นดินเผา เส้นใยนำแสง และในรูปซิลิโคนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของซิลิกอนเป็นสารที่ไม่รวมตัวกับน้ำ ไม่นำไฟฟ้า ทนความร้อนและไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า และใช้

เคลือบผิววัตถุเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เม็ดซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในรูปที่ 2.8

2.9.2.1 การใช้สารประกอบซิลิกอน

1) การก่อสร้างใช้ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา ในรูปของทรายและดินเหนียวเป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีตและอิฐ ใช้ในการผลิตซีเมนต์ อุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน อุตสาหกรรมการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่นกระเบื้อง อิฐมวลเบา ผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ เช่น ไม้เฌอร่า

2) เครื่องปั้นดินเผา/เครื่องเคลือบ ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นสารที่ทนต่อความร้อนได้ดีที่ใช้ในการผลิตอุณหภูมิสูงและสารประกอบซิลิเกต ใช้ในการผลิตเครื่องเคลือบและเครื่องปั้นดินเผา

3) กระจก ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์จากทรายเป็นส่วนประกอบหลักของกระจก กระจกสามารถทำเป็นรูปต่างๆ ได้มากมายและมีสมบัติกายภาพที่แตกต่างกัน ซิลิกอนได-ออกไซด์เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตกระจกหน้าต่าง บรรจุภัณฑ์ ฉนวน และอื่น ๆ

4) วัสดุขัดถู ใช้ซิลิกอนคาร์ไบด์เป็นหนึ่งในสารขัดที่มีความสำคัญที่สุด ใช้ขัดหรือตัดวัสดุที่มีความแข็งเช่นใช้ในอุปกรณ์การแพทย์ หรือใช้ตัดกระเบื้องปูพื้น เป็นต้น

5) วัสดุทางการแพทย์ ใช้ในรูปซิลิโคนเป็นสารประกอบที่ยืดหยุ่น มีพันธะซิลิคอน-ออกซิเจน และ ซิลิกอน-คาร์บอน และใช้กันอย่างกว้างขวางเช่น ซิลิโคนเสริมหน้าอกและคอนแทคเลนส์ รวมถึงการประยุกต์ใช้อื่น ๆ ด้วย

2.9.2.2 การใช้ซิลิกอนและโลหะผสม

1) การประยุกต์ใช้ซิลิกอนบริสุทธิ์ที่มีมากที่สุด คือการผสมกับอะลูมิเนียมเพื่อหล่อทำชิ้นส่วนรถยนต์ (ร้อยละ 55 ของการใช้ทั่วโลก)

2) การประยุกต์นำซิลิกอนบริสุทธิ์ที่มีมากเป็นอันดับ 2 คือใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตซิลิโคน (ร้อยละ 40 ของการใช้ทั่วโลก)

3) ซิลิกอนบริสุทธิ์ใช้ผลิตซิลิกอนบริสุทธิ์พิเศษสำหรับการประยุกต์ทางอิเล็กทรอนิกส์

4) สารกึ่งตัวนำ ซิลิกอนบริสุทธิ์พิเศษสามารถผสม (doping) กับธาตุอื่นเพื่อเปลี่ยนผลสนองทางไฟฟ้า โดยควบคุมจำนวน และประจุ (บวกหรือลบ) ของตัวนำไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นสำหรับทรานซิสเตอร์ เซลล์สุริยะ เครื่องตรวจจับ (semiconductor detectors) และอุปกรณ์กึ่งตัวนำอื่น ๆ ที่ใช้ในอิเล็กทรอนิกส์

5) โฟโตนิกส์ ซิลิกอนสามารถใช้เป็นรามานเลเซอร์ (raman laser) เพื่อ

ผลิตแสงความถี่เดียว (coherent light)

6) แอลซีดีและเซลล์สุริยะ ซิลิกอนอสัณฐานที่ผสมไฮโดรเจนใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ราคาต่ำ เช่น ใน แอลซีดี และยังอาจนำไปใช้ในเซลล์สุริยะแบบฟิล์มบางที่มีพื้นที่ใหญ่ๆ ได้

7) เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ ซิลิกอนเป็นสารประกอบสำคัญของเหล็กกล้าบางชนิดและใช้ในการผลิตเหล็กหล่อโดยใส่เป็นโลหะผสมเหล็กและซิลิกอน หรือ ซิลิกอนกับแคลเซียม

รูปที่ 2.8 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

2.9.3 อะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide, Al_2O_3) [25, 26]

aluminium oxide มีสูตรทางเคมี เป็น Al_2O_3 มักเรียกว่าอะลูมินา (alumina) อะลูมินาจะพบในรูปแอลฟา (α) แกมมา(γ) และ เบต้า (β) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ อัลฟาอะลูมินาและแกมมาอะลูมินา ในอุณหภูมิที่ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส อะลูมินาจะอยู่ในรูปแกมมา หากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง 1,150-1,200 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนอยู่ในรูปของอัลฟา แต่ เบต้าอะลูมินา จะอยู่ในรูปของสารประกอบโซเดียมคือ sodium aluminate ($Na_2O{\bullet}11Al_2O_3$) อลูมินาที่มีโครงสร้างผลึกแบบอัลฟา เป็นเฟส (phase) ที่มีความแข็งแรงสูงที่สุดโดยเฉพาะ hexagonal alpha เป็นตัวที่เสถียรมากที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากผลึกมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีค่าความหนาแน่นสูง อลูมินามักพบในรูปของไฮเดรต (hydrate) คือผลึกของอะลูมินามีการรวมตัวทางเคมีกับน้ำ เช่น แร่บอกไซท์ (bauxite, $Al_2O_3{\bullet}2H_2O$) ซึ่งประกอบด้วยแร่ที่สำคัญ 3 ชนิด คือจิบไซท์ (gybbsite, $Al_2O_3{\bullet}3H_2O$), ไดอะสปอร์ (diaspore, $Al_2O_3{\bullet}H_2O$), โบรไมท์ (bromite, $Al_2O_3{\bullet}H_2O$) อะลูมินามีจุดหลอมเหลวสูง (2030 องศา

เซลเซียส) มีความทนไฟสูง จึงนำไปใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ เบ้าหลอมหัวเทียน และแผ่นรองวงจรไฟฟ้า วัสดุในเตาเผาและเตาหลอม ทำให้สามารถผลิตอะลูมินาที่หลอมตัวเป็นเนื้อแก้ว มีความโปร่งแสงได้ดี ซึ่งใช้ประกอบกับอุปกรณ์ทำโคมไฟ และได้มีการนำอะลูมินามาเป็นส่วนผสมในเนื้อดินทำผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ (tableware, sanitary ware) อะลูมินาบริสุทธิ์มีความถ่วงจำเพาะ 3.4 - 4.0 ความแข็ง (Mohs scale) เท่ากับ 9 จึงมีความต้านทานต่อการขัดสีและสึกหรอสูง ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (abrasive) การใช้งานของอะลูมินาจึงกว้างขวางใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท โดยใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์สมัยใหม่ เช่นอุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์กึ่งตัวนำไฟฟ้า อุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้า อุปกรณ์ส่วนประกอบในจรวด เครื่องมือตัดแต่ง อุปกรณ์ทางการแพทย์ อวัยวะเทียม เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เป็นต้น อะลูมินาที่นำมาใช้ในเซรามิกส์สมัยใหม่นั้นจะใช้ทั้งที่เป็นเม็ด เป็นผลึกเดี่ยว เป็นฟิล์มบาง เป็นเส้นใยและที่เป็นรูพรุน โดยเม็ดอะลูมินาเป็นที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะเป็นวัตถุเริ่มต้นในการขึ้นรูปแบบต่างๆได้ดี ทั้งนี้เม็ดอะลูมินาที่นำมาใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงและมีความละเอียดมากเพราะสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของอะลูมินาสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการกำจัดสิ่งเจือปน (impurity) ต่างๆออกไป ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติของอะลูมินารวมทั้งมีผลต่อการเผาอบผนึก (sintering) สำหรับแคลเซียมที่ปนเปื้อนในอะลูมินามีผลทำให้สมบัติเชิงกลของอะลูมินาลดลงด้วย

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านเซรามิกส์สมัยใหม่ได้มีการวิจัยและพัฒนาปรับปรุงโครงสร้าง (microstructure) เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล นอกจากนี้อะลูมินายังสามารถทนต่อสารเคมี และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดีอีกด้วย อย่างไรก็ตามอะลูมินาก็มีผลเสียในบางกรณี เช่น อัตราการขยายตัวต่ำ เนื่องจากเมื่อผลึกอะลูมินาถูกเผาผ่านความร้อน จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปผลึก นอกจากนี้อะลูมินายังเป็นวัตถุดิบที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูง หากใช้ผสมในการผลิตจะทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์หลังการเผามีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และตามที่กล่าวข้างต้นว่าอะลูมินามีค่าความแข็งสูงทำให้การบดย่อยให้เป็นเม็ดละเอียดทำได้ค่อนข้างยาก

อะลูมินาที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตจากแร่บอกไซต์ โดยกระบวนการของเบเยอร์เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนและเปลี่ยนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นอะลูมินา อะลูมินาที่ผลิตได้ส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 90 ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโลหะอะลูมิเนียม ส่วนที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 10 นำไปใช้ในรูปของอะลูมินาโดยตรง รูปที่ 2.9 แสดงเม็ดอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 2.9 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

2.9.4 โครเมียมออกไซด์ (chromium oxide, Cr_2O_3) [27]

โครเมียมออกไซด์เป็นเม็ดสีที่ให้สีเขียว ใช้ในอุตสาหกรรมสีย้อม เซรามิกส์และพลาสติก มีสองรูปคือ chromic oxide (Cr_2O_3) และ hydrated chromic oxide (Cr_2O $(OH)_4$) ทั้งสองชนิดเสถียรต่อความร้อนและสารเคมี Cr_2O_3ไวต่อแสง ความร้อน กรดและด่าง สีไม่สดและมีความทึบแสงน้อย ความสามารถในการย้อม (staining power) มีน้อยเมื่อเทียบกับตะกั่วและซิงค์โครมกรีน (zinc chrom green) มักใช้ทำเม็ดสีสำหรับทา (paint) เนื่องจากให้เฉดสีไม่ฉูดฉาด ใช้ในการวาดภาพกาวน้ำและให้สีในซีเมนต์เพราะเสถียรต่อความเป็นด่าง นอกจากนี้ยังใช้ในงานเซรามิกส์ โดยให้สีเขียวอ่อนถึงเข้ม ขึ้นอยู่กับสารประกอบที่ผสม

โครเมียมออกไซด์มีการใช้ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง เนื่องจากสามารถสะท้อนเนียอินฟราเรดได้มากพอสมควร จึงใช้เป็นส่วนผสมของสีพราง ซึ่งจะปรากฏเป็นหญ้าและใบไม้ในภาพถ่ายอินฟราเรด [28 – 30]

hydrated chromic oxide ให้สีสว่างกว่าออกไซด์ปกติ ไวต่อแสงแต่มีความโปร่งใสและมีความสามารถในการย้อมต่ำ เสถียรต่อความร้อนได้ดีแต่ไม่ใช้ในอุตสาหกรรมสีเซรามิกส์ ต้านทานต่อด่างแต่ไม่ทนกรด มีราคาแพงกว่าออกไซด์ทั่วไป โครเมียมออกไซด์นิยมใช้เป็นเม็ดสีเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า viridian (สารประกอบจำพวกออกไซด์ของโครเมียมมีสีเขียวอมน้ำเงิน) มักใช้เป็นสีทา, สีผสมในหมึกและแก้ว [31] ในงานวิจัยนี้ใช้โครเมียมออกไซด์ที่มีผลวิเคราะห์เคมีประกอบด้วย Cr_2O_3 99.3%, SO_3 0.176%, Na_2O_3 0.143%, SiO_2 0.139%, Fe_2O_3 0.22% และAl_2O_3 0.02% ซึ่งลักษณะของผงโครเมี่ยมออกไซด์แสดงในรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)

2.10 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะท้อนความร้อน

ปัจจัยที่มีผลต่อการสะท้อนความร้อน คือการเลือก pigment การบด การกระจายตัวของอนุภาค การผสม และ สิ่งเจือปน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.10.1 การเลือก pigment

Pigment ที่มีความสามารถสะท้อนช่วง near infrared ต้องเลือกสำหรับการทำผิวเคลือบเท่านั้น โดยพื้นฐานแล้วควรพิจารณาเลือกเฉดสีซึ่งขึ้นอยู่กับค่า L* a* และ b* ของ pigment

2.10.2 การกระจายตัว (dispersion) [32]

pigment เข้ากันได้กับชนิดของตัวทำละลายและ การเคลือบที่ใช้น้ำเป็นตัวผสม เช่น อะคริลิค พอลิเอสเทอร์ และ ฟลูออโรพอลิเมอร์ สำหรับการกระจายตัวที่สมบูรณ์และสภาวะที่ดีที่สุด pigment ควรจะกระจายในตัวกลาง ทำให้บดง่าย ไม่ควรบด pigment มากเกินไปเพราะการบดทำให้อนุภาคแตก ซึ่งมีผลต่อสีและความสามารถในการสะท้อน near infrared

ประสิทธิภาพการกระจายตัวของ pigment มีความสำคัญต่อสภาวะที่ดีที่สุดของเฉดสี ความสะอาดและความใสของผิวเคลือบสุดท้าย โดยส่วนใหญ่ organic pigments มีความโปร่งใสได้ด้วยการปรับปรุงการกระจายตัว, inorganic pigments ให้ความขาวในกรณีที่มีอนุภาคขนาดใหญ่, การกระจายตัวที่ดีช่วยปรับปรุงความทึบแสง organic pigments กระจายตัวได้ดีกว่า inorganic pigments มี 4 หลักการที่ช่วยด้านการกระจายตัว ดังนี้

2.10.2.1 การทำให้ไม่จับตัวเป็นก้อน (deagglomeration) โดยใช้เครื่องจักรที่เกิดแรงเฉือน เพื่อบดซึ่งจะช่วยลดการจับกันเป็นก้อน ความหนืดที่ใช้ในการบดสูงทำให้เกิดแรงเฉือนสูง

2.10.2.2 ความสามารถเปียก (wetting) ของ pigment ตัวกลางที่ยึดเกาะระหว่างผิวของ pigment และพฤติกรรมเชื่อมต่อระหว่าง pigment กับตัวยึดเกาะ ความร้อนเกิดขึ้นในขั้นตอนการบดทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นในการผสม อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะช่วยลดความหนืดด้วย การลดประสิทธิภาพของการไม่จับกลุ่มกันของเม็ด ถูกสนับสนุนด้วยประสบการณ์และงานวิจัย

2.10.2.3 การกระจายตัวของ pigment ที่แพร่ไปในสารยึดเกาะ ซึ่งมักจะกระจายได้ดีในตัวกลางที่มีความหนืดต่ำ

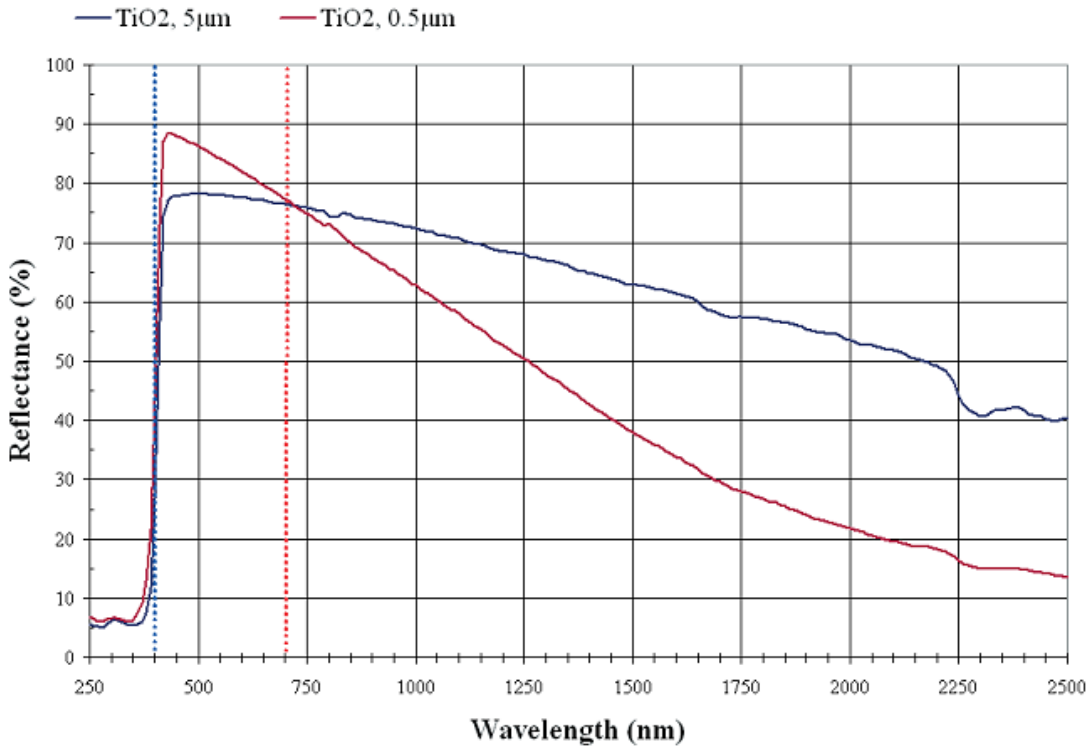
2.10.2.4 เสถียรภาพการขัดขวางการจับกลุ่มของ pigment มักจะถูกละเลยในขั้นตอนการผลิต ทฤษฎีซึ่งอธิบายเสถียรภาพนี้มีความซับซ้อน มีปัญหาเกิดขึ้นในขั้นตอนการละลายซึ่งมักพบว่าปัญหาจะน้อยลงหากทำการละลายอย่างช้าๆ

2.10.3 การผสม pigment

สูตรผสม pigment ที่มากกว่าหนึ่งชนิดต้องระมัดระวัง การผสม pigment ที่มีสมบัติสะท้อนอินฟราเรดสองชนิดสามารถเพิ่มค่าสะท้อนของผิวเคลือบได้ แต่บางกรณีอาจดูดกลืนในช่างความยาวคลื่นต่างกัน ค่าสะท้อนรวมที่ได้จึงน้อยกว่าค่าสะท้อนของ pigment เอง บางกรณีอาจเกิดการกระเจิง ดังนั้นการเลือกใช้ pigment ที่จะมาผสมเพื่อทำผิวเคลือบสะท้อนรังสีอินฟราเรดจึงต้องระวัง

2.10.4 ความทึบ (opacity)

ความทึบในช่วงอินฟราเรด (infrared, IR) เกิดขึ้นยากกว่าช่วงวิสิเบิล (visible) ความทึบเกิดจากการกระเจิงหรือการดูดกลืนของแสงก่อนที่จะเดินทางทะลุชั้นอื่นๆ การกระเจิงเกิดขึ้นเนื่องจากค่าดรรชนีการหักเหของวัสดุที่อยู่ติดกันมีค่าแตกต่างกัน เช่นระหว่างอนุภาค (particle) กับตัวกลาง (medium) ซึ่งขนาดของอนุภาคนั้นมีขนาดประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสง รูปที่ 2.11 เป็นกราฟแสดงสเปคตรัมสะท้อนช่วงวิสิเบิลและอินฟราเรดของ TiO_2 เมื่อทาลงบนชิ้นงานพื้นสีดำ แสดงให้เห็นว่าแสงปริมาณมากถูกดูดกลืนโดยพื้นสีดำในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด เส้นสีน้ำเงินในรูป 2.11 แสดงให้เห็นว่า TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่มีค่าสะท้อนที่ดีในช่วงอินฟราเรดกลาง-ไกล เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของ TiO_2ที่มีขนาดเล็ก



รูปที่ 2.11 TiO_2 เคลือบบนพื้นสีดำ [33]

2.10.5 การเจือปน (contamination)

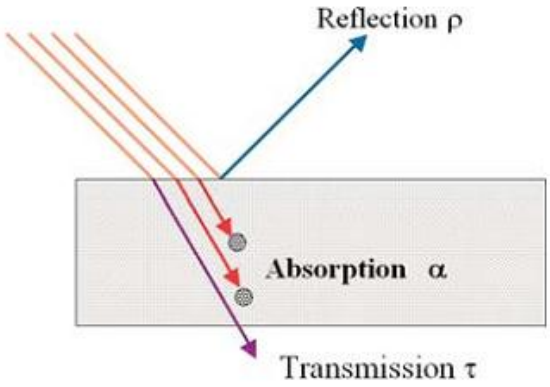
การเจือเกิดขึ้นจากการดูดกลืนของ pigment สะท้อนอินฟราเรดสองชนิดที่แตกต่างกันผสมเข้าด้วยกัน และยิ่งแย่ลงเมื่อ Pigment ที่มีสมบัติสะท้อนมารวมกับ pigment ที่มีสมบัติดูดกลืน การเจือที่รุนแรงส่งผลกระทบต่อค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์รวมของผิวเคลือบ

2.10.6 ขนาดของอนุภาค (particle size)

ขนาดของอนุภาคเป็นปัจจัยสำคัญ ความสามารถสะท้อนจะสูงที่สุดเมื่อขนาดของอนุภาคมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เช่นช่วงความยาวคลื่น 700 - 1100 nm ขนาดของอนุภาคอย่างน้อยควรมีค่า 0.35 - 0.55 ไมครอน นอกจากนั้นการบดและการกระจายตัวยังเป็นปัจจัยสำคัญด้วย

2.11 กลไกความร้อน

IR pigment ได้ถูกออกแบบมาเพื่อทำให้พื้นผิวเย็น รังสีอาทิตย์ที่กระทบวัตถุ แสงจะถูกดูดกลืน (absorbed, α), สะท้อน (reflected, ρ) หรือส่อนผ่าน (transmitted, τ) วัตถุนั้น แสดงในรูปที่ 2.13 แสงที่ตกกระทบประกอบด้วย 3 ส่วนแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสงตกกระทบบนวัตถุ [33]

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \qquad \text{..... (2.2)}$$

แสงที่ถูกดูดกลืนเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในก้อนวัตถุและทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การดูดกลืนของวัตถุไม่สามารถวัดได้โดยตรง วัดได้จากค่าสะท้อนและค่าการส่องผ่าน สำหรับวัสดุทึบแสงการส่องผ่านมีค่าเป็นศูนย์ สมการ (2.2) ค่า $\alpha + \rho = 1$, เพียงแต่เรากำหนดค่า ρ เท่านั้น มี pigment ที่ค่าการส่องผ่านไม่เป็นศูนย์ เช่นช่วงตามองเห็นของ cobalt blues แต่ในช่วงอินฟราเรดไม่สามารถมองเห็นด้วยตาของเรา จึงเป็นไปได้ที่ pigment บางส่วนโปร่งแสงแม้ว่าจะทึบแสงในช่วงที่ตามองเห็น

รังสีอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีนัยสำคัญซึ่งประกอบด้วยสเปคตรัมของยูวี, วิซิเบิลและอินฟราเรด ความเข้มของพลังงานเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ค่า ρ_λ E_λ คือพลังงานสะท้อนรวมของความยาวคลื่น หากเรารวมความยาวคลื่นทั้งหมด เราจะได้พลังงานสะท้อนรวม หากเราแบ่งความยาวคลื่นเป็นช่วงของพลังงานตกกระทบรวมก็จะได้ค่าสะท้อนเฉลี่ยโดยน้ำหนัก ρ ซึ่งอ้างอิงจากรังสีสะท้อนรวม สมการที่ 2.3 การส่องผ่านเป็นสมบัติที่เกิดขึ้นในวัตถุที่ไม่ทึบ การคำนวณรังสีสะท้อนรวมคำนวณจากรังสีโดยรวมซึ่งไม่ถูกดูดกลืนในวัตถุ จึงเป็นกุญแจสำคัญที่กำหนดความร้อนที่เพิ่มขึ้น

$$\rho = \frac{\int \rho_\lambda E_\lambda}{\int E_\lambda} \approx \frac{\sum \rho_\lambda E_\lambda}{\sum E_\lambda} \qquad \text{..... (2.3)}$$

2.12 สมบัติสะท้อนของวัสดุ

สมบัติทางแสงของสารเคลือบทำให้เกิดสี ความทึบ ความเงา และลักษณะที่ปรากฏให้เห็นแก่ผู้สังเกตนอกจากนี้ยังรวมไปถึงค่าความสามารถในการสะท้อนความร้อนซึ่งจะนำไปสู่การลดปริมาณพลังงานที่ใช้ระบบปรับอากาศอีกด้วย สมบัติทางแสงของผิวเคลือบที่ปรากฏตามที่กล่าวมานั้น เกิดขึ้นได้เนื่องจากสมบัติของคลื่นที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ สมบัติการสะท้อน สมบัติการหักเห และสมบัติการเลี้ยวเบน

pigment มีลักษณะทึบแสงเป็นเม็ดแห้ง เมื่อกระจายอยู่ในตัวกลาง pigment จะทึบทั้งที่อยู่ในสารอินทรีย์ และอยู่ในของเหลว แม้ว่า ความทึบ และอนุภาคของสีสามารถจะเปลี่ยนได้ แต่บางทีก็จะโปร่งใสตัวกลางอินทรีย์ (organic media) และทึบในตัวกลางที่เป็นของเหลว

ความทึบแสงของ pigment เป็นฟังก์ชันของมุม ซึ่งแสงตกกระทบแล้วกระเจิง (scatter) ออกจากพื้นผิว ซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าดรรชนีการหักเห (refractive index) ระหว่าง เม็ดสี (pigment) และ การกระจายของตัวกลาง (dispersion medium) ค่าดรรชนีหักเหของอากาศมีค่า 1.00 ของเรซิน 1.55 ในตารางที่ 2.8 แสดงค่าดรรชนีหักเหของเม็ดสีขาว (white pigment) และสารผสม (extenders)

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าดรรชนีหักเหของวัสดุ

วัสดุ		ดรรชนีหักเห
White Pigment	Titanium dioxide (rutile)	2.71
	Titanium dioxide (anatase)	2.55
	Zinc sulphide	2.37
	Zinc oxide	2.08
	White lead	2.09
Extenders	Whiting	1.58
	Silica	1.55
	Talc	1.49
	Magnesium carbonate	1.57

การหักเหของ white pigments ที่แสดงในตารางที่ 2.8 แตกต่างจากน้ำ (1.33) และตัวกลางสารอินทรีย์ ซึ่งทึบในทุกตัวกลาง white pigments ทั่วไปให้ค่าการสะท้อน และการกระเจิง

แสงที่ตกกระทบ แต่ pigment สีดำสามารถดูดกลืนไว้ (absorb) การสะท้อน (reflection) ของ pigment สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.4

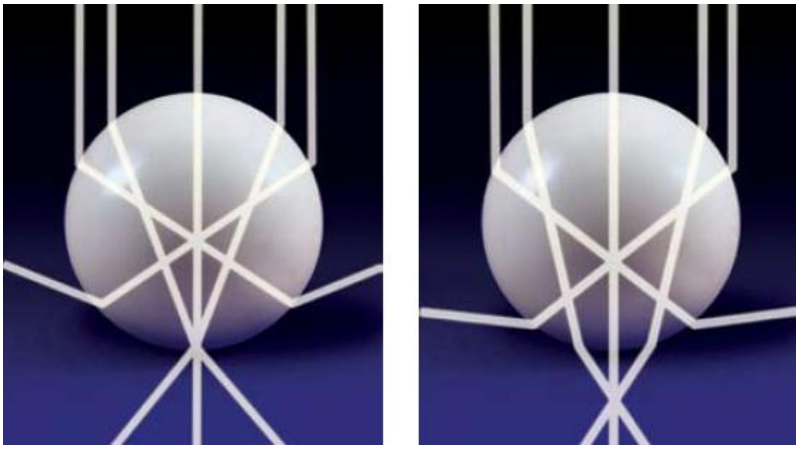
$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \qquad \text{..... (2.4)}$$

เมื่อ R = reflectivity of film,

n_1 = refractive index of Pigment,

n_2 = refractive index of binder

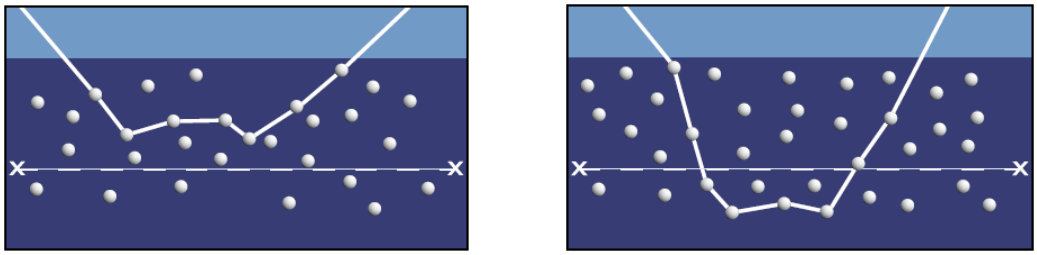
สมบัติการหักเห (refraction) การหักเหของคลื่นเกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ซึ่งคลื่นมีความสามารถในการเคลื่อนที่ในตัวกลางทั้งสองไม่เท่ากัน เนื่องจากตัวกลางทั้งสองมีค่าดรรชนีหักเหไม่เท่ากัน หรืออาจกล่าวว่าเนื่องจากความเร็วของคลื่นในสองตัวกลางต่างกัน ทำให้คลื่นเกิดการหักเห หากพิจารณาลักษณะการหักเหที่เกิดขึ้นบนอนุภาคเดี่ยว ตามรูปที่ 2.13 พบว่าอนุภาคทรงกลมที่มีค่าดรรชนีหักเหสูงกว่าจะเกิดการกระเจิงแสงได้มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคที่มีค่าดรรชนีหักเหแตกต่างจากตัวกลางมากกว่า จำทำให้เกิดการโค้งงอของแสงได้มากกว่า



(a) (b)

รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบการหักเหของแสงโดยอนุภาคที่มีค่าดรรชนีหักเหต่างกัน, (a) อนุภาคที่มีค่าดรรชนีหักเหสูง และ (b) อนุภาคที่มีค่าดรรชนีหักเหต่ำ [34]

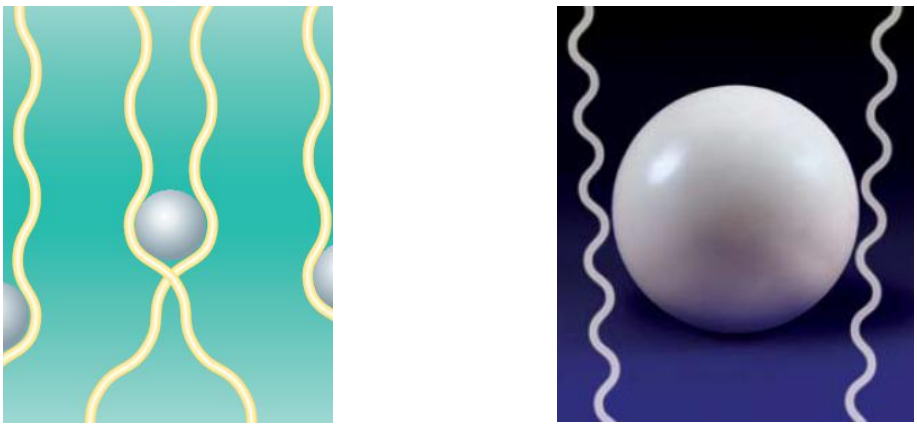
จากรูปที่ 2.13 หากนำอนุภาคหลาย ๆ อนุภาคไปใส่ในสารยึดหรือตัวกลางใดๆ แล้วพิจารณาลักษณะการหักเหที่เกิดขึ้นในเนื้อฟิล์มจะพบว่า เส้นทางการเดินทางของแสงในฟิล์มที่บรรจุอนุภาคที่มีค่าดรรชนีหักเหสูงกว่าจะมีระยะทางที่สั้นกว่าฟิล์มที่บรรจุอนุภาคที่มีค่าดรรชนีหักเหต่ำ ปรากฏดังรูปที่ 2.14



(a) (b)

รูปที่ 2.14 เส้นทางเดินของรังสีในตัวกลางที่มีค่าดรรชนีหักเหต่างกัน, (a) ค่าดรรชนีหักเหสูง และ (b) ค่าดรรชนีหักเหต่ำ [34]

สมบัติการเลี้ยวเบน (diffraction) การเลี้ยวเบนของคลื่นเกิดจากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางหรือวัตถุใดๆ ในที่นี้หมายถึงอนุภาคที่อยู่ในผิวเคลือบ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านวัตถุจะทำให้เกิดการโค้งงอของคลื่น วัตถุที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดการโค้งงอของแสงน้อยมากจนมองไม่เห็น จากรูปที่ 2.15 เป็นภาพแสดงลักษณะการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นกับอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน จากรูปพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเกิดการเลี้ยวเบนมากกว่าเนื่องจากการเกิด electromagnetic resonance ระหว่างอนุภาคกับคลื่น



(a) (b)

รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบการเลี้ยวเบนของคลื่นไฟฟ้ารอบอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน, (a) อนุภาคเล็ก และ (b) อนุภาคใหญ่ [34]

สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (coefficient of absorption, K) และ สัมประสิทธิ์การกระเจิง (coefficient of scatter, S) มีความสัมพันธ์กันตามสมการ Kubelka – Munk แสดงในสมการที่ (2.5) โดย ค่า S ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ, อัตราส่วนของดรรชนีการหักเหของ pigment และตัวกลาง, ขนาดของอนุภาคและการกระจาย (distribution), มุมกระจายและปริมาณของ pigment โดยมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าลดขนาดของอนุภาค ค่า S ลดลงในขณะที่ความทึบของ pigment ลดลง ตัวอย่าง เช่น red iron oxide (Fe_2O_3) เป็น pigment ที่มีสมบัติทึบที่ดีในช่วงขนาดอนุภาคปกติ ขนาดของอนุภาคสามารถลดมุม ซึ่งมีผลให้ฟิล์มโปร่งใส เมื่อ pigment นั้นกระจายอยู่ในตัวยึดเกาะสี (paint binder) ดังความสัมพันธ์ในสมการ 2.5 [35]

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad \text{..... (2.5)}$$

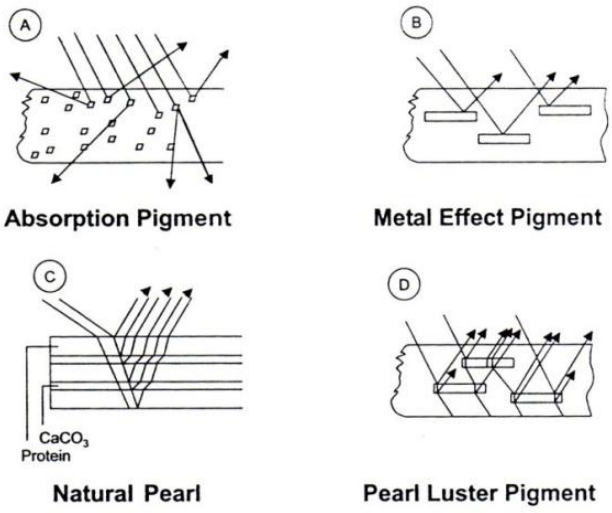
เมื่อ K = coefficient of absorption,

S = coefficient of scatter

R = reflectance of film at maximum opacity, i.e. when the opacity no longer increases with thickness

2.13 Pigment ที่มีความสามารถสะท้อน

เมื่อแสงตกกระทบไปยังวัตถุเกิดอันตรกิริยา (interactions) ทำให้เรามองเห็นลักษณะเฉพาะของวัตถุแตกต่างกันไป ในทางเซรามิกส์ก็เหมือนกัน วัสดุเซรามิกส์ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เช่น inorganic materials หรือ pigment สมบัติของวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกันทำให้เกิด interaction แตกต่างกันไป แล้วแต่ชนิดของวัสดุที่จะแสดงสมบัติใด ดังรูปที่ 2.16 แสดงสมบัติทางแสงของ pigment



รูปที่ 2.16 สมบัติเชิงแสงของ pigment และมุกธรรมชาติ [36]

2.14 สมบัติสะท้อนของสารประกอบอื่น

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงสารประกอบอนินทรีย์อื่นๆ ที่มีสมบัติสะท้อนดังนี้

2.14.1 titanate pigment

titanate ประกอบไปด้วย titaniumdioxide เป็นส่วนประกอบหลักแสดงรูปผลึกมี 2 ชนิด คือ rutile และ spinel ซึ่งบางครั้งมีส่วนประกอบอื่นเล็กน้อย

rutile titanate ที่ใช้ทางการค้า คือ chromium antimony titanate มีสีเหลือง (brown 24) ใช้ในวงอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง รองลงมาเป็น nickel antimony titanate (yellow 53), manganese antimony titanate (yellow 164) rutile ที่ผสมอยู่กับ titanate มีประมาณ 70 – 90 % TiO_2 โดยน้ำหนัก โลหะทรานซิชัน Ni(II), Cr(III), และ Mn(III) เป็นตัวทำให้เกิดสี ขณะที่สารให้สีน้อยๆ คือ Ti(IV), Sb(V), Nb(V), และ W(VI) ซึ่งสามารถให้สีได้ตั้งแต่สีเหลืองอ่อนไปจนถึงสีน้ำตาลเข้ม

spinel titanates โครงสร้างของ spinel คือ M_3O_4 (M คือNi(II), Co(II), Zn(II), Fe(II)) มักจะพบ +2 metal oxide กับ TiO_2

cobalt titanate สีเขียว ซึ่งเกิดจาก Zn(II) และ Ni(II) ซึ่งให้สีเขียวอ่อน สีเขียวยังได้จาก chromium (III) oxide cobalt titanate มักจะใช้เพื่อการให้สีอ่อน – สว่าง บางครั้งให้สีฟ้า และมีราคาแพงกว่าชนิดอื่น

2.14.2 cobalt aluminates

เมื่อ cobalt (II) oxide รวมกับ aluminium oxide ในโครงสร้าง spinel จะให้ cobalt aluminate Spinels ให้สีฟ้า $CoAl_2O_4$ (blue 28), lithium และ titanium ให้สีฟ้าแบบเทอร์คอยส์ cobalt

aluminate ให้สีฟ้าที่คงทน และให้สีคงที่ได้ดีเมื่อสัมผัสความร้อนดูดกลืนรังสี UV ได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับสีอื่นแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 สารประกอบอลูมิเนต โครไมท์และเฟอร์ไรท์ [37]

Chemical Type	**C.I. Pigment**	**Color**	**Crystal Type**
CoAl	Blue 28	Blue	Spinel
CoCrAl	Blue 36	Blue-green to teal green	Spinel
CoCr	Green 26	Dark green	Spinel
ZnFe	Yellow 199	Yellow-brown	Spinel
	Brown 31	Yellow-brown	Spinel
MgFe	Brown 11	Red-brown	Spinel
ZnCrFe	Brown 33	Brown	Spinel
FeCr	Green 17	Brown-black	Hematite/corumdum
	Brown 29		
FeCr	Brown 35	Brown- black	Spinel
CuCrFe	Black 23	Black	Spinel
FeMn	Black 26	Black	Spinel
CoCrFe	Black 27	Black	Spinel
CuCr	Black 28	Black	Spinel
CoFe	Black 29	Black	Spinel
NiCrMn	Black 30	Black	Spinel

2.14.3 cobalt chromium aluminate

aluminum oxide ใน cobalt aluminate ใช้แทน chromium (III) oxide ซึ่งให้สีเขียว การผสม cobalt chromium aluminate ให้สีฟ้า – เขียว (blue 36) ซึ่งมีสูตร คือ $Co(Al_x , Cr_{1-x})_2O_4$ เมื่อ x มีค่าตั้งแต่ 0 – 1 pigment เหล่านี้สามารถใช้ร่วมกับ Zn, Mg และ Ti ในการให้สีเขียว – ฟ้า และสีเขียวหัวเป็ด cobalt chromium aluminate คงทนต่อความร้อน และสภาวะอากาศ ให้ความทึบแสงต่อรังสี UV ได้ดีกว่า pigment blue 28

2.14.4 black

black chromite และ ferrite มี 3 ชนิด ทั้งหมดมีโครงสร้างผลึกแบบ spinel

black chromite & ferrite +	Cu	ให้สีดำ	ได้แก่	black 23, black 26, black 28
black chromite & ferrite +	Co	ให้สีดำ	ได้แก่	black 27, black 29
black chromite & ferrite +	Ni	ให้สีดำ	ได้แก่	black 30

copper chromite blacks (black 28) เป็น spinel ได้จาก copper(II) oxide และ chromium(III) oxide ให้สีเขียว มีสูตร คือ $CuCr_2O_4$ โครงสร้างเป็นลูกบาศก์บิดไปเล็กน้อย สีคงทน สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 1,000 C^O ดูดกลืน UV ได้ดี

cobalt black นิยมใช้มาก มีสูตร คือ $(Co_x , Fe_{1-x}) M_2O_4$ เมื่อ x = 0 – 1 M = Fe, หรือ Cr + Fe

nickel black มีสูตร คือ $(Ni_y ,Fe_{1-y})(Fe_x ,Cr_{1-x})_2O_4$ เมื่อ x และ y = 0 – 1 เป็นเกรดทางการค้า คงทนต่อความร้อนมากกว่า copper black แต่ไม่ทนความร้อนเท่า cobalt black nickel black ให้สีออกทางโทนสีน้ำตาล เมื่อเปรียบเทียบกับสีดำชนิดอื่น [37, 38]

2.15 การแผ่รังสีอาทิตย์

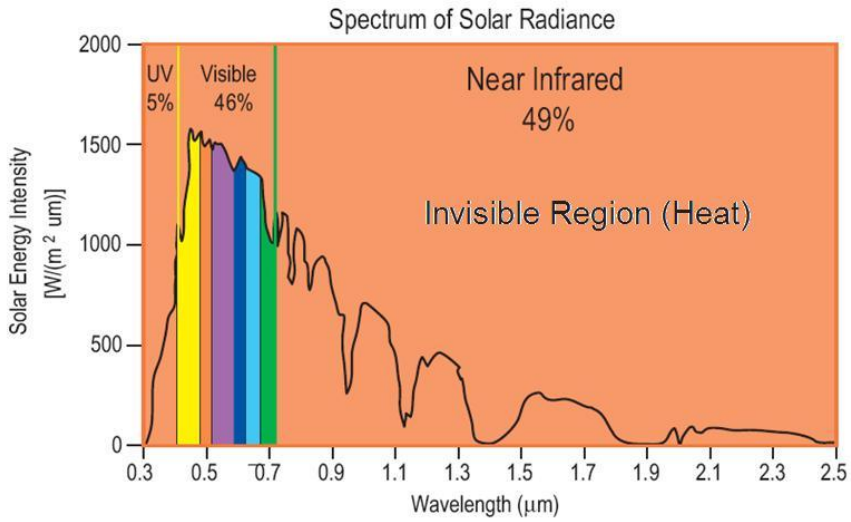
รังสีอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวคลื่นกว้าง พลังงานถูกดูดกลืนในชั้นบรรยากาศและไม่ทะลุไปถึงผิวของโลก รังสีอาทิตย์ที่ส่องมายังผิวโลกอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 259-2500 นาโนเมตร เม็ดสีสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ในช่วงความยาวคลื่นนี้ รังสีอาทิตย์ที่ส่องมายังผิวโลกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง อุลตราไวโอเลต(ultraviolet), ช่วงวิสิเบิล (visible) และช่วงอินฟราเรด (infrared)

ช่วงอุลตราไวโอเลต(ultraviolet, UV) คือช่วงความยาวคลื่น 295-400 นาโนเมตร มีประมาณ 5% ของรังสีอาทิตย์ที่ส่องมายังผิวโลก UVเป็นชื่อของสเปกตรัมที่ประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความถี่สูงกว่ามนุษย์แยกแยะ ซึ่งเป็นสีม่วง แสงช่วงนี้มีพลังงานสูงที่สามารถทำลายพันธะทั่วไปของพอลิเมอร์ การเสื่อมสภาพของตัวยึดเกาะของผิวเคลือบเกิดจากระดับพลังงานนั้นเพียงพอที่จะทำลายพันธะปฐมภูมิ (primary bond) รังสี UV มีทั้งประโยชน์และโทษต่อสุขภาพมนุษย์

ช่วงวิสิเบิล คือช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรเป็นช่วงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าซึ่งสายตามนุษย์ มองเห็นช่วงใน 380-750 นาโนเมตร พลังงานประมาณ 50% เกิดขึ้นในช่วงนี้ เม็ดสีเลือกดูดกลืน UV และสะท้อนที่เหลือออกไป วัตถุสีขาวสะท้อนช่วงความยาวคลื่นนี้ออกหมด วัตถุที่มีสีจะดูดกลืนและสะท้อนแต่ละสีไม่เหมือนกัน สีเขียวดูดกลืนทุกช่วงความยาวคลื่น ที่เห็นเป็นสีเขียวก็เพราะสะท้อนเฉพาะแสงสีเขียวออกมา สีดำดูดกลืนและไม่สะท้อนในช่วงความยาวคลื่น UV ช่วง UV เป็นช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นสี

ช่วงอินฟราเรด (infrared) คือช่วงความยาวคลื่น 700-2500 นาโนเมตร อินฟราเรดทำให้เรารู้สึกร้อน ความร้อนเกิดขึ้นหลังจากรังสีอินฟราเรดกระทบวัตถุ ช่วงอินฟราเรดที่ให้ความร้อนคือ

700-1100 นาโนเมตร ถ้าวัตถุดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นนี้มีผลทำให้ความร้อนที่ผิวสูงขึ้น การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.17 [39-41]



รูปที่ 2.17 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ [42]

2.16 สีและการเกิดสี

การเกิดสีเกิดจากอนุมูลของธาตุทรานซิชัน อนุมูลกลุ่มนี้ จำนวนหนึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนอะตอมที่สามารถอยู่รอบๆ ตัวได้ ในสภาวะที่เป็นของเหลว จำนวนอะตอมของออกซิเจนที่จะรวมกับอนุมูลสีที่ละลายจะอยู่ในสภาวะสมดุลขึ้นอยู่กับส่วนผสมของแก้ว ความดันของออกซิเจนรอบๆ อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัว องค์ประกอบเหล่านี้บางตัวหรืออาจทั้งหมด มีผลต่อสีที่เกิดจากอนุมูลที่ทำให้เกิดสี

เครื่องมือที่ใช้วัดสี เรียกว่าเครื่อง spectrophotometer ที่สามารถวัดสีของวัตถุออกมาเป็นตัวเลขได้ ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็น reflectance curve วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี reflectance curve ต่างกัน วัตถุที่มีสีต่างกันเมื่อสะท้อนแสงของสีนั้นออกมาก็จะมีความยาวคลื่นต่างกันโดยที่ สีน้ำเงินมีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 430 – 460 นาโนเมตร สีเขียวมีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 500 – 580 นาโนเมตรและสีแดงมีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 620 – 780 นาโนเมตร ระบบการวัดสีในเครื่อง spectrophotometer มีอยู่หลายระบบด้วยกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบ CIE L*a*b*

ค่าดรรชนีสี (CIE L*a*b* color index) เป็นค่าที่ตั้งขึ้นตามคำจำกัดความของสี ตามข้อตกลงของ CIE (The Commission Internationale de l'Eclairage) ซึ่งได้พัฒนาระบบของการวัดสีในรูปของ objective ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์หรือความคิดของมนุษย์ในการวัดสี การวัดสีระบบ

นี้มีข้อดีคือเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล เป็นระบบที่วัดสีออกมาเป็นตัวเลขได้ โดย CIE color index ใช้ Lab color space ในสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก)

โดย แกน X แสดงค่า a* ที่เป็นบวกแทนดรรชนีที่ระบุค่าโซนสีแดง (red)

ค่า a* ที่เป็นลบแทนดรรชนีที่ระบุค่าโซนสีเขียว (green)

แกน Y แสดงค่า b* ที่เป็นบวกแทนดรรชนีที่ระบุค่าโซนสีเหลือง (yellow)

ค่า b* ที่เป็นลบแทนดรรชนีที่ระบุค่าโซนสีน้ำเงิน (blue)

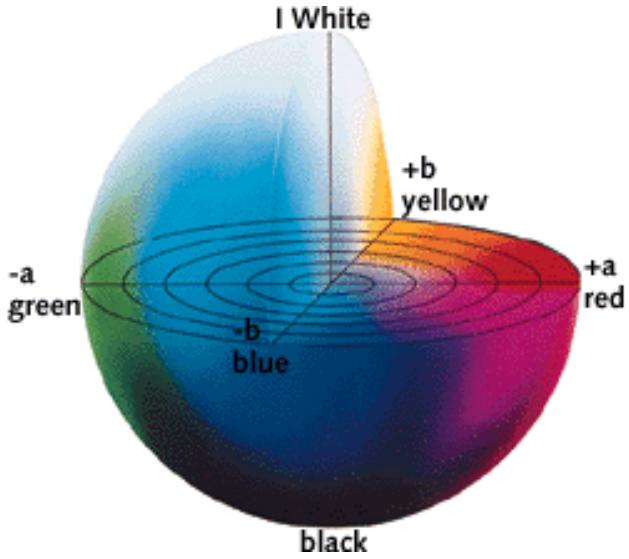
แกน Z แสดงค่า L* ที่เป็นบวกแทนดรรชนีที่ระบุค่าความสว่าง (light or white)

ค่า L* ที่เป็นลบแทนดรรชนีที่ระบุค่าความทึบแสง (dark or black) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100 โดยมีรูปแบบของการนำเสนอตามรูปที่ 2.18 (ข) ซึ่งแสดงเป็นกราฟของการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีสี (a*, b*) ในสองมิติ

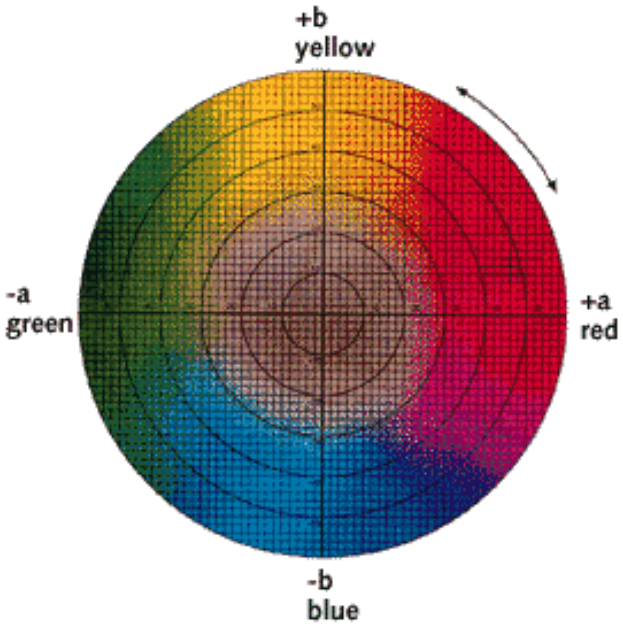
ในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่าจุดหนึ่งๆ ใน space นั้นเป็น $L_1^* a_1^* b_1^*$ และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน space เป็น $L_2^* a_2^* b_2^*$ ซึ่งสองจุดนี้มีระยะห่างกันใน space เท่าไรก็จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสีดังสมการ

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad \text{..... (2.6)}$$

โดยที่ ΔE คือความแตกต่างของสี



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.18 (ก) ความสัมพันธ์ของค่า CIE L*a*b* color index ในสามมิติ
(ข) ความสัมพันธ์ของค่า CIE L*a*b* color index ในสองมิติ ที่ระดับค่า L* เท่ากัน [43]