



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (มาตรวิทยา)

ปริญญา

มาตรวิทยา สาขา..... ฟิสิกส์
สาขา..... ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาสีของไข่มุกด้วยเทคนิคดูดกลืนแสงวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

Study of Pearl Color Using Visible Absorption Spectroscopy

นามผู้วิจัย นางสาวชญัญญากาญจน์ รัศมีคุณารัตน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ค.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ศิวาพร สหวัฒน์, วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ค.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาสีของไข่มุกด้วยเทคนิคดูดกลืนแสงวิธีเบ็ดสเปกโทรสโกปี

Study of Pearl Color Using Visible Absorption Spectroscopy

โดย

นางสาวชญากาญจน์ รัชมีคุณารัตน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (มาครวิทยา)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชัยฎกกาญจน์ รัศมีคุณารัตน์ 2555: การศึกษาสีของไข่มุกด้วยเทคนิค ดูดกลืน แสงวิสิเบิล สเปกโทรสโกปี ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (มาตรวิทยา) สาขามาตรวิทยา ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ค. 97 หน้า

สีเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในการบ่งบอกมูลค่าของไข่มุก การวัดสีของไข่มุกดำเนินการโดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ UV-Vis-NIR มาตรฐานของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นหลอดทั้งสแตน D65 รูปแบบของการวัดมีการทำมุมระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจหา เป็น 0/25 45 และ 75 องศา ไข่มุกที่ใช้ในการศึกษาเป็นไข่มุกน้ำจืด ไข่มุกน้ำเค็มและไข่มุก ปรับปรุงคุณภาพ จากแหล่งกำเนิดต่างๆ กันจำนวน 31 ตัวอย่าง สเปกตรัมของ UV-Vis-NIR ของตัวอย่างไข่มุกให้ค่าดัชนีสี CIE $L^*a^*b^*$ การวัดสีไข่มุกใช้การวัดซ้ำ 30 ครั้งสำหรับแต่ละตัวอย่าง ความไม่แน่นอนของสีหาได้จากค่าเฉลี่ยของสีที่แตกต่างจากค่าเฉลี่ย (MCDM) ค่าเฉลี่ย MCDM ที่น้อยที่สุดคือรูปแบบการวัด 0/45 โดยความไม่แน่นอนของการวัดสีเกิดจากความวาวเป็นหลัก

Chanyakarn Russameekhunarut 2012: Study of Pearl Color Using Visible Absorption Spectroscopy. Master of Science (Metrology), Major Field: Metrology, Department of Physics. Thesis Advisor: Mr. Wiwat Wongkokua, Ph.D. 97 pages.

Color is one of the most important physical properties that determine the value of pearls. Measurements of pearl's colors were carried out using a portable UV-Vis-NIR spectrometer. The standard illuminant source was a D65 tungsten lamp. The measurement configurations were 0/25, 45, and 75 degrees of the light source with respect to the detector. Thirty-one (31) freshwater-, saltwater-, and color-treated pearl samples of various origins were studied. The UV-Vis-NIR spectra of the pearl samples gave rise to CIE L*a*b* color indices. The measurements were repeated 30 times for each sample. Uncertainties of the colors were determined using the mean color difference from the mean (MCDM). The minimum MCDM of the measurement was from the 0/45 configuration. The uncertainty of color measurement was influenced mainly by gloss.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ให้ข้อคิด
แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในด้านการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้
จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ศิวพร สหวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้
ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในด้านการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไข
วิทยานิพนธ์นี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อ.สุรีย์ ลิตตชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างใหม่ในการค้นคว้าวิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้มีความ
สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ สำหรับคำปรึกษา และความช่วยเหลือใน
ด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจสำคัญ และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจน
ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ น.ส. พิมพ์ลดา รัศมีคุณารัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำเนื้อหา
เล่มวิทยานิพนธ์

ชญญากาญจน์ รัศมีคุณารัตน์

เมษายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	33
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ไข่มุกสี่ธรรมชาติ	36
2	ไข่มุกปรับปรุงคุณภาพ	39
3	ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของ $L^*a^*b^*$ และค่าความต่างสี (MCDM) จากการวัด 30 ครั้ง	88
4	แสดงการเทียบสีของไข่มุก	89

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของหอยมุก	6
2	แสดงการเรียงตัวของชั้นไข่มุก	7
3	แสดงสาเหตุการเกิดสีของไข่มุก	8
4	แสดงการพิจารณาสีของไข่มุก	9
5	การแบ่งสีของไข่มุก	9
6	แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D55 D65 และ D75	12
7	แสดง Reflectance Curve ของวัตถุสีต่างๆ	13
8	แสดงการทดลองหาปริมาณการตอบสนองของตามมนุษย์ต่อแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน	14
9	แสดง 2° 1931 CIE Standard Observer และ 10° 1964 CIE Standard Observer	15
10	แสดงการมองวัตถุที่มุม 2° และ 10°	15
11	แสดง CIE Tristimulus Values	16
12	แสดง CIE Chromaticity Diagram	18
13	แสดง MacAdam Ellipse	18
14	CIELAB 1976 ซึ่งแสดง L*a*b* color space	19
15	รูปแบบการวัด (ก) 45/0 and (ข) 0/45	21
16	รูปแบบการวัด (ก) bidirectional 45bi/0 geometry and (ข) circular 45c/0 geometry	22
17	รูปแบบการวัดความยาวด้วยมุม 4 มุมตาม ASTM	23
18	(ก) รูปแบบการวัด Sphere d:0 (ข) รูปแบบการวัด Sphere d:8	24
19	การดูคลิ่นแสงยูวีวิธีเบิล	25
20	สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงเดี่ยว	29
21	สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงคู่	30
22	ตาชั่งไฟฟ้าวัดค่าความถ่วงจำเพาะ	31
23	อุปกรณ์เครื่องเครื่องยูวีวิธีเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ก) แหล่งกำเนิดแสง (ข) สเปกโทรมิเตอร์ (ค) วัสดุอ้างอิง (ง) โพรบวัดการสะท้อนแสง	32
24	รูปแบบการวัดไข่มุก	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	อุปกรณ์ทำมุมรับแสง	34
26	วิธีการวัดไข่มุก	36
27	สเปกตรัมการส่งผ่านที่ 100% โดยโปรแกรม Avasoft	35
28	การแสดงค่า CIELAB	35
29	(ก) สเปกตรัมของไข่มุก A1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25° (ข) สเปกตรัมของไข่มุก A1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45° (ค) สเปกตรัมของไข่มุก A1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°	40
30	(ก) สเปกตรัมของไข่มุก A2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25° (ข) สเปกตรัมของไข่มุก A2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45° (ค) สเปกตรัมของไข่มุก A2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°	41
31	(ก) สเปกตรัมของไข่มุก A3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25° (ข) สเปกตรัมของไข่มุก A3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45° (ค) สเปกตรัมของไข่มุก A3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°	43
32	(ก) สเปกตรัมของไข่มุก A4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25° (ข) สเปกตรัมของไข่มุก A4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45° (ค) สเปกตรัมของไข่มุก A4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°	44
33	(ก) สเปกตรัมของไข่มุก A5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25° (ข) สเปกตรัมของไข่มุก A5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45° (ค) สเปกตรัมของไข่มุก A5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°	46

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
58	(ก) สเปกตรัมของไข่มุก I1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25° (ข) สเปกตรัมของไข่มุก I1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45° (ค) สเปกตรัมของไข่มุก I1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°	83
59	(ก) สเปกตรัมของไข่มุก I2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25° (ข) สเปกตรัมของไข่มุก I2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45° (ค) สเปกตรัมของไข่มุก I2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°	85

การศึกษาสีของไข่มุกด้วยเทคนิคดูดกลืนแสงวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

Study of Pearls Color Using Visible Absorption Spectroscopy

คำนำ

ไข่มุกเป็นอัญมณีอินทรีย์ที่เกิดจากการสร้างชั้นมุกของหอยมุก เช่น หอยนางรม หอยแมลงภู่ เมื่อมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในตัวหอยจะทำให้หอยมุกเกิดความระคายเคือง จึงหลั่งสารออกมาเคลือบสิ่งแปลกปลอมนั้นจนหนาขึ้นเกิดเป็นไข่มุก จากโครงสร้างที่เป็นชั้นของไข่มุกเมื่อมีแสงตกกระทบทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและแทรกสอดของแสง เกิดเป็นสีเหลือบที่ผิวของไข่มุก

สีของไข่มุกแบ่งเป็นสองส่วน คือสีพื้นฐานและสีเหลือบ สีพื้นฐานเกิดจากเม็ดสีในตัวไข่มุกเองในขณะที่สีเหลือบเกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงผ่านชั้นต่างๆ ของผิวไข่มุก สีของไข่มุกไม่ได้นำมาพิจารณาตอนประเมินคุณภาพ แต่มีผลต่อการประเมินราคา เนื่องจากไข่มุกมีหลายประเภทจึงแบ่งสีของไข่มุกที่นิยมออกเป็นกลุ่ม เช่น ไข่มุกญี่ปุ่นและไข่มุกทะเลใต้ที่นิยมมากและมีราคาแพงคือสี สีขาว-ชมพู สีชมพูและสีขาว ไข่มุกเม็ดโคโคมีสีเหลือบก็จะเป็นที่ต้องการมากส่งผลให้มีราคาสูงขึ้น

การมองเห็นสีของมนุษย์สามารถแยกแยะสีต่างๆ ได้มากแต่ไม่สามารถอธิบายค่าของสีให้มีความเข้าใจตรงกันได้ ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่าตัวเลขสีเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ตรงกันและมีมาตรฐาน การบอกสีของไข่มุกในปัจจุบันจะใช้การเปรียบเทียบสีจากตารางเทียบสีของไข่มุกซึ่งต้องใช้ผู้มีความชำนาญในการตรวจสอบ จึงเป็นที่น่าสนใจว่าถ้ามีการใช้เครื่องมือเพื่อวัดสีของไข่มุกได้ก็จะมีผลดีมากต่อการประเมินสีของไข่มุก การกำหนดระบบการวัดสีมีหลายรูปแบบสำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้การวัดสีโดยอ้างอิงระบบครรชนีสี CIE (Commission International de l'Éclairage or International Commission on Illumination) โดยใช้เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์วัดการดูดกลืนแสง ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จากการวัดจะนำไปแปลงค่าเป็นตัวเลขโดยใช้สมการ CIE tristimulus ด้วยโปรแกรมการคำนวณ

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการวัดสีของไข่มุกด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์
2. ศึกษาระบบสี CIE
3. ศึกษารูปแบบการวัดสีตามมาตรฐาน

ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการวัดสีของไข่มุกด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ สีที่ได้จากการวัดจะอ้างอิงจากระบบสี CIE โดยมีการศึกษารูปแบบการวัดสีที่เหมาะสมกับตัวอย่างไข่มุกเพื่อหามุมวัดสีแล้วมีค่าใกล้เคียงกับสีที่ตามองเห็น

การตรวจเอกสาร

จากงานวิจัยของ Mamangkey *et al.* (2010) ทำการศึกษาการประเมินคุณภาพไ้หมักในเชิงพาณิชย์จากเนื้อเยื่อ 2 กลุ่มโดยวิเคราะห์จากยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ซึ่งแบ่งไ้หมักเป็น 3 สีที่ผลิตจากเนื้อเยื่อที่คล้ายกันพบว่าการดูดกลืนแสงของไ้หมักมีความต่างกัน สีครีมและสีทองจะมีการดูดกลืนแสงประมาณ 320 ถึง 460 นาโนเมตร ขณะที่สีขาวอมชมพูมีการสะท้อนน้อยมากที่ 400 นาโนเมตร ส่วนไ้หมักสีครีมและสีทองมียอด (peak) การสะท้อนประมาณ 560 ถึง 590 นาโนเมตร ขณะที่สีขาวอมชมพูมีการดูดกลืนในบริเวณนี้้อยากส่วนไ้หมักสีครีมและสีทองจะแสดงยอดการดูดกลืนหลังยอดการสะท้อนที่ 700 และ 750 นาโนเมตร ไ้หมักอีก 2 อย่างที่ผลิตจากเนื้อเยื่อคล้ายกัน (สีขาวอมชมพูและสีครีมเหลือง) แสดงสเปกตรัมคล้ายกันซึ่งมีความเข้มต่างกัน หนึ่งในไ้หมักเหล่านี้มีความยาวสูงมาก สเปกตรัมของไ้หมักประเภทนี้จะแสดงค่าการสะท้อนสูงกว่าไ้หมักที่มีความยาวต่ำกว่าซึ่งค่าการสะท้อนเป็นตัวบอกความยาวของไ้หมัก สเปกตรัมของไ้หมักสีขาวที่มาจากเนื้อเยื่อต่างกันจะแสดงค่าการสะท้อนที่ 260 นาโนเมตรและการดูดกลืนที่ 280 นาโนเมตร ส่วนการสะท้อนอื่นอยู่ที่ 340 นาโนเมตรหลังจากยอดของสเปกตรัมของไ้หมักยังมียอดเรียบอยู่ไปจนกระทั่งมีการดูดกลืนเล็กน้อยที่ประมาณ 700 นาโนเมตร ในย่านวิสิเบิลไ้หมักสีขาวทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาทดลองมีสเปกตรัมคล้ายกันถึงแม้ว่าจะมีความเข้มแตกต่างกัน ผลที่ได้จากไ้หมักสีเหลืองและสีทองสเปกตรัมที่ได้แปรผันสอดคล้องกับความอิมสีของไ้หมัก ผลจากการศึกษานี้แสดงความสอดคล้องกันระหว่างสเปกตรัมการดูดกลืนและการสะท้อนของไ้หมักที่ได้จากเนื้อเยื่อคล้ายกันซึ่งไม่สำคัญโดยตรวจสอบได้จากยูวีสเปกโทรโฟโตมิทรี อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถใช้ประเมินคุณภาพไ้หมักได้ไม่มากนัก

Karampelas *et al.* (2009) ทำการศึกษารวมชาติของรงควัตถุที่แสดงในไ้หมักเลี้ยงน้ำจืดซึ่งยังไม่เป็นที่แน่ชัดจึงทำการศึกษาจากไ้หมักเลี้ยงน้ำจืดมี 21 ตัวอย่างของ *Hyriopsis Cumungi* และ *Hyriopsis Schlegeli* โดยใช้ UV-Vis-NIR วัดกระจายการสะท้อนแสงและใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีวัดการกระเจิงแสงที่ค่าความละเอียดสูง โดยเป้าหมายคือสร้างความสัมพันธ์ของสีธรรมชาติรงควัตถุที่ผสมในไ้หมักซึ่งใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ตัวอย่างของไ้หมักที่ทดสอบเป็นสีธรรมชาติแสดงลักษณะการสะท้อนรามานสเปกโทรสโกปีของ un-methylated polyene ซึ่งไม่มีแกโรทีนอยด์สูตรทางเคมีคือ $R-(CH=CH)_N-R$ มี N 4 ถึง 16 ตัว แสดงการดูดกลืนจากสีม่วงถึงสีเหลืองอมเขียวแต่ละสีขึ้นอยู่กับการผสมของรงควัตถุ ไม่ใช่รงควัตถุเดี่ยว สีที่ต่างกันอธิบายได้โดยการผสมสีต่างกันของแต่ละรงควัตถุ การระบุสีใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีหาความสัมพันธ์ของ

การดูดกลืนเฉพาะที่ชัดเจนสูงสุดในช่วง 405 ถึง 568 นาโนเมตร ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการใช้สีม่วงถึงสีเหลืองอมเขียวในการศึกษาความถูกต้องระหว่างความสัมพันธ์ของเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีและสเปกตรัมการกระจายการสะท้อนของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด

สีของไข่มุกเป็นปัจจัยสำคัญต่อราคาเป็นอย่างมาก Thongnoppkun et al (2008) ศึกษาลักษณะของไข่มุกโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์และเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ เพื่อหาลักษณะความแตกต่างของสีไข่มุกธรรมชาติและไข่มุกย้อมสีโดยใช้ไข่มุกน้ำจืดสีขาวย้อมด้วยซิลเวอร์ในนครทความเข้มขึ้นต่างกันไข่มุกย้อมสีจะมีเจดสีแตกต่างกันสำหรับเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ใช้เทคนิค ATR และ DRIFT ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิคนี้จะแสดงแถบสเปกตรัมลักษณะพิเศษของไข่มุก อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ไม่สามารถใช้บอกความต่างระหว่างไข่มุกที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ยอดการดูดกลืนแสดงที่ 841, 1083, 1461 และ 1441 cm^{-1} ซึ่งยอดการดูดกลืนนี้จะแสดงทั้งไข่มุกธรรมชาติและไข่มุกย้อมสี ส่วนเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ใช้เพื่อหาลักษณะของไข่มุกย้อมสีจะแสดงยอดชัดเจนที่ 570 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับ Ag-O ของซิลเวอร์ออกไซด์บนไข่มุกย้อมสี

Tan et al. ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของไข่มุกเลียนแบบโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ เทคนิคการกระจายพลังงานเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีและเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่พัฒนาขึ้นในห้องโดยวิธีทางอณูวิทยาศาสตร์ ในการทดสอบโครงสร้างพื้นผิวของไข่มุกเลี้ยงและไข่มุกเลียนแบบจะใช้เครื่องเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดที่การขยายมากกว่า 2000 เท่า นอกจากนั้นยังใช้เทคนิคการกระจายพลังงานเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีและเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชั้นไข่มุกและลูกปัดของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีธรรมชาติ ไข่มุกย้อมสีและไข่มุกเลียนแบบ ผลที่ได้จากเทคนิคการกระจายพลังงานเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปีของไข่มุกเลี้ยงและลูกปัดเป็น CaCO_3 ขณะที่ในไข่มุกเลียนแบบจะพบแค่งาน C และ O เท่านั้นซึ่งบ่งชี้ถึงความสอดคล้องที่เกี่ยวกับโพลีเมอร์ การพบ Si, O, Na และ Al ในไข่มุกเลียนแบบจะสอดคล้องกับคุณสมบัติของแก้ว ในการทดลองโดยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์จะพบยอดการดูดกลืนที่ 700, 713, 862 และ 1083 cm^{-1} สังเกตได้ว่ายอดเหล่านี้พบทั้งในไข่มุกสีธรรมชาติและย้อมสี ซึ่งยืนยันได้ว่ายอดเหล่านี้เป็น CaCO_3 กับโครงสร้างอะราโกไนท์ อย่างไรก็ตามอินฟราเรดสเปกตรัมของไข่มุกเลียนแบบมีความต่างอย่างมากของชนิดโพลีเมอร์และมีการทดสอบเพิ่มเติมของการศึกษาไข่มุกบนฟลูออเรสเซนส์โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตความ

ยาวคลื่นสั้นและยาว ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้เป็นอย่างดีของไข่มุกเลี้ยงมีแตกต่างอย่างชัดเจนจากไข่มุกเลียนแบบ

Rodrigues (2004) ทำการรวบรวมการวัดสีที่ใช้ในปัจจุบัน การจับคู่สีและการผลิตเฉดสี ปัจจัยพื้นฐาน โดยเฉพาะความสำคัญเกี่ยวกับการศึกษาการเคลือบสีรถยนต์ภายใน ASTM และ Detroit Color Council Committees โดยสีของรถยนต์มีด้วยกันหลายรูปแบบ สีดำ สีเมทัลลิก สีมุก การศึกษาการวัดสีที่มีลักษณะเฉพาะเหล่านี้ต้องมีการวัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าสีที่ถูกต้อง มุมการวัดสีจึงเป็นเรื่องจำเป็นต่อการวัดสีในการศึกษาจึงได้มีการแสดงค่าการวัดสีในมุมต่างโดยอ้างอิงจาก ASTM E-12.12 กำหนดความสำคัญของมุมตกกระทบเมื่อเทียบกับมุมอะซิมเพลทิกวาร์ที่ระนาบมุม 15° , 25° , 45° , 75° และ 110° เป็นมุมที่เหมาะสมกับการวัดสีที่มีลักษณะความวาว แล้วจึงนำค่าที่ได้มาหาค่าความต่างสีเปรียบเทียบค่ามาตรฐานเพื่อดูว่าสีที่เห็นมีการเปลี่ยนแปลงเกิดจากโครงสร้างของสีหรือสาเหตุใดและเป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาสีและคุณสมบัติของสีต่อไป

Dekker *et al.* (2009) มีการตรวจสอบการรวมกันของพื้นผิวและสีเมื่อมีการประเมินการปรากฏของลักษณะพิเศษที่เคลือบ การศึกษาก่อนหน้านี้ ลักษณะสำคัญที่สุดของพื้นผิวเคลือบ ลักษณะพิเศษเป็นการระบุการกระจายความหยาบและการแสดงผลสะท้อน ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดตัวแปรซึ่งดำเนินการโดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาเมื่อเร็ว ๆ นี้ ผลที่ได้นำมาพร้อมกับผลของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ภายใต้ 6 มุม ข้อมูลจากเครื่องมือและการมองเห็นเป็นการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคทางสถิติจากข้อมูลที่มองเห็นนี้เราสามารถสร้างรูปลักษณะทั้งหมดที่เห็นซึ่งมีความสัมพันธ์กับการวัดสีและพื้นผิวต่างจากการใช้เครื่องมือ ขั้นตอนการคำนวณที่มีการพัฒนาให้ผลการคาดหมายที่ยอมรับได้ซึ่งสัมพันธ์เป็นอย่างดีกับการมองเห็น เช่นเดียวกับค่ารวมของข้อมูลผลการสะท้อนใกล้เคียงกับมุมความวาวที่แสดงให้เห็น

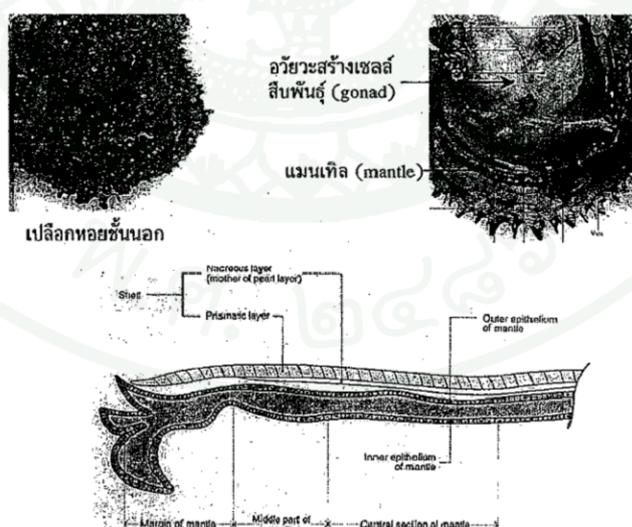
Dalal *et al.* (1999) ได้สร้างแบบจำลองที่พัฒนาแล้วสำหรับผลของความวาวบนการสะท้อนของสี โดยนำมุมการวัดของอุปกรณ์วัดสีมาใช้อธิบายซึ่งพิจารณาพื้นผิวที่มีการสะท้อนทั้งหมดของตัวอย่างที่ได้รับ โดยขึ้นอยู่กับความวาวและค่าดัชนีหักเหที่แน่นอนของตัวอย่างและมุมตกกระทบของลำแสง ถึงแม้ว่าพื้นผิวการสะท้อนทั้งหมดมีความแน่นอนแต่ส่วนประกอบการสะท้อนแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นและส่วนประกอบการกระจายลดลงเกี่ยวกับตัวอย่างความวาวที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการวัดการกระจายการสะท้อนด้วยสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จะลดลงเมื่อใช้กับตัวอย่างที่มีความวาว ในบทความนี้ได้กำหนดเส้นโค้งให้พอดีกับค่าการสะท้อนของ black xerographic print ซึ่งมี

ช่วงค่าความวาวสำหรับมุก 0/45 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของสีระหว่างการคาดหมายกับการวัดสีภาพทั้งหมดประมาณได้จาก CIELAB ΔE

ไข่มุก

ไข่มุก (Pearl) เป็นอัญมณีที่มีความสวยงามในตัวเองเนื่องจากมีความวาวแบบมุก (pearly) และการเหลือบสีรุ้ง (iridescence) โดยไม่ต้องตกแต่งเจียรระไน ลักษณะของเปลือกหอยมุกประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

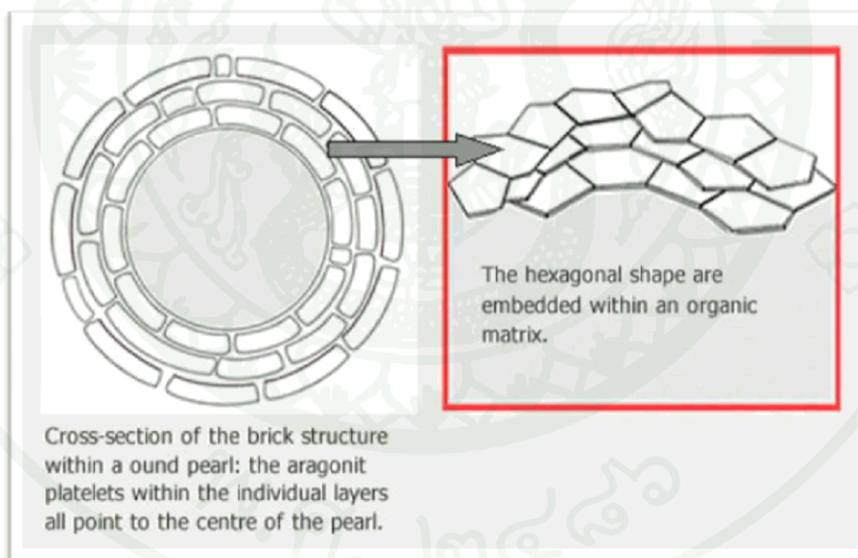
1. ชั้นเพริโอสทราคุม (periostracum) คือชั้นที่อยู่นอกสุดมีสีเข้มเป็นขนบางๆ ประกอบด้วยโปรตีนประเภทคอนไคโอลิน (conchiolin)
2. ชั้นปริสมติก (prismatic) เป็นชั้นถัดไปเกิดจากผลึกรูปปริซึมของแคลไซต์ (CaCO_3 , trigonal) ซึ่งเมื่อเกิดแล้วจะเพิ่มความหนาไม่ได้
3. ชั้นเนครีเอส (nacreous) หรือเรียกว่า ชั้น mother-of-pearl เกิดจากชั้นแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปผลึก tabular aragonite (CaCO_3 , orthorhombic) เป็นชั้นในสุดที่ติดกับเชลล์เนื้อเยื่อแมนเทิล (mantle) โดยชั้นนี้จะสามารถเพิ่มความหนาได้เรื่อยๆตลอดชีวิตหอยส่วนประกอบต่างๆที่กล่าวมา เรียกว่าเนื้อเยื่อแมนเทิลเป็น epithelial cell ซึ่งเป็นผลผลิตส่วนเนื้อนุ่มของหอย



ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของหอยมุก

ที่มา: สุริย์ (2550)

ไข่มุกเกิดขึ้นจากหอย (mollusks) ที่สามารถสร้างชั้นมุกได้ เช่น หอยนางรม (oyster) หอยแมลงภู่ (mussel) และหอยเปาฮือ (abalone) โดยกระบวนการสร้างไข่มุกเกิดขึ้นเมื่อมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปในตัวหอยทำให้เกิดการระคายเคืองจึงต้องมีการจับสารมุกเพื่อเคลือบสิ่งแปลกปลอมเกิดเป็นถุงไข่มุก (pearl sac) โดยใช้เวลาประมาณ 2-3 วันและสร้างชั้นมุกต่อไปโดยมีลักษณะเป็นแผ่นแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดอะราโกไนต์ (aragonite) เล็กๆวางเรียงสลับเป็นชั้นๆดังภาพที่ 2 ซึ่งมีสารอินทรีย์โปรตีนคอนไคโอลินเป็นตัวเชื่อมรอยต่อเช่นเดียวกับการก่ออิฐมอญเกิดเป็นชั้นมุกและยิ่งนานเป็นปีชั้นมุกก็จะหนาขึ้นเรื่อยๆจนได้ไข่มุกที่ขาวสวยงาม จากโครงสร้างที่เป็นชั้นนี้จึงเป็นที่มาของการหักเหและสะท้อนกลับของแสงเกิดการแทรกสอดของแสง (interference of light) ภายในชั้นต่างๆมองเห็นเป็นเหลือบสีมุก (iridescence) บนผิวไข่มุก เพราะฉะนั้นโครงสร้างของชั้นมุกจึงมีผลต่อคุณภาพของมุกมาก แผ่นชั้นอะราโกไนต์ที่มีการเรียงตัวกันเป็นระเบียบก็จะยิ่งได้ไข่มุกคุณภาพสูงแต่ถ้าแผ่นชั้นอะราโกไนต์หนาเกินไปเรียงตัวไม่เป็นระเบียบก็จะได้ไข่มุกคุณภาพต่ำโดยชั้นมุกควรมีความหนาที่ประมาณ 0.4 มม.ขึ้นไป



ภาพที่ 2 แสดงการเรียงตัวของชั้นไข่มุก

สมบัติของไข่มุก

ส่วนประกอบทางเคมีของไข่มุก

แคลเซียมคาร์บอเนต : 92.64%

น้ำ

: 0.59%

โปรตีนคอนไคโอลิน : 4.49%

สิ่งอื่นๆ : 2.28%

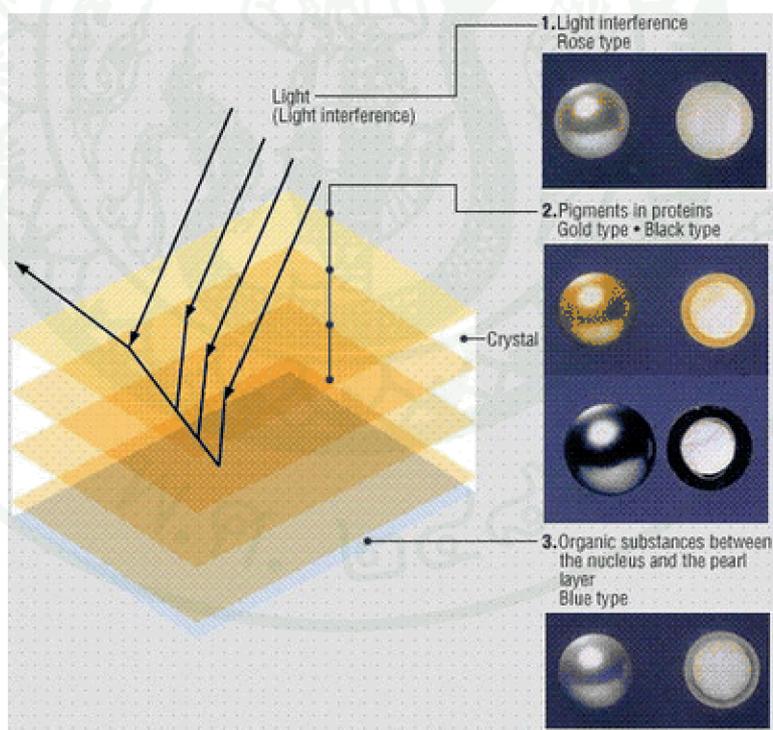
สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

ดัชนีหักเห (RI) : 1.53-1.68 ความแข็ง : 3.5-4

ความถ่วงจำเพาะ(SG) : 2.67-2.71(มุกเลี้ยง ถ.พ. = 2.75)

สาเหตุการเกิดสีของไข่มุกแบ่งเป็น 3 ประเภทดังนี้

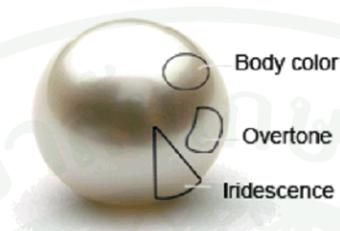
1. ไข่มุกสีชมพูเกิดจากปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง
2. ไข่มุกสีทองและไข่มุกสีดำเกิดจากรงควัตถุที่มีในโปรตีนระหว่างชั้นของไข่มุก
3. ไข่มุกสีฟ้าหรือสีเทาเกิดจากสารอินทรีย์ที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นของไข่มุกกับนิวเคลียส



ภาพที่ 3 แสดงสาเหตุการเกิดสีของไข่มุก

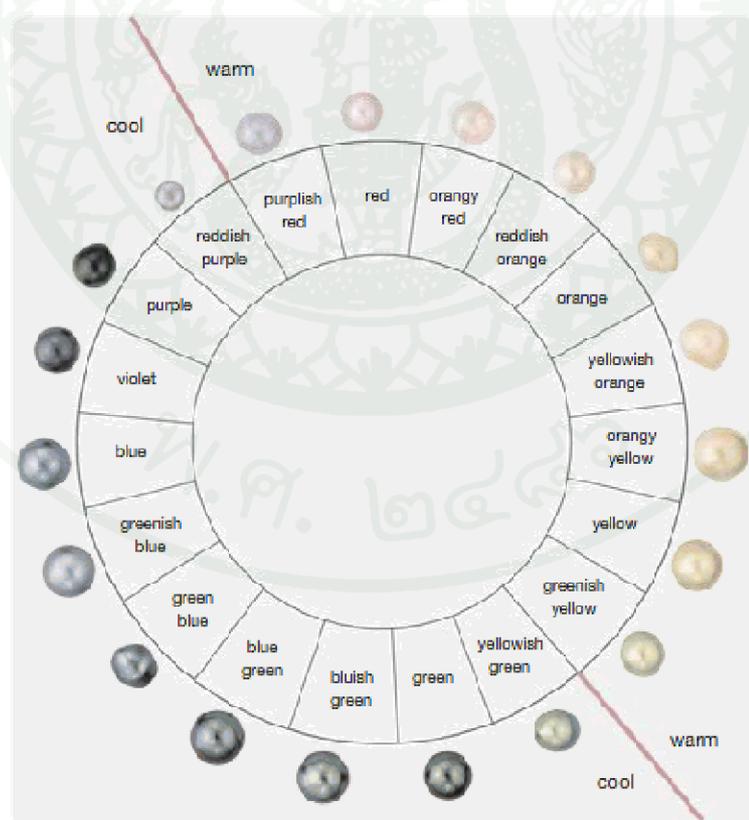
ที่มา: สุรีย์ (2550)

สีของไข่มุกแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ Body color เป็นสีพื้นของไข่มุก และ Overtone color เป็นสีอื่นที่เกิดจากการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงผ่านชั้นต่างๆที่ผิวของไข่มุก ในการประเมินราคาของไข่มุก สีของไข่มุกมีความสำคัญมากดังนั้นจึงการแบ่งสีของไข่มุกดังภาพที่ 5



ภาพที่ 4 แสดงการพิจารณาสีของไข่มุก

ที่มา: Shecy Pearl Jewelry (2012)



ภาพที่ 5 การแบ่งสีของไข่มุก

ประเภทของไข่มุก

การจำแนกประเภทของไข่มุกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ไข่มุกธรรมชาติและไข่มุกเพาะเลี้ยง ซึ่งในไข่มุกเพาะเลี้ยงนั้นมีการแบ่งประเภทไข่มุกตามลักษณะการเกิดดังนี้

1. ไข่มุกอะโกยาหรือไข่มุกญี่ปุ่น (Akoya Pearls or Japanese pearls) เป็นไข่มุกน้ำเค็มที่เกิดจากหอย *Pinctada fucata* หรือเรียกว่า Akoya oyster ลักษณะของไข่มุกมีรูปร่างกลม ผิวชั้นไข่มุกบางละเอียด เงาวาว ความหนาชั้นมุกประมาณ 0.4-0.7 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-10 มิลลิเมตร สีทั่วไปของไข่มุกประเภทนี้คือ สีขาว สีเหลืองและสีดำเทา

2. ไข่มุกเซาท์ซี หรือไข่มุกทะเลใต้ (South Sea Pearls) เป็นไข่มุกน้ำเค็มที่เกิดจากหอยพิงทาดา-แมกซิม่า (*Pinctada maxima*) เป็นพวก White-Golden lip pearl shell มีเปลือกในเป็นสีขาว เหลือบสีเงินและสีทองซึ่งเป็นไข่มุกชั้นดี คุณภาพสูง ราคาสูง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 9-18 มิลลิเมตรหรืออาจมีขนาดใหญ่กว่า 20 มิลลิเมตร สีทั่วไปของไข่มุกประเภทนี้มีสีอ่อนๆ สีขาว สีขาวอมชมพู สีเหลืองและสีทอง

3. ไข่มุกคาฮิติหรือไข่มุกดำ (Black Pearls) เป็นไข่มุกน้ำเค็มเกิดจากหอย Black lip pearl shell พันธุ์พิงทาดา มาคาริตีเฟอรา (*Pinctada margaritifera*) เปลือกด้านในของหอยริมขอบนอกจะเป็นสีดำเข้มถัดไปอาจเป็นสีเขียวหรือหลายสี ไข่มุกที่ได้จึงมีเข้มคือ สีดำ สีเทา สีน้ำตาล สีฟ้าและมีสีเหลืองซึ่งสีที่หายากและมีราคามากที่สุดคือ สีเขียวปีกนกยูง (Peacock green) สีน้ำทะเล (Marine blue) โดยทั่วไปไข่มุกดำมีขนาดประมาณ 10-20 มิลลิเมตร

4. ไข่มุกน้ำจืด (Fresh water pearls) เป็นไข่มุกที่เกิดจากหอย Fresh water mussel ไข่มุกน้ำจืดไม่มีนิวเคลียสใส่เฉพาะเนื้อเยื่อแมนเทิลเข้าไปในหอยมุกจึงทำให้รูปร่างไม่แน่นอนอาจได้เป็นรูปร่าง เม็ดข้าวสาร ทรงกลม ทรงรีแต่เมื่อ 6 ปี ที่แล้วสามารถเลี้ยงให้ได้ค่อนข้างทรงกลมแล้ว ลักษณะของไข่มุกน้ำจืดเนื้อไข่มุกมีความละเอียดแต่มีความมันวาวไม่มาก สีของไข่มุกน้ำจืดได้แก่ สีขาว สีส้ม สีชมพูและสีม่วง ส่วนไข่มุกน้ำจืดของประเทศไทยจะมีสีน้ำตาล

ทฤษฎีระบบสี CIE

ระบบ CIE ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1931 โดยการวัดสีออกมาเป็นตัวเลข เป็นระบบการวัดสีในรูปแบบของ Objective ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์หรือความคิดมนุษย์ ข้อดีของระบบคือช่วยลดปัญหาความขัดแย้งซึ่งมาจากการมองเห็นของแต่ละบุคคลเนื่องจากเป็นระบบการวัดที่ใช้ตัวเลขทำให้ทราบสีที่แท้จริงของชิ้นตัวอย่างได้แม้ชิ้นตัวอย่างนั้นจะซีดลงไปตามกาลเวลา นอกจากนั้นสามารถนำค่าที่ได้จากระบบนี้ไปคำนวณและทำนายสูตรสีผสมได้

ปัจจัยที่ใช้ในการมองเห็นสีของมนุษย์

1. แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน (Illuminants)

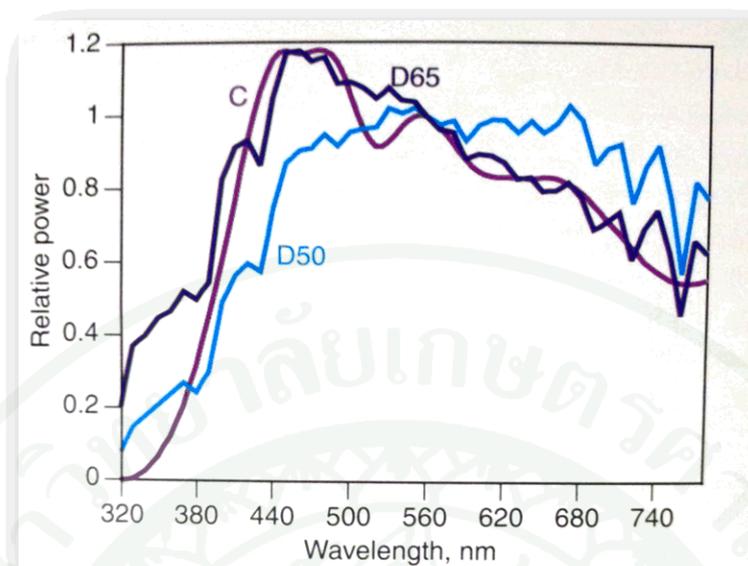
แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการวัดสีนั้น สามารถวัดการกระจายพลังงานที่แต่ละความยาวคลื่น (spectral power distribution, SPD) เนื่องจากการมองเห็นสีของวัตถุจากแหล่งธรรมชาติจะมีความแตกต่างกันตามวัน เวลา ภูมิอากาศ ภูมิประเทศ ดังนั้นจึงต้องมีแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ในการเปรียบเทียบมาตรฐาน จึงต้องกำหนดมาตรฐานดังนี้

1.1 Illuminant A มี color temperature ประมาณ 2848 K โดยการกระจายพลังงานแต่ละความยาวคลื่น (SPD) ใกล้เคียงหลอดไฟทังสเตน

1.2 Illuminant B มี color temperature ประมาณ 4900 K เกิดจากนำ Illuminant A ผ่านแผ่นกรองแสง ใช้แทนแสงแดดตอนเที่ยงแต่ปัจจุบันไม่นิยมแล้ว

1.3 Illuminant C มี color temperature ประมาณ 6700 K เกิดจากนำ Illuminant A ผ่านแผ่นกรองแสง ใช้แทนแสงแดดตอนกลางวัน

1.4 Illuminant D เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใกล้เคียงกับแสงแดดกลางวันเช่นกันแต่มีการแบ่ง color temperature ที่ละเอียดเริ่มจากเหลืองไปจนถึงน้ำเงิน เช่น D55 D65 และ D75 โดย D65 เป็น color temperature ของแสงแดดตอนกลางวันที่อุณหภูมิ 6500 K และ D75 เป็นอุณหภูมิสีของแสงแดดตอนกลางวันที่อุณหภูมิ 7500 K ค่าของแสง Illuminant D ถ้ามีค่าน้อยต่อท้ายจะมีสีออกเหลืองมากกว่า และถ้ามีค่ามากต่อท้ายก็จะมีสีออกไปทางหรือน้ำเงินมากขึ้นและ Illuminant D65 เป็นที่นิยมใช้สูงสุด



ภาพที่ 6 แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D55 D65 และ D75

ที่มา: BERNIS (2009)

2. วัตถุที่มีสี

การวัดค่าแสงที่สะท้อนออกจากวัตถุเป็นตัวเลขโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิง (reference) ได้เป็นค่า reflectance curve ดังภาพที่ 7 วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี reflectance curve ต่างกันดังนี้

วัตถุสีขาว แสงสะท้อนที่ทุกความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร

วัตถุสีน้ำเงิน แสงสะท้อนที่ทุกความยาวคลื่น 430-460 นาโนเมตร

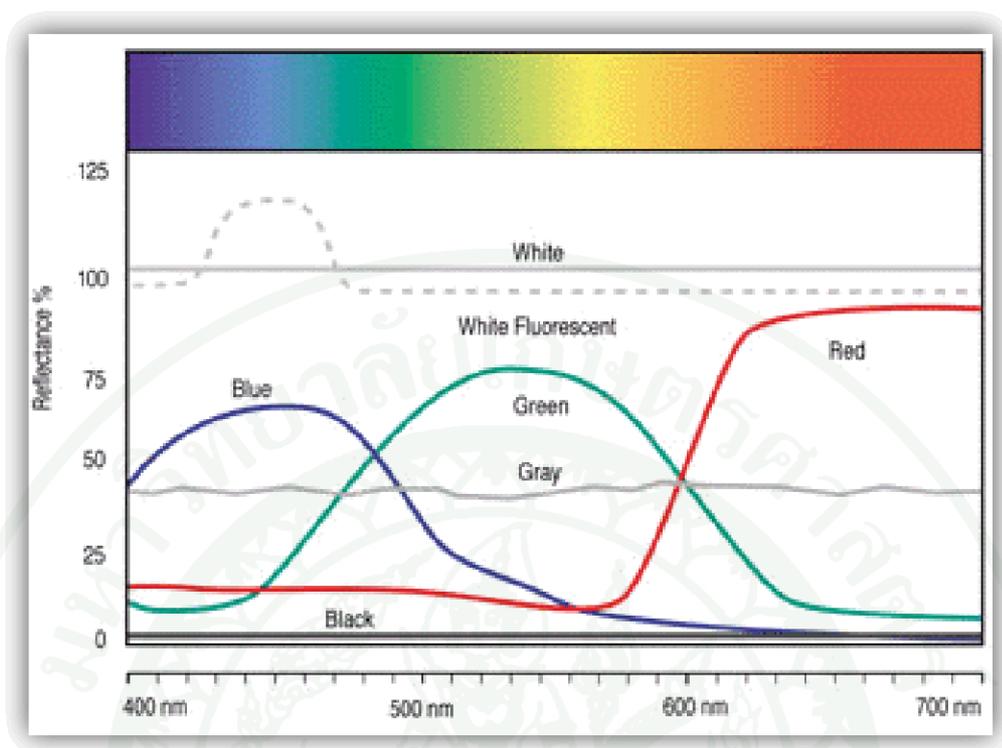
วัตถุสีเขียว แสงสะท้อนที่ทุกความยาวคลื่น 500-530 นาโนเมตร

วัตถุสีขาว แสงสะท้อนที่ทุกความยาวคลื่นของแสงสีเขียว เหลืองและแดงแต่จะมีการ

การสะท้อนแสงต่ำมากที่ความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน

วัตถุสีแดง แสงสะท้อนที่ทุกความยาวคลื่น 620-700 นาโนเมตร

วัตถุสีดำ มีการสะท้อนแสงต่ำมากที่ทุกความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร

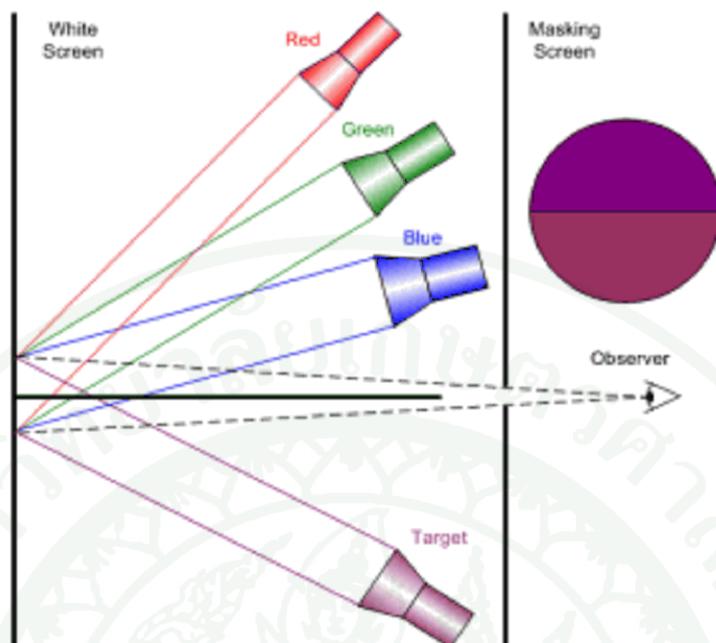


ภาพที่ 7 แสดง Reflectance Curve ของวัสดุต่างๆ

ที่มา: BERNIS (2009)

3. ผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน

การวัดสีออกมาเป็นตัวเลขคือการหาปริมาณการตอบสนองสายตามนุษย์ต่อแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน การทดลองโดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อ Wright และ Guild ทดลองโดยการฉายแสงตลอดความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ลงบนจอขาวด้านข้างและใช้แสงปฐมภูมิสีแดงที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร แสงสีเขียวที่ความยาวคลื่น 546.1 นาโนเมตรและสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 435.8 นาโนเมตรส่องลงจอด้านบน จากนั้นให้ผู้สังเกตการณ์ 17 คน มองผ่านช่องสีเพื่อเทียบสี (color match) ดังภาพที่ 8

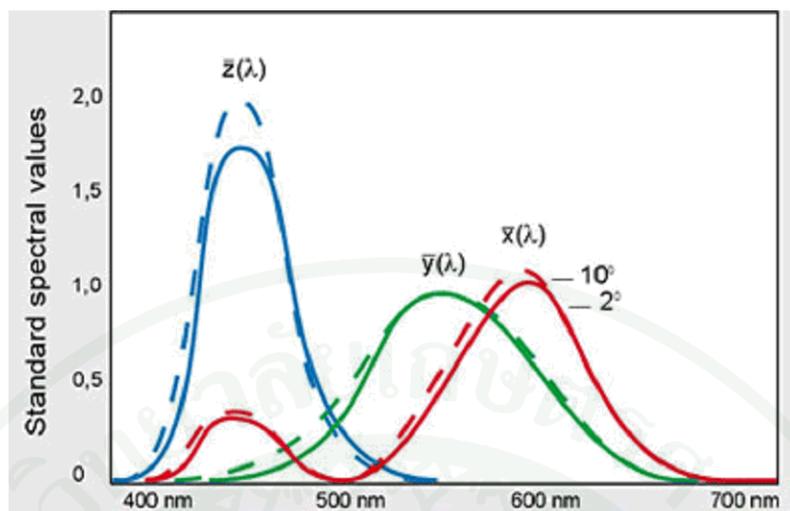


ภาพที่ 8 แสดงการทดลองหาปริมาณการตอบสนองของตามนุษย์ต่อแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน

ที่มา: BERNS (2009)

ผลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน ได้ค่าที่เรียกว่า CIE color-matching function curve 3 cones หรือเรียกว่า 2° 1931 CIE Standard Observer ดังภาพที่ 9

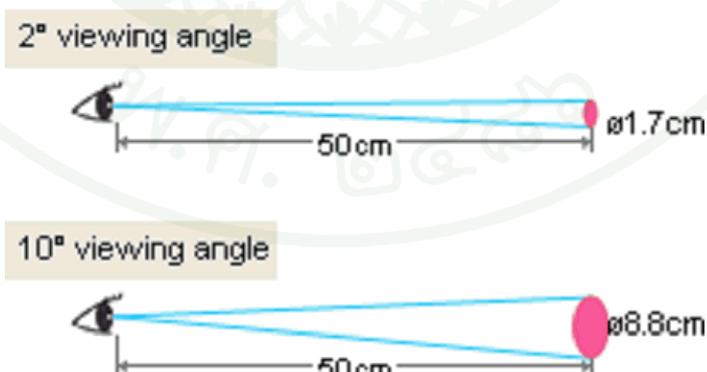
โดย \bar{x} = เส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตาที่ไวต่อแสงสีแดง
 \bar{y} = เส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตาที่ไวต่อแสงสีเขียว
 \bar{z} = เส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตาที่ไวต่อแสงสีน้ำเงิน



ภาพที่ 9 แสดง 2° 1931 CIE Standard Observer และ 10° 1964 CIE Standard Observer

ที่มา: BERNIS (2009)

การมองวัตถุด้วยมุม 2° จะได้ภาพที่ไม่สมบูรณ์เหมือนการมองวัตถุปกติในอุตสาหกรรม เนื่องจากมุม 2° เป็นมุมที่แคบ ข้อยเสียคือจะเป็นภาพที่จุดเดียวเพราะภาพนั้นตกบน fovea เท่านั้นซึ่งเซลล์รับเรตินาคือ cones เป็นเซลล์ที่ไวต่อแสงไม่ได้มีเพียงบริเวณ fovea เท่านั้น ดังนั้นในปี 1964 จึงมีการทดลองอีกครั้งที่มุม 10° จึงได้ค่าที่เรียกว่า 10° 1964 CIE Standard Observer ซึ่งมีการตอบสนองต่อแสงสีน้ำเงินมากกว่าการมองที่ 2° ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงการมองวัตถุที่มุม 2° และ 10°

ที่มา: Konica Minolta Sensing, Inc. (2012)

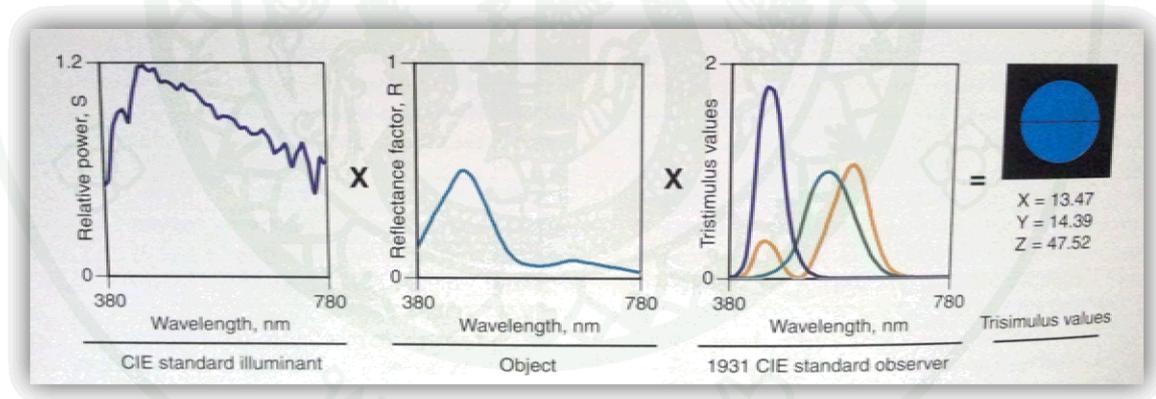
4. CIE Tristimulus Values

สามารถหาค่าการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสง การสะท้อนแสงของวัตถุ และการตอบสนองของตามนุษย์ที่มีความไวต่อแสงสีแดง เขียว และน้ำเงินเป็นตัวเลขออกมาได้แล้วสามารถนำค่าเหล่านี้คำนวณสมการโดยนำค่าทั้งสามที่แต่ละความยาวคลื่นเดียวกันคูณกัน จากนั้นนำมา รวมกันตลอดความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ได้เป็นตัวเลข 3 ค่า คือ X Y และ Z ดังสมการ(1)

$$\begin{aligned} X &= \sum S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \\ Y &= \sum S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \\ Z &= \sum S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \end{aligned} \quad (1)$$

โดย S คือ กำลังความเข้มของแสงมาตรฐาน

R คือ ค่าการสะท้อนของวัตถุมีสี



ภาพที่ 11 แสดง CIE Tristimulus Values

ที่มา: BERNIS (2009)

ซึ่งค่า X บอกความเป็นวัตถุสีแดง Y บอกความเป็นวัตถุสีเขียวและ Z บอกความเป็นวัตถุสีน้ำเงิน รวมเรียกว่า CIE Tristimulus Values ดังภาพที่ 11

CIE Chromaticity Coordinates

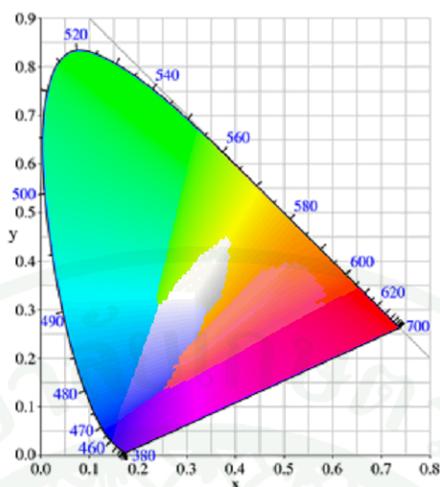
สามารถระบุสีของวัตถุโดยใช้ค่า CIE Tristimulus Values หรือ X, Y และ Z ได้แต่ก็จำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวกับลักษณะของสีที่มองเห็น เช่น hue value และ chroma ด้วย ดังนั้นการระบุสีโดยใช้ค่า X Y และ Z นั้นจึงไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากนัก และเพื่อให้การคำนวณค่า CIE Chromaticity Coordinates จากค่า Tristimulus Values ดังสมการ(2)

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2)$$

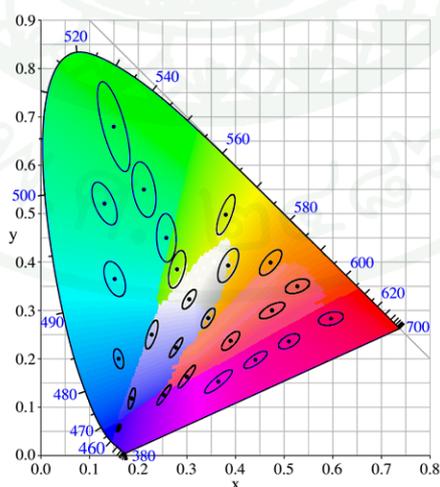
ค่า X Y และ Z คือ CIE Chromaticity Coordinates โดย $X + Y + Z = 1$ เมื่อนำค่า X และ Y มา plot กราฟจะได้แผนผังที่ใช้บอกสีที่เรียกว่าค่า CIE Chromaticity Diagram ซึ่งมีลักษณะคล้ายเกือบว่า ดังภาพที่ 12 CIE Chromaticity Diagram นี้จะบอกได้เพียงลักษณะของสีที่ปรากฏให้เห็น (hue) และความสดใสของสี (chroma) เท่านั้นแต่ถ้าต้องการบอกลักษณะของสีที่หมายถึงความสว่างของสี (value หรือ lightness) จะต้องกำหนดด้วยค่า CIE Tristimulus Values, Y ดังนั้นในการระบุจึงสามารถระบุด้วยค่า x y และ z จึงจะได้ลักษณะของสีที่ครบถ้วน



ภาพที่ 12 แสดง CIE Chromaticity Diagram

ที่มา: Wikipedia (2012)

การระบุสีด้วยค่า CIE Chromaticity Coordinates (x และ y) ยังมีข้อบกพร่องคือ ในทางทฤษฎีเราจะใช้ความแตกต่างของสองสีเป็นตัวเลข (Dx และ Dy) บอกความคลาดเคลื่อนของสีออกไปจากมาตรฐานแต่ในทางปฏิบัตินั้น สายตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นความแตกต่างของสี ใน CIE Chromaticity Diagram ได้ไม่เท่ากัน



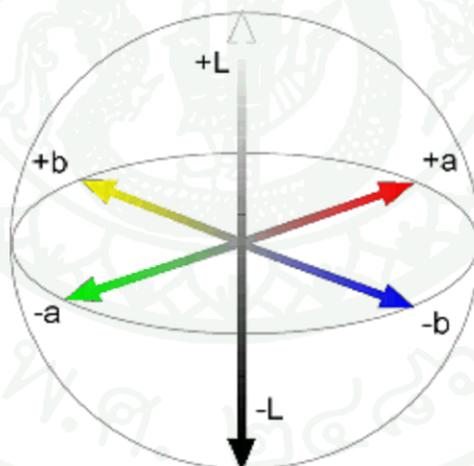
ภาพที่ 13 แสดง MacAdam Ellipse

ที่มา: Wikipedia (2011)

จากภาพที่ 13 พบว่าสายตามนุษย์บอกความแตกต่างของสีได้ไม่เท่ากันเพราะเส้นขอบเขตแสดงความสามารถนั้นเป็นวงรีและขนาดไม่เท่ากันในบริเวณของสีเขียวไปไม้ เป็นบริเวณที่ใหญ่ที่สุดและสีน้ำเงินเป็นบริเวณที่เล็กที่สุดแสดงว่าค่า x และ y ของสีเขียวเปลี่ยนได้มากโดยที่สายตามนุษย์ยังมองไม่เห็นถึงความแตกต่าง แต่ถ้าเป็นสีน้ำเงินแม้เพียงเปลี่ยนเล็กน้อยสายตามนุษย์ก็สามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งถ้าหากมนุษย์สามารถเห็นถึงความแตกต่างของสีได้อย่างสม่ำเสมอแล้วกราฟที่ได้ก็ควรจะเป็นวงกลมและขนาดเท่ากันด้วยคั้งนั้นค่า CIE Chromaticity Coordinates (x และ y) จึงยังไม่เหมาะในการนำมาใช้วัดความแตกต่างของสี

CIE L* a* b* (CIELAB)

CIELAB 1976 เป็นสมการที่ใช้ระบุสีที่เป็นที่นิยมมากในปัจจุบันซึ่ง CIELAB 1976 ได้รับการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงมาจาก CIE Chromaticity Coordinates System เนื่องจากการระบุสีเป็นตัวเลขของ 2 ระบบได้แก่ ระบบที่ระบุตัวเลขด้วยค่า CIE Tristimulus Values และ CIE Chromaticity Coordinates ยังมีข้อเสียอยู่โดยลักษณะ color space ของ CIELAB 1976 เป็นดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 CIELAB 1976 ซึ่งแสดง L*a*b* color space

ที่มา: Wikipedia (2006)

การหาค่า CIE L*a*b* จากสมการ (3)

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 \left[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3} \right]$$

$$b^* = 200 \left[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3} \right] \quad (3)$$

เมื่อ แกน L* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100
 แกน a* เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง
 แกน a* เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว
 แกน b* เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง
 แกน b* เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

โดยที่ X_n, Y_n, Z_n คือค่า Triatimuls Value ของ Reference white ภายใต้ Illuminantหนึ่งเช่น D65 (Y_n = 100 เสมอ ส่วน X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n จะมีค่ามากกว่า 0.01) นอกจากระบบนี้ในระบบ CIELAB ยังมีการปรับปรุงต่อไป โดยเชื่อมค่า “a” และ “b” เข้ากับ “hue” และ “chroma” โดยกำหนด color term อีก 2 ตัวคือ hue angle (h*) และ chroma (C*) hue angle (h*) เป็นตัวเลขที่ระบุว่ามีสีมีตำแหน่งอยู่ที่ใดในกราฟมีหน่วยเป็นองศา โดยหาค่า h* และ C* ได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$h^* = \tan^{-1} \left[\frac{b^*}{a^*} \right] \quad (4)$$

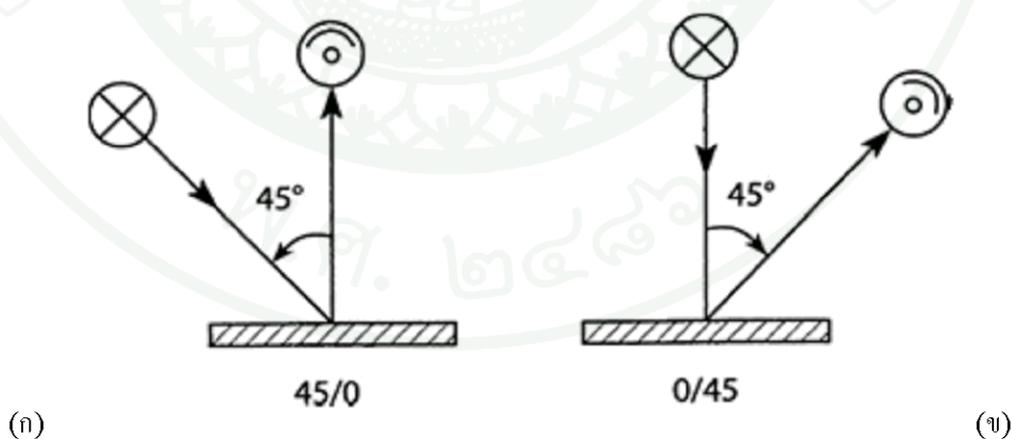
$$C^* = \sqrt{[(a^*)^2 + (b^*)^2]} \quad (5)$$

ถ้า $h^* = 0^\circ$ แสดงว่าเป็น สีแดง
 $h^* = 90^\circ$ แสดงว่าเป็น สีเหลือง
 $h^* = 180^\circ$ แสดงว่าเป็น สีเขียว
 $h^* = 270^\circ$ แสดงว่าเป็น สีน้ำเงิน

ค่า Chroma จะได้จากความยาวของเส้นตรงจากจุดกำเนิดที่ $a^* = b^* = 0$ ไปยังตำแหน่งของตัวอย่าง C^* จะใช้บอกค่าความสดสีที่ค่าความสว่างหนึ่งๆโดยทั่วไป ในการระบุสีของวัตถุมีสีในระบบ CIELAB นั้น มักจะระบุด้วยค่า L^* , C^* และ h^* มากกว่า L^* , a^* และ b^* เนื่องจากจะทำให้เข้าใจและทราบลักษณะของสีได้ใกล้เคียงกับที่ตาของมนุษย์มองเห็นสี

Measurement geometry

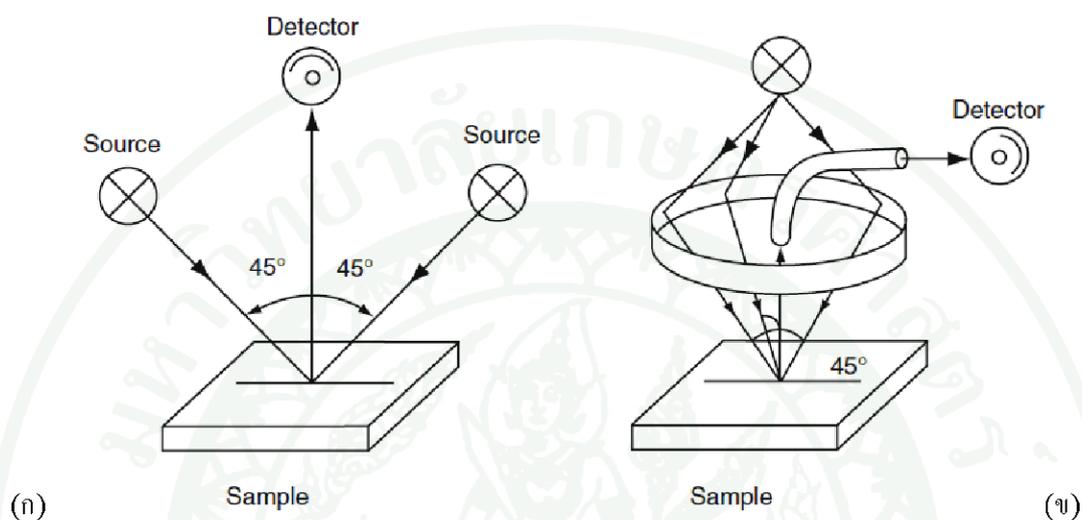
อุปกรณ์การวัดสีมีแหล่งกำเนิดและตัวตรวจจับที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการสะท้อนหรือการส่งผ่านความยาวคลื่นของรูปแบบสีที่ต้องการวัด รูปแบบของการวัดจะอ้างอิงชนิดของแสงส่องสว่างของตัวอย่างสีและการตำแหน่งของตัวตรวจจับ การเลือกรูปแบบการวัดขึ้นอยู่กับความสอดคล้องของรูปแบบสี โครงสร้างพื้นผิวและรายละเอียดของชนิดรงควัตถุ จากผลการวัดที่เพิ่มเติมมีความคาดหวังต่อการยอมรับผลที่แสดง CIE ได้เสนอ 4 รูปแบบการวัดสำหรับวัสดุทึบแสงโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ รูปแบบทิศทาง 45/0 และ 0/45 เป็นรูปแบบทิศทางการวัดอย่างง่ายโดยที่แสงตกกระทบที่มุม 45 องศาบนพื้นผิวของตัวอย่างสีและรับแสงที่มุม 0 องศา โครงสร้างแบบนี้เป็นแบบ 45/0 หรือสลับตำแหน่งระหว่างมุมแสงตกกระทบกับมุมรับแสงจะเป็นแบบ 0/45 ส่วนใหญ่นิยมใช้โครงสร้างแบบ 45/0 มากกว่า เนื่องจากได้เปรียบค่าแสงของมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบและตัวอย่างความยาวที่ถูกตัดออกไปจากการวัด



ภาพที่ 15 รูปแบบการวัด (ก) 45/0 and (ข) 0/45

ที่มา: Klein (2010)

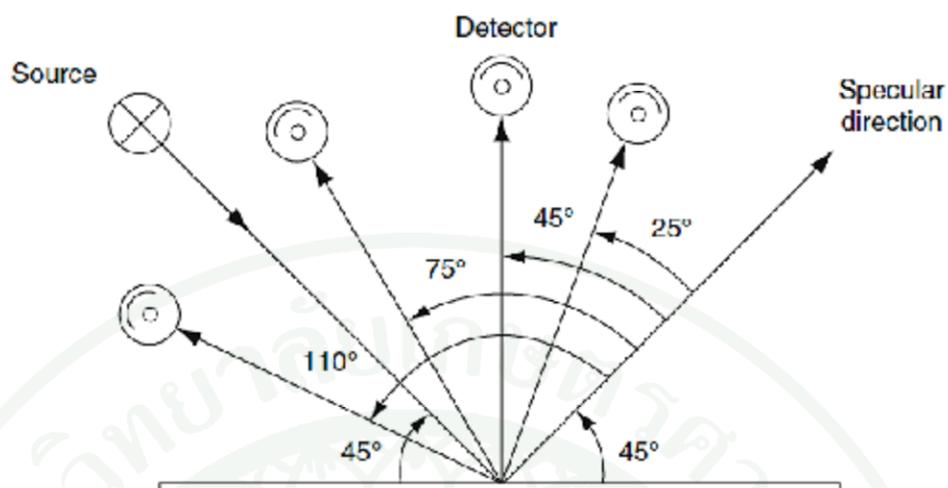
สำหรับตัวอย่างที่มีพื้นผิวความสม่ำเสมอไม่สมบูรณ์จะใช้มุมการส่องสว่างจากด้านตรงข้ามในแต่ละด้านเหมาะสมที่ 45 องศา โครงสร้างนี้มีมุมการส่องสว่าง 2 ตำแหน่งหรือมากกว่านั้นซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ในการวัดแบบนี้แหล่งกำเนิดแสงจะรวมเป็นวงกลมที่มุม 45 องศา



ภาพที่ 16 รูปแบบการวัด (ก) bidirectional 45bi/0 geometry and (ข) circular 45c/0 geometry

ที่มา: Klein (2010)

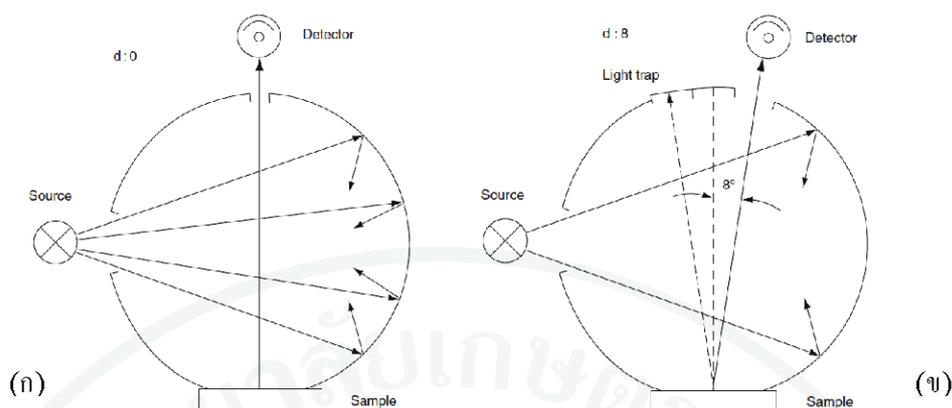
นอกจากนี้ยังการอธิบายมุมที่ขึ้นกับการแทรกสอดซึ่งเรียกว่า gonio spectrophotometer ซึ่งเปลี่ยนแปลงมุมการวัดโดยอุปกรณ์มีมุมการส่องสว่างที่ 45 องศาและตัวรับแสงมีการรับแสงสะท้อนเสมือนกระจกได้หลายมุม ได้แก่ มุม 25 45 75 และ 110 องศา โดยใช้วัดสีที่มีองค์ประกอบเป็นเมทลลิก



ภาพที่ 17 รูปแบบการวัดความวาวด้วยมุม 4 มุมตาม ASTM

ที่มา: Klein (2010)

รูปแบบทรงกลม $d/0, 0/d$ เป็นการวัดการรวมแสงสะท้อนแสงของวัตถุโดยไม่มี ความวาว และลักษณะของพื้นผิวมาเกี่ยวข้องกับการวัดการวัดการสะท้อนแสงมี 2 แบบคือ การวัดแบบ specular excluded mode เป็นการวัดการสะท้อนแบบ diffuse อย่างเดียวและแบบการวัดแบบ specular included mode เป็นการวัดการสะท้อนแสงทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยการสะท้อนแบบ diffuse และ specular ซึ่งแสดงในรูปแบบอินทิเกรตคิงสเฟียร์แบบ D/8 ได้รับความนิยมมากกว่า D/0 เนื่องจากสามารถแยกและรวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกได้ ตามมาตรฐาน CIE ช่องรับแสง ต้องไม่เกิน 10 องศาจากแนวตั้งฉากการวัดแบบอินทิเกรตคิงสเฟียร์มีข้อดีว่าการวัดแบบ 45/0 หรือ 0/45 โดยมีข้อผิดพลาดน้อยกว่าเพราะสามารถแยกและรวมแสงสะท้อนแบบเสมือนกระจกได้

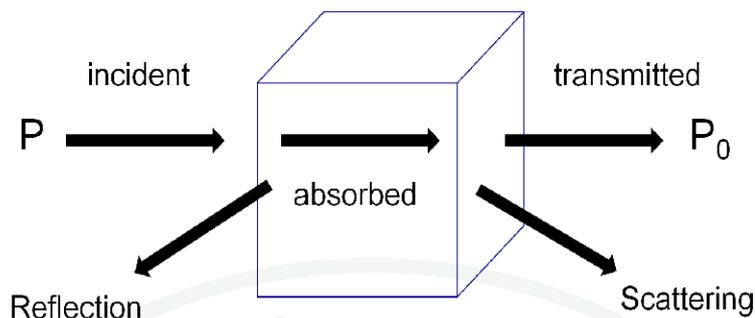


ภาพที่ 18 (ก) รูปแบบการวัด Sphere $d:0$ (ข) รูปแบบการวัด Sphere $d:8$

ที่มา: Georg A. Klein (2010)

ทฤษฎีเครื่องยูวีวิลิเบิลสเปกโตรมิเตอร์

สเปกโทรสโกปีเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการวัดการดูดกลืนหรือการคายรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าของสารโดยเฉพาะ ซึ่งสารส่วนใหญ่สามารถดูดกลืนคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลตและช่วงแสงที่มองเห็นได้ จากสมบัตินี้จึงนำมาใช้เป็นเทคนิควิเคราะห์ยูวีวิลิเบิลสเปกโทรสโกปี การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิลิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 ถึง 800 นาโนเมตรสมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำและมีสภาพไวสูงโดยอาจทำการวิเคราะห์ที่อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้ แต่การที่จะพิสูจน์ว่าสารตัวอย่างเป็นสารอะไร มีโครงสร้างอย่างไร จำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นเข้าช่วยเพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำเมื่อให้ลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องกัน ผ่านเข้าไปในวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืนบางส่วนเกิดการสะท้อนบางส่วนกระเจิงและบางส่วนทะลุออกไปดังรูป



ภาพที่ 19 การดูดกลืนแสงยูวีวิธีเปิด

ถ้าให้ลำแสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่น ปริซึม หรือเกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปบางส่วน ส่วนที่หายไปจะเรียกว่า absorption spectrum และพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้นและความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน

$$\log \frac{I_0}{I} = K_1 b$$

(6)

เมื่อ I คือ ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียวหลังผ่านตัวอย่าง

K_1 คือ Proportionality constant

I_0 คือ ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลางเมื่อ $b = 0$

B คือ ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร

กฎของเบียร์ (Beer's law) เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น

$$\log \frac{I_0}{I} = K_2 c \quad (7)$$

เมื่อ K_2 คือ Proportionality constant

C คือ ความเข้มข้นของสารในหน่วยโมลต่อลิตร

เมื่อวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ต เรียกว่า กฎของเบียร์แลมเบิร์ต การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างเราสามารถทำได้โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (Incident light: I_0) แล้ววัดปริมาณแสงที่เหลือผ่านออกมา (I) โดยเทียบกับแสงที่ผ่านออกมาเมื่อไม่มีสารตัวอย่าง

ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น (absorbance and concentration)

ค่าการดูดกลืนแสงของสารมีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงปริมาณวิเคราะห์เนื่องจากค่าการดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นตามกฎของเบียร์แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังสมการ

$$A = \mathcal{E} c l \quad (8)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

\mathcal{E} คือ เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่งเรียกว่า molar absorptivity ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

l คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์นั่นเอง (cm)

c คือ ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์ (M)

การดูดกลืนแสงของสารประกอบอินทรีย์

การดูดกลืนของโมเลกุลสารประกอบอินทรีย์เกิดจากอิเล็กตรอน 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนที่ใช้สร้างพันธะและอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว เกิดขึ้นในย่านอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล โดยความแข็งแรงของพันธะและจำนวนอิเล็กตรอนคือปัจจัยความยาวคลื่นที่โมเลกุลของสารดูดกลืน ส่วน

อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างพันธะระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน หรือ คาร์บอน-ไฮโดรเจนจะสัมพันธ์กับการดูดกลืนลักษณะโฟตอนซึ่งมีพลังงานมากกว่าแสงย่านอัลตราไวโอเลต การสร้างพันธะคู่และพันธะสามของอิเล็กตรอนใช้พลังงานไม่สูงมากและถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่าอิเล็กตรอนพันธะเดี่ยว ดังนั้นโมเลกุลพันธะไม่อิ่มตัวสามารถดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลเรียกว่า โครโมฟอร์ จากตารางที่ 3.1 ความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนขึ้นกับโครงสร้างของโมเลกุลและตัวทำลายอีกด้วยและจะเกิดการดูดกลืนแสงขึ้นที่ความยาวคลื่นยาวขึ้นเมื่อเกิดการสังยุค (conjugate) ระหว่างโครโมฟอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป

ส่วนประกอบของเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

1. แหล่งกำเนิดรังสี (Source) แหล่งกำเนิดรังสีในสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่นิยมใช้กันแพร่หลายมีดังนี้

1.1 หลอดไฮโดรเจนและหลอดควิที่เรียกความดันต่ำ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องที่ดีที่สุดตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 160 ถึง 360 นาโนเมตร มีทั้งประเภทใช้ศักดาไฟฟ้าสูง (2,200 ถึง 6,600 โวลต์) และประเภทใช้ศักดาไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ 40 โวลต์) หลอดชนิดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มสูงจนถึงความยาวคลื่นประมาณ 360 นาโนเมตร หลังจากนั้นความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว

1.2 หลอดทังสเตน ประกอบด้วยหลอดทังสเตนอยู่ในหลอดสูญญากาศซึ่งให้รังสีที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วง UV ใกล้ช่วงแสงที่เห็นได้จนถึงช่วง IR หลอดชนิดนี้มีราคาถูกและหาได้ง่ายในห้องทดลอง

2. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) โมโนโครเมเตอร์เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดคุณภาพของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทำหน้าที่แยกลำรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นลำรังสีความยาวคลื่นเดียว ในช่วงแสงที่เห็นได้อาจใช้ปริซึมแก้วส่วนในช่วงยูวีจำเป็นต้องใช้ปริซึมที่ทำด้วยควอตซ์สำหรับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีราคาแพงมักใช้โมโนโครเมเตอร์แบบ diffraction grating ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีร่องเป็นจำนวนมากและความกว้างของร่องใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสี

3. เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง ภาชนะใส่สารตัวอย่างสำหรับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะเรียกว่า เซลล์หรือคิวเวทท์ (cuvette) มีหลายแบบหลายขนาดด้วยกันขึ้นกับการใช้งาน หลักสำคัญในการ

เลือกใช้ก็คือ การวัดในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต จะต้องใช้เซลล์ที่ทำจากควอตซ์ (quartz) เท่านั้น เนื่องจากแก้วสามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ ส่วนเซลล์ที่ทำจากแก้วจะใช้วัดในช่วงแสงที่มองเห็นได้ นั้นหมายความว่าถ้าเราต้องการวัดสารในช่วงแสงที่มองเห็นได้ก็ควรจะใช้เซลล์ที่ทำจากแก้ว การใช้เซลล์ควอตซ์ไม่ได้มีผลให้การวัดแสงดีขึ้น แต่จะสิ้นเปลืองเปล่า ประโยชน์เพราะควอตซ์ราคาแพง กว่าแก้วมาก

4. เครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ ปัจจุบันเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ส่วนใหญ่ นิยมใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ 2 ชนิดคือ

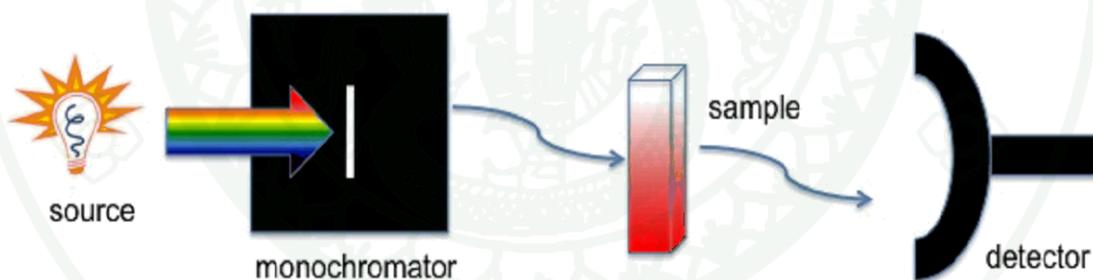
4.1 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube; PMT) หลอด PMT ประกอบไปด้วยแคโทด (cathode) ที่ฉาบผิวด้วยสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้เมื่อถูกแสงจำนวน 9 ชุด เรียกว่า ไดโนด (dynode) แต่ละ ไดโนดจะมีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อแสงตกกระทบกับไดโนดตัวที่ 1 สารที่ฉาบผิวจะเกิดอิเล็กตรอนขึ้นแล้ววิ่งไปกระทบไดโนดที่ 2 3 และ 4 จนครบทั้ง 9 ตัว ดังนั้นปริมาณอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นถึง 10^6-10^7 เท่า แล้วจึงชนแอโนดให้กระแสไฟฟ้าออกมาเข้าเครื่องขยายสัญญาณต่อไป

4.2 โฟโตไดโอดอาร์เรย์ (photodiode arrays; PDA) ตัวตรวจจับสัญญาณชนิดนี้สามารถจับสัญญาณได้ครอบคลุมทั้งสเปกตรัมโดยใช้ไดโอดนี้ มาเรียงต่อกันเป็นแถว ซึ่งสามารถวัดครอบคลุมสเปกตรัมได้ตั้งแต่ 200 ถึง 1100 นาโนเมตร ตัวตรวจจับสัญญาณนี้ประกอบไปด้วยโฟโตไดโอดและตัวเก็บประจุ (capacitor) ประมาณ 200 ถึง 4000 ตัวเรียงต่อกันเป็นแถว หลักการเริ่มต้นด้วยการให้ประจุผ่านผิวหน้าไดโอด ซึ่งไดโอดก็จะเก็บประจุไว้ที่ตัวเก็บประจุ เมื่อแสงตกลงบนไดโอดจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าไปทำลายประจุที่เก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุ ทำให้ต้องใส่ประจุเพิ่มเข้าไปใหม่ซึ่งเป็นช่วงของการสแกนแต่ละครั้งนั่นเอง ปริมาณของประจุที่ต้องใส่เข้าไปใหม่ จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มแสงที่วัดได้ของแต่ละ ไดโอด ดังนั้นจากการวัดปริมาณแสงที่แตกต่างกันตลอดช่วงความยาวคลื่นจะได้เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนของสารนั้นออกมา

5. เครื่องขยาย-แยกสัญญาณและประมวลผล เป็นการนำสัญญาณที่ได้มาประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้

ชนิดของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

1. สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงเดี่ยว เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ส่วนมากเป็นลำแสงเดี่ยวที่ใช้วัดในช่วงอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล อุปกรณ์มีทั้งหลอดทั้งสเคนและหลอดไฮโดรเจนที่เปลี่ยนสลับไปมาได้ ส่วนมากมีเครื่องวัดแสงชนิดหลอดมัลติพลายเออร์และมีเกรตติงโมโนโครเมเตอร์เป็นตัวเลือกความยาวคลื่น เครื่องมือชนิดนี้มีราคาไม่แพงมากนักและมีความไวปานกลาง แสงที่หลุดแยกออกมาอยู่ในระดับ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนมาเครื่องประเภทนี้พัฒนาไว้สำหรับวิเคราะห์เชิงปริมาณเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงเดี่ยวที่มีความแม่นยำสูงจะมีการเพิ่มอุปกรณ์เชิงแสงคุณภาพสูง เช่นแหล่งกำเนิดที่มีความเข้มสูงเข้าไปและองค์ประกอบที่มีคุณภาพสูงจำพวกระบบควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลจากเครื่องวัดแสงสามารถสแกนและการวัดการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารอ้างอิง การประมวลผลและการนำเสนอข้อมูลสามารถทำได้หลายอย่างเช่น ค่าถือของแอบซอร์เบ้นซ์ ค่าทรานสมิตเทนซ์ ค่าอนุพันธ์ การสแกนซ้ำหลายครั้ง การคำนวณค่าความเข้มข้น การหาตำแหน่งของยอดสูงสุดและความสูงของยอดสเปกตรัม

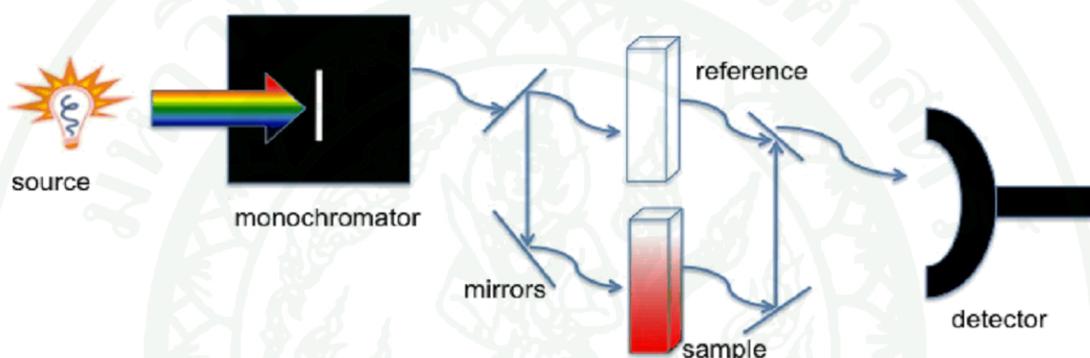


ภาพที่ 20 สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงเดี่ยว

ที่มา: Barron (2010)

2. สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงคู่จะใช้โมโนโครเมเตอร์แบบ double-pass ลำแสงจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดี่ยวอย่างมีประสิทธิภาพและความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก exit slit แล้วลำรังสีจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (beam chopper) เมื่อลำรังสีตกกระทบบครั้งวงกลมที่เป็นโลหะจะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ต่อมาลำแสงจะผ่านครึ่งวงกลมที่เป็นช่องว่างและทะลุไปผ่านสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ลำรังสีเดี่ยวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูก

อุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบบ phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไป ในการใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่ ไม่จำเป็นต้องอุ่นเครื่องนานเหมือนเครื่องแบบลำรังสีเดี่ยวทั้งนี้ เพราะไม่ว่าแหล่งกำเนิดรังสีจะให้ความเข้มสูงหรือต่ำเพียงใด ลำรังสีทั้งสองที่อุปกรณ์ตัดลำรังสีแยกออกคงมีความเข้มเท่ากันเสมอ นอกจากนี้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้มักจะมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณติดอยู่ด้วยและสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นไปตลอดเวลาพร้อมกับบันทึกสเปกตรัมในเวลาเดียวกันเครื่องแบบนี้จึงมีราคาค่อนข้างแพง



ภาพที่ 21 สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ลำแสงคู่

ที่มา: Barron (2010)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ไข่มุก

ตัวอย่างไข่มุกที่ใช้ในการทดลองมาจากไข่มุกหลายประเภทและสีของไข่มุกที่ทั้งมีสีธรรมชาติและสีจากการปรับปรุงคุณภาพ โดยไข่มุกที่ใช้ในการทดลองมีจำนวน 31 ตัวอย่างประกอบไปด้วย

- 1.1 ไข่มุกอะโกยาหรือไข่มุกญี่ปุ่น (akoya pearls or japanese pearls)
- 1.2 ไข่มุกเซาท์ซีหรือไข่มุกทะเลใต้ (south sea pearls)
- 1.3 ไข่มุกตาสีดำ (black pearl)
- 1.4 ไข่มุกน้ำจืด (fresh water pearls)

2. เครื่องชั่งไฟฟ้าวัดค่าความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะเป็นสมบัติสำคัญอีกอย่างของอัญมณี ซึ่งสามารถทดสอบหาค่าได้โดยไม่ทำลายอัญมณีและเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการวิเคราะห์การหาค่าความถ่วงจำเพาะของไข่มุกหาได้จากเครื่องชั่งไฟฟ้าของ Precisa รุ่น XT-220 A ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 22 ตาชั่งไฟฟ้าวัดค่าความถ่วงจำเพาะ

3. เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ของ Avaspec 2048 ใช้วัดสเปกตรัมได้ในช่วงความยาวคลื่น 360 ถึง 1100 นาโนเมตร มีอุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นในรูปแบบ Czerny-Turner มีความหนาแน่นร่องของเกรตติง 300 เส้นต่อมิลลิเมตร ความยาวโฟกัส 75 มิลลิเมตร ช่องรับแสงเข้าสเปกโทรมิเตอร์ขนาด 50 ไมโครเมตร ความไวในการวัดสัญญาณ 20,000 หน่วยต่อไมโครวัตต์ต่อเวลาในการวัด 1 ms ตัวตรวจวัดแบบ CCD แถวเดียวขนาด 2048 พิกเซล อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 16 บิตที่ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบ USB 2.0 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอย่างน้อย 200:1 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นหลอดกำเนิดแสงแบบทั้งสแตนดาร์ดฮาโลเจน มีความคงที่ของการกำเนิดแสง (Stability) เท่ากับ ± 0.1 เปอร์เซ็นต์ หลอดใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง 12.7 โวลต์ กระแส 0.9 A ตัวเครื่องใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์ กระแส 1.25 แอมป์ โพรบวัดการสะท้อนแสงใช้วัดแสงได้ในช่วง 350 ถึง 2000 นาโนเมตร ภายในโพรบประกอบด้วยเส้นใยนำแสงขนาด 200 ไมโครเมตร จำนวน 7 เส้น และมีช่องเปิดรับแสงในแต่ละเส้นเท่ากับ 0.22 สายโพรบมีความยาว 2 เมตร หัวเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์และแหล่งกำเนิดแสงเป็นชนิด SMA 905 ส่วนปลายของตัวโพรบทำด้วยโลหะสแตนเลสและลำตัวโพรบหุ้มด้วยแผ่นทองเหลืองชุบโครเมียมแบบเกลียว วัสดุอ้างอิงทำจากวัสดุพลาสติกชนิด PTFE ตัวแผ่นมีขนาดหนา 10 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร มีค่าการสะท้อนแสงประมาณ 98 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความยาวคลื่น 350 ถึง 1800 นาโนเมตร และมากกว่า 92 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงความยาวคลื่น 250 ถึง 2500 นาโนเมตร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 23 อุปกรณ์เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ก) แหล่งกำเนิดแสง (ข) สเปกโทรมิเตอร์ (ค) วัสดุอ้างอิง (ง) โพรบวัดการสะท้อนแสง



(ค)

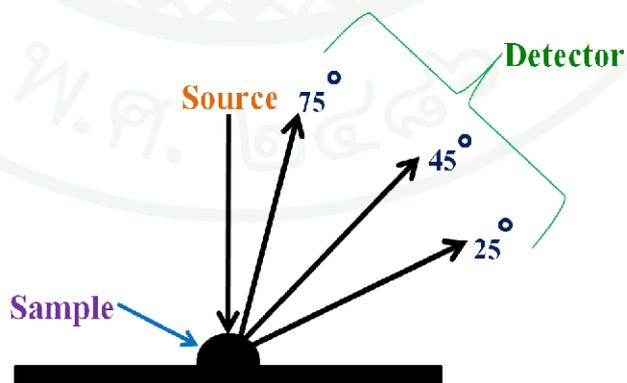


(ง)

ภาพที่ 23 (ต่อ)

วิธีการ

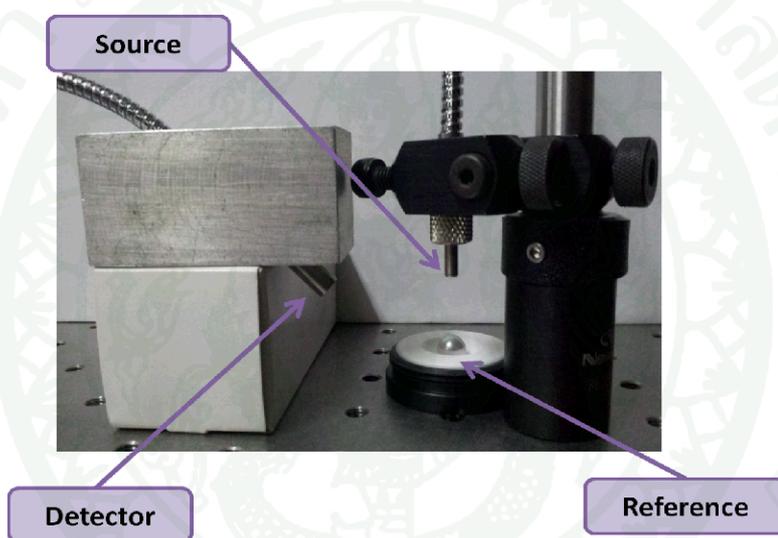
การวิเคราะห์สีของไข่มุกโดยใช้เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีไปใช้งานเครื่องมือนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจาก ตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65 ช่วงความยาวคลื่นที่ 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เนื่องจากไข่มุกมีลักษณะพื้นผิวมันวาวการวัดสีจึงใช้มุมการวัดรับแสงซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM ที่มุม 25, 45 และ 75 และมุมฉายแสงที่ 90 ดังรูป ในการทดลองจะเริ่มจากมุมรับแสง 25 เมื่อทำการวัดครบทุกตัวอย่างจึงเปลี่ยนมุมรับแสงเป็น 45 และมุม 75 ตามลำดับ



ภาพที่ 24 รูปแบบการวัดไข่มุก

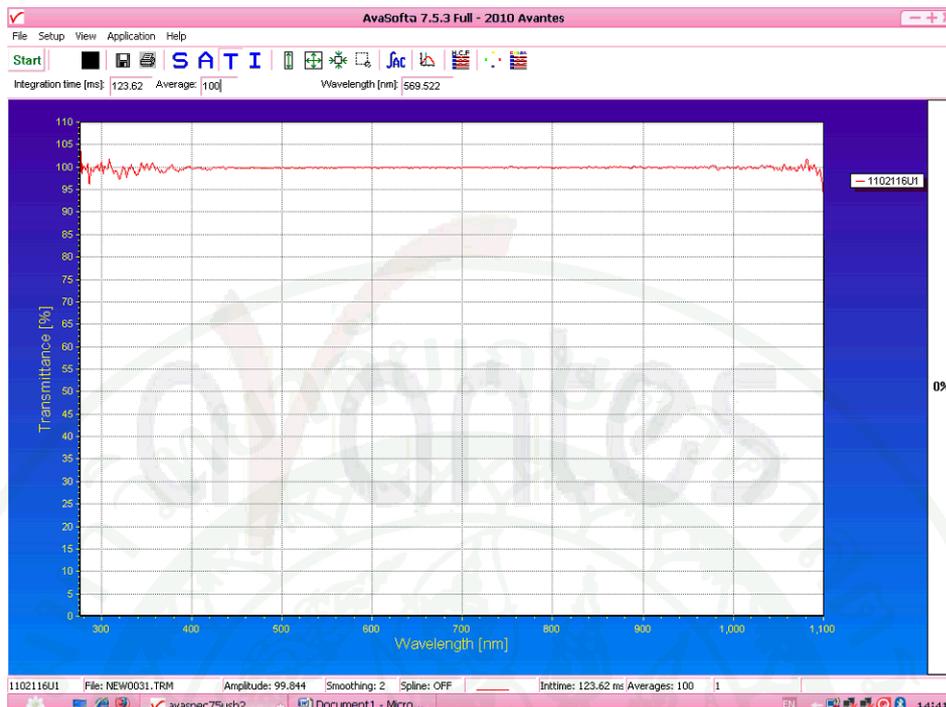


ภาพที่ 25 อุปกรณ์ทำมุมรับแสง

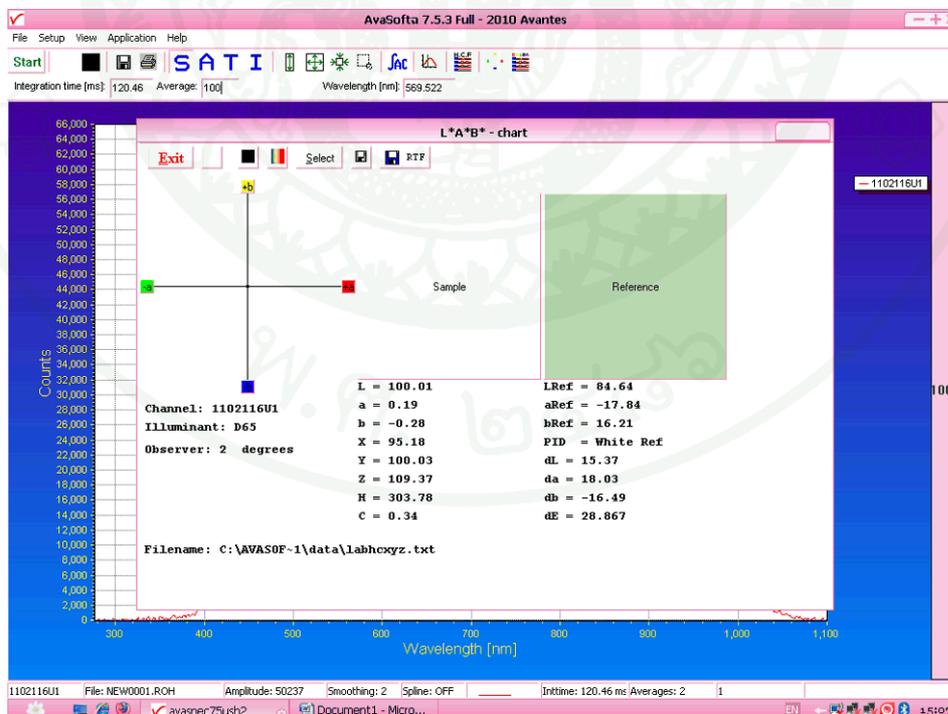


ภาพที่ 26 วิธีการวัดไข่มุก

ก่อนทำการวัดทุกครั้งให้ตรวจสอบสเปกตรัมให้มีค่าการส่งผ่าน 100% ดังภาพที่ 26 และกำหนดค่า integration time ที่ประมาณ 120 ms เพื่อให้ระยะระหว่าง fiber optic ของแหล่งกำเนิดกับวัสดุอ้างอิง(reference) ของมุม 25° 45° และ 75° มีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นวางตัวอย่างไข่มุกบนวัสดุอ้างอิง (reference Tile) ซึ่งการวัดไข่มุกในแต่ละตัวอย่างจะทำการหมุนตัวอย่างเป็นจำนวน 30 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าแปรปรวนการดูดกลืนแสงบนพื้นผิวของไข่มุกทั้งหมด เนื่องจากพื้นผิวของไข่มุกมีความไม่สม่ำเสมอรวมถึงรูปร่างและสีของไข่มุกซึ่งเป็นธรรมชาติของไข่มุกเอง โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณสเปกตรัมการดูดกลืนแสงคือโปรแกรม Avasoft ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณค่าสเปกตรัมฟังก์ชัน colour chart ผลที่ได้สามารถวัดค่าตัวแปรของสีตามมาตรฐาน CIE 1976 ก็คือค่า L^* , a^* , b^* , H , C , X , Y , Z , dL , da , db , dE ได้โดยใช้มุมการสังเกตการณ์ที่ 2° ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 27 สเปกตรัมการส่งผ่านที่ 100% โดยโปรแกรม Avasoft



ภาพที่ 28 การแสดงค่า CIELAB

ผลและวิจารณ์

การทดลองวัดสีของไข้ตัวอย่างไข่มุก 31 ตัวอย่างโดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ไข่มุกสีธรรมชาติแสดงในตารางที่ 1 และไข่มุกผ่านการปรับปรุงคุณภาพแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ไข่มุกสีธรรมชาติ

ตัวอย่าง	รูปไข่มุก	ประเภท	สี	ขนาด (มิลลิเมตร)	ความ ถ่วงจำเพาะ
A1		ไข่มุกอะโกยา	สีเทา-ชมพู	9	2.694
A2		ไข่มุกอะโกยา	สีเทา-ชมพู	7	2.693
A3		ไข่มุกอะโกยา	สีเหลือง	6	2.665
A4		ไข่มุกอะโกยา	สีเหลืองอมชมพู	8	2.698
A5		ไข่มุกอะโกยา	สีเหลือง	7	2.750
A6		ไข่มุกอะโกยา	สีเหลืองอมเทา	8	2.693
A7		ไข่มุกอะโกยา	สีขาวอมชมพู	7	2.716

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	รูปไข่มุก	ประเภท	สี	ขนาด (มิลลิเมตร)	ความ ถ่วงจำเพาะ
A8		ไข่มุกอะโกยา	สีขาวอมชมพู	8	2.700
A9		ไข่มุกอะโกยา	สีขาวอมชมพู	7	2.679
B1		ไข่มุกตาสีติ	สีเทา-เหลือง	9	2.516
B2		ไข่มุกตาสีติ	สีเทา	14	2.371
B3		ไข่มุกตาสีติ	สีน้ำตาลเข้ม	9	2.708
B4		ไข่มุกตาสีติ	สีน้ำตาลเข้ม	11	2.599
D1		ไข่มุกเซาท์ซี	สีขาว	12	2.713
E1		ไข่มุกเซาท์ซี	สีทอง	8	2.698
C1		ไข่มุกน้ำจืด	สีส้มอมชมพู	7	2.648
C2		ไข่มุกน้ำจืด	สีส้ม	7	2.636

ตารางที่ 1 (ต่อ)

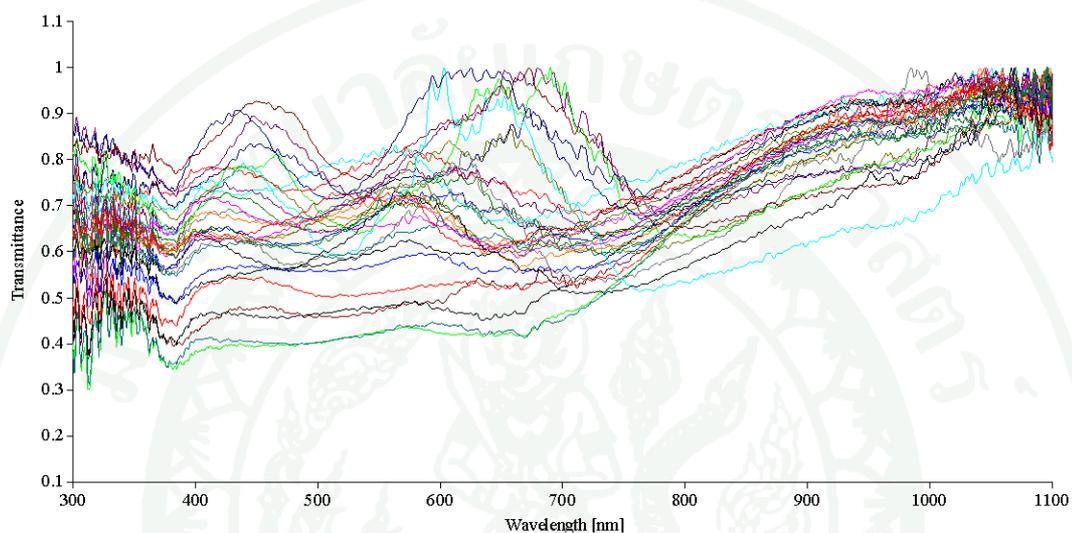
ตัวอย่าง	รูปไข่มุก	ประเภท	สี	ขนาด (มิลลิเมตร)	ความ ถ่วงจำเพาะ
C3		ไข่มุกน้ำจืด	สีขาวอมเหลือง	8	2.629
C4		ไข่มุกน้ำจืด	สีขาวอมเหลือง	13	2.248
C5		ไข่มุกน้ำจืด	สีขาวอมชมพู	9	2.667
C6		ไข่มุกน้ำจืด	สีขาวอมชมพู	15	2.725
C7		ไข่มุกน้ำจืด	สีส้ม	7	2.651
C8		ไข่มุกน้ำจืด	สีม่วง	8	2.657
C9		ไข่มุกน้ำจืด	สีขาว	8	2.713

ตารางที่ 2 ไข่มุกปรับปรุงคุณภาพ

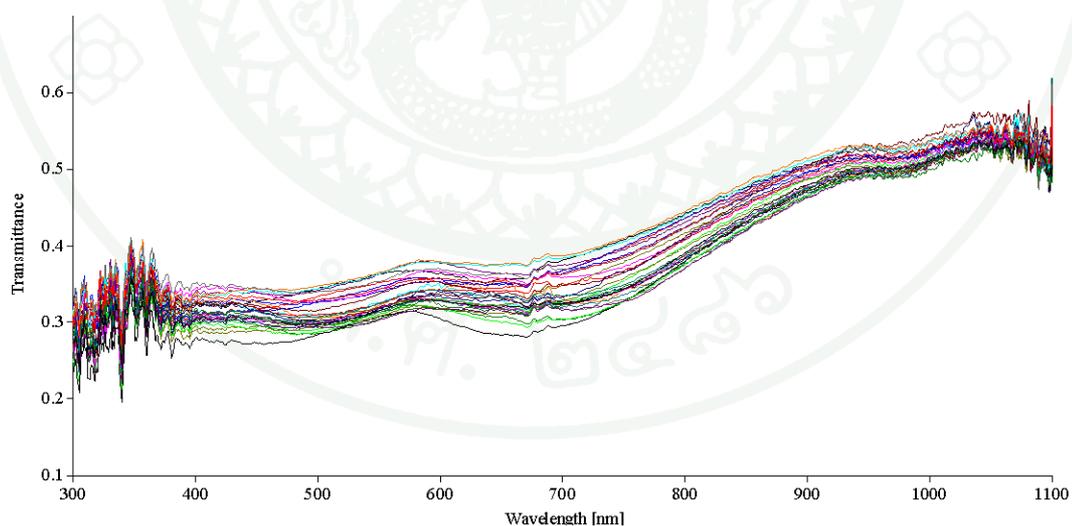
ตัวอย่าง	รูปไข่มุก	ประเภท	สี	ขนาด (มิลลิเมตร)	ความ ถ่วงจำเพาะ
F1		ไข่มุกเซาท์ซี	สีทอง	12	2.723
F2		ไข่มุกเซาท์ซี	สีทอง	8	2.701
F3		ไข่มุกเซาท์ซี	สีทอง	8	2.711
G1		ไข่มุกอะโกยา	สีเทาอมชมพู	8	2.588
H1		ไข่มุกตาฮิติ	สีเขียวอมทอง	12	2.742
I1		ไข่มุกตาฮิติ	สีน้ำตาล	13	2.685
I2		ไข่มุกตาฮิติ	สีน้ำตาลเข้ม	12	2.681

ผลการวัดสเปกตรัมโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

A1 ไข่มุกประเภทอะโกยามิสีเทาเหลืองชมพูสีของไข่มุกก่อนล้างสีสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่เรียบ มีปุ่มออกมาและรูปร่างค่อนข้างกลม



(ก)

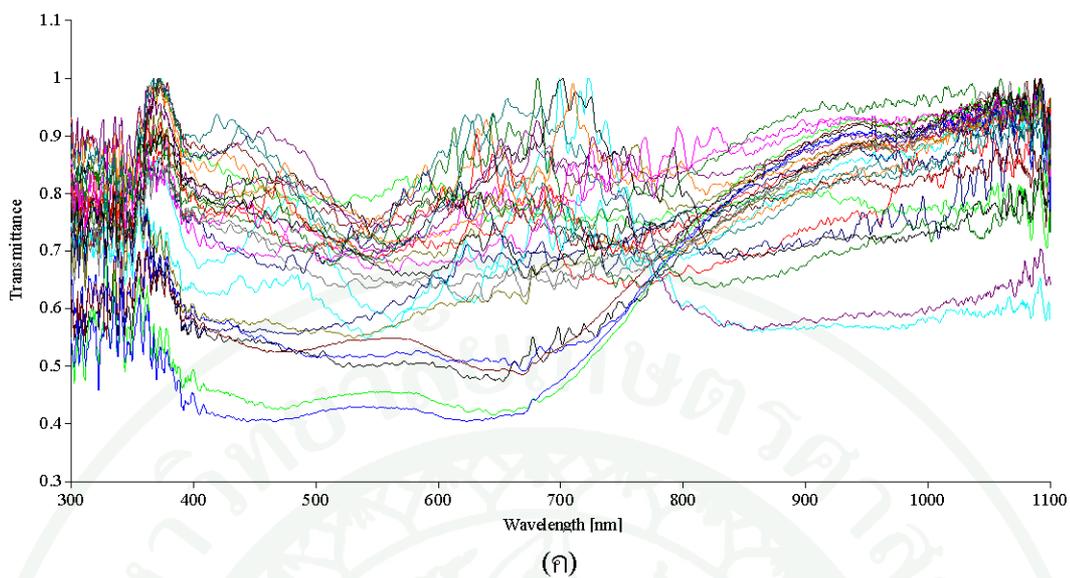


(ข)

ภาพที่ 29 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก A1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°

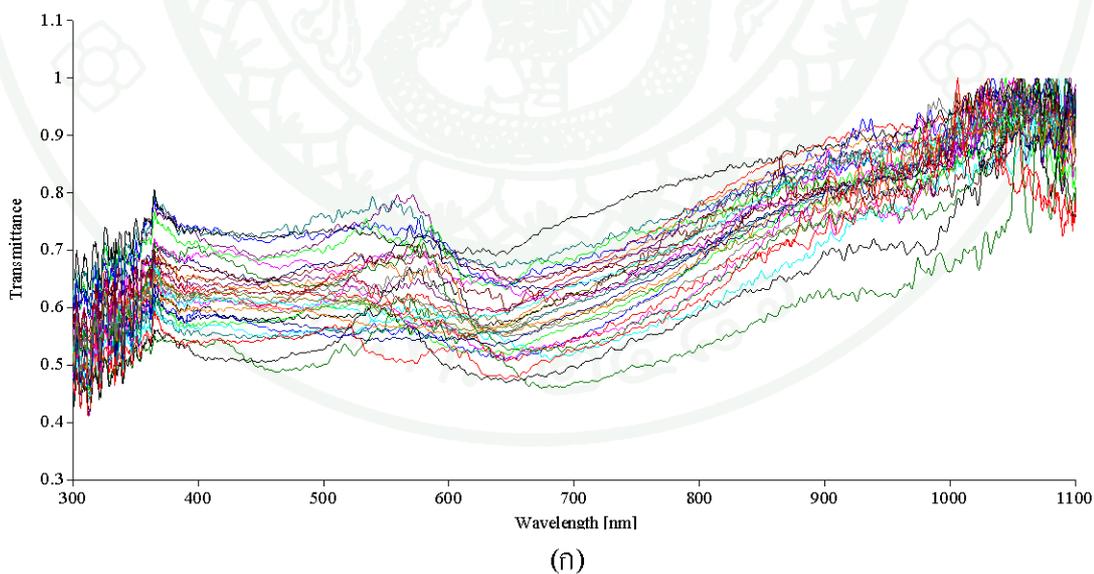
(ข) สเปกตรัมของไข่มุก A1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของไข่มุก A1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°

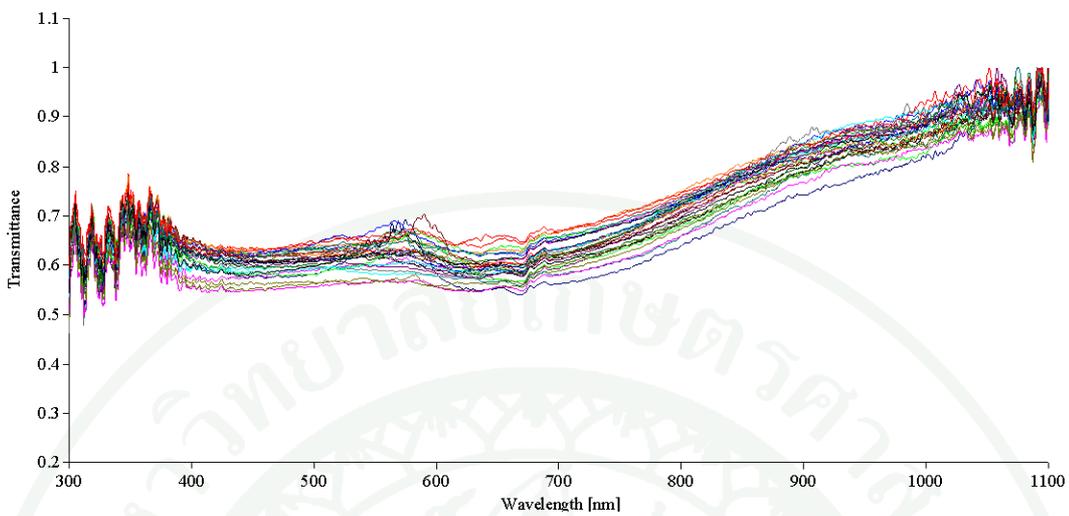


ภาพที่ 29 (ต่อ)

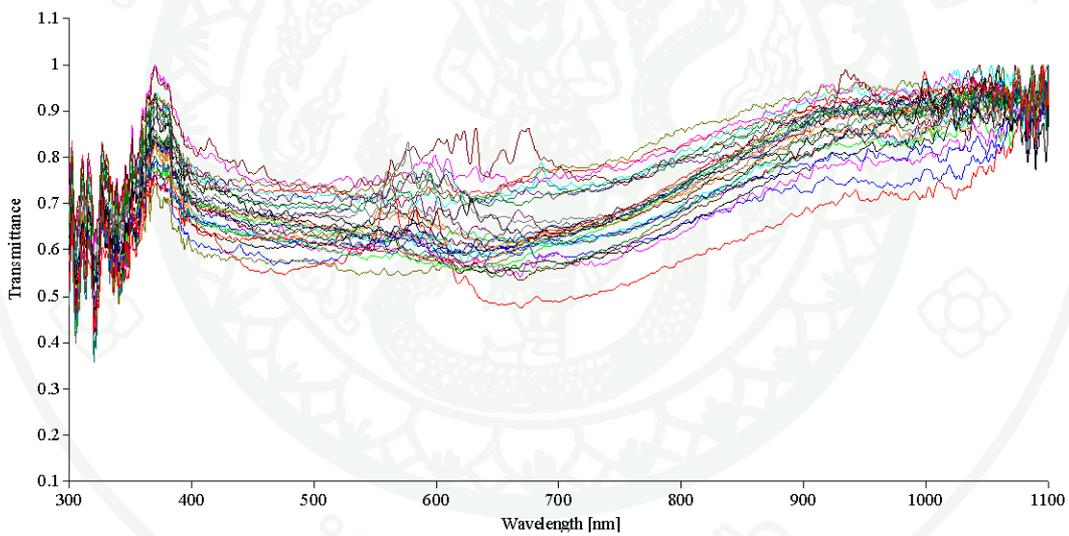
A2 ไข่มุกประเภทอะ โดયા สีเทาเหลืองชมพูสีผิวไข่มุกไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะค่อนข้างเรียบ และรูปร่างกลม



ภาพที่ 30 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก A2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของไข่มุก A2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของไข่มุก A2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



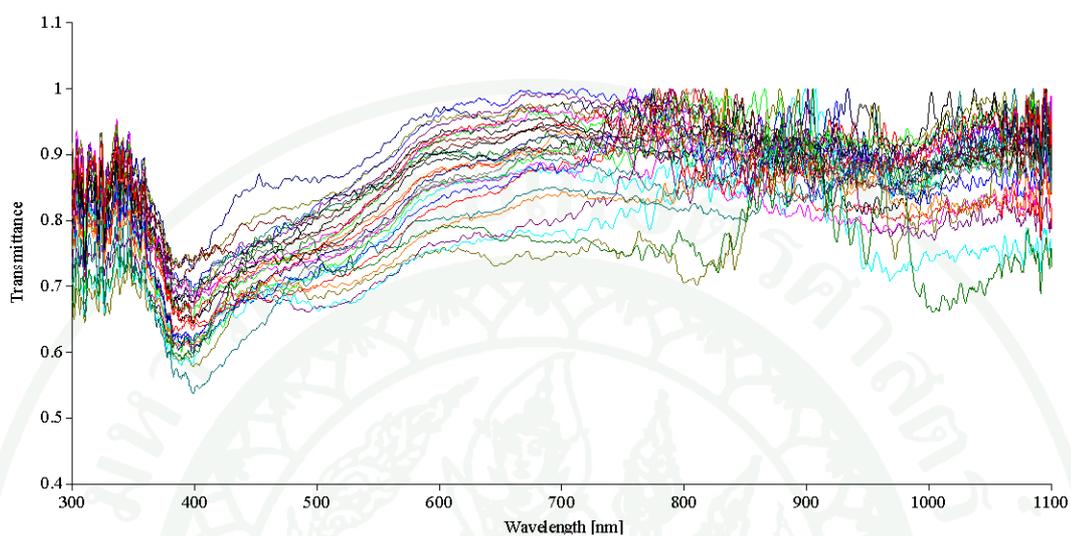
(ก)



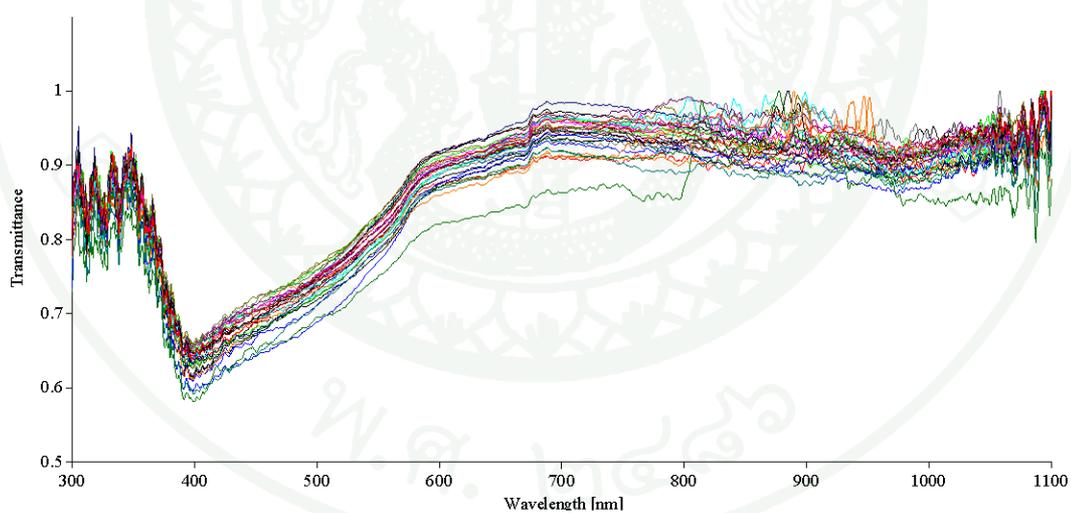
(ข)

ภาพที่ 30 (ต่อ)

A3 ไข่มุกประเภทอะโกยามีสีเหลืองอมส้มสีผิวไข่มุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะค่อนข้างเรียบเกือบทั้งเม็ดและรูปร่างค่อนข้างกลม

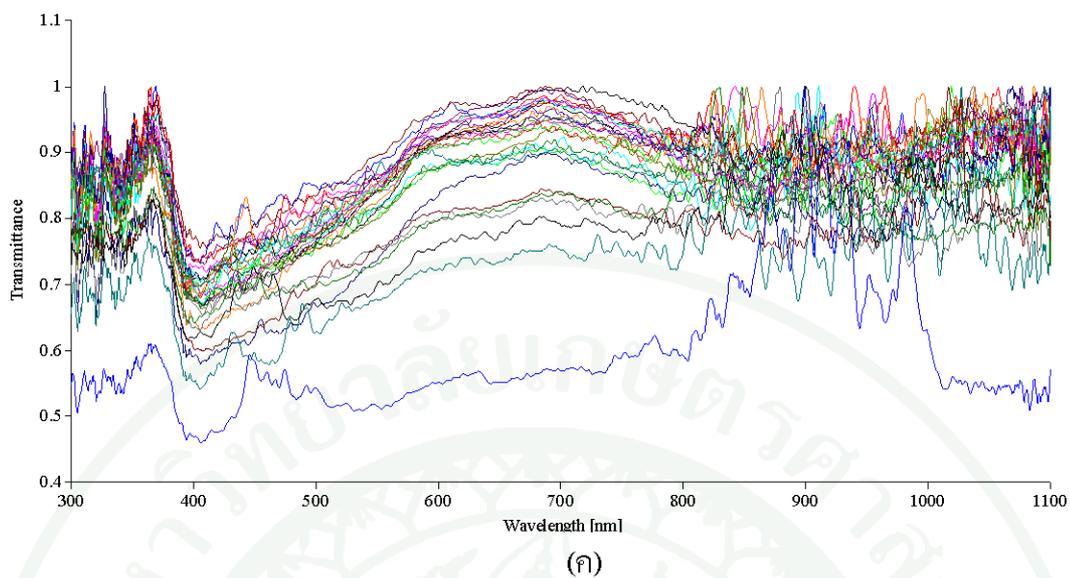


(ก)



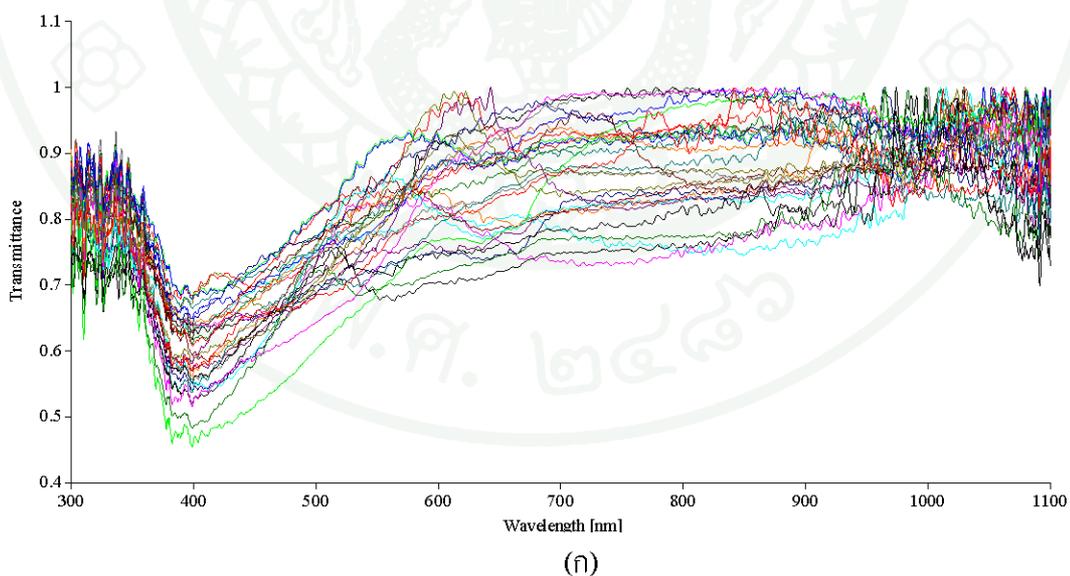
(จ)

ภาพที่ 31 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก A3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (จ) สเปกตรัมของไข่มุก A3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของไข่มุก A3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



ภาพที่ 31 (ต่อ)

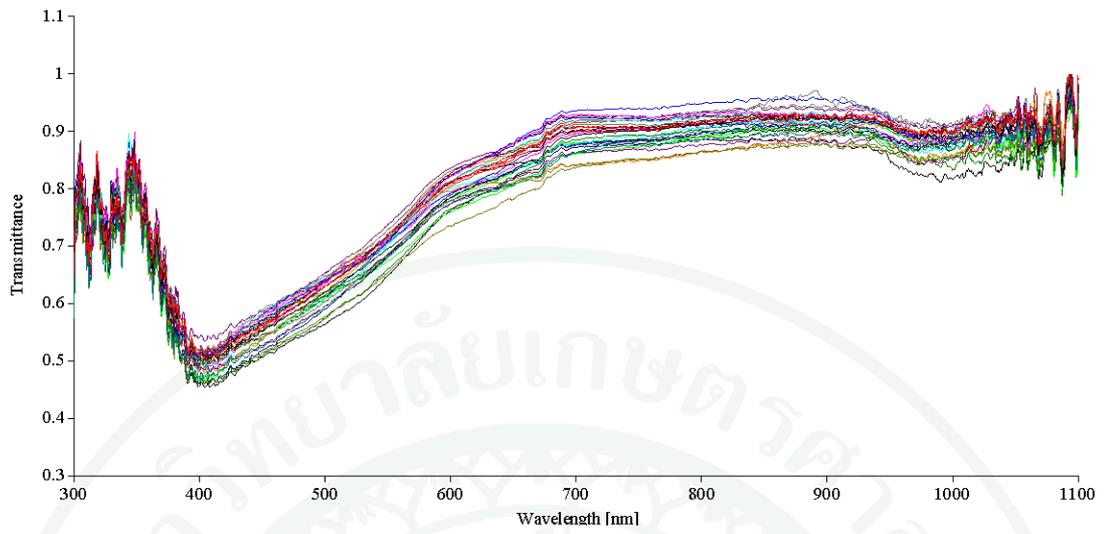
A4 ไข่มุกประเภทอะโกยามิสีเหลืองเหลืองบชมพูนุสีผิวไข่มุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวไม่เรียบบางบริเวณมีลักษณะจุดดำ



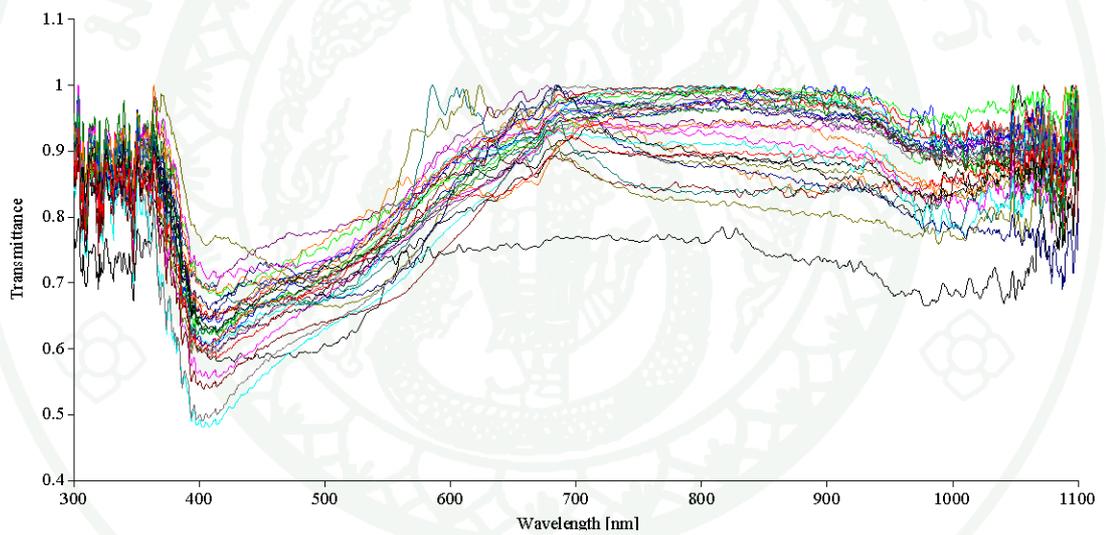
ภาพที่ 32 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก A4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°

(ข) สเปกตรัมของไข่มุก A4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของไข่มุก A4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



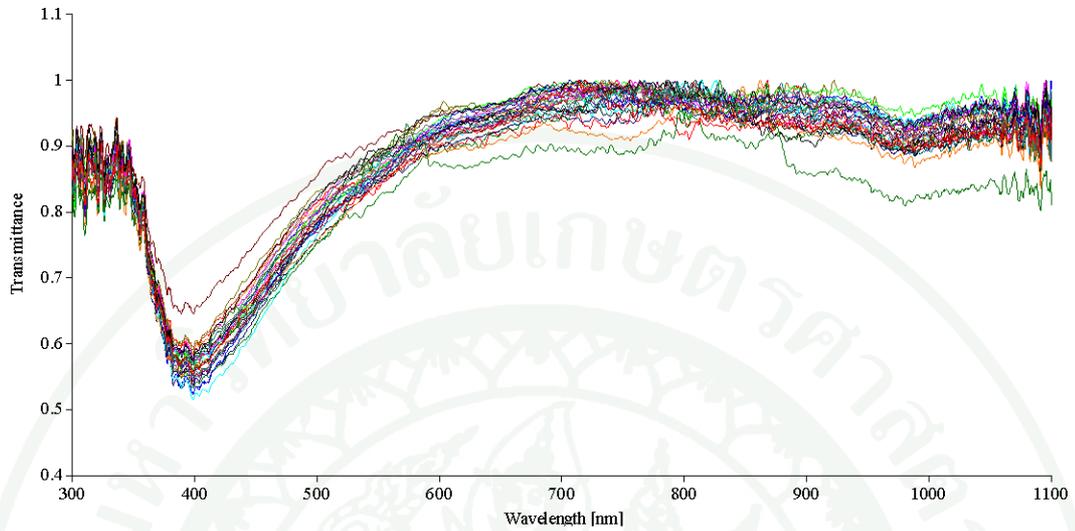
(ก)



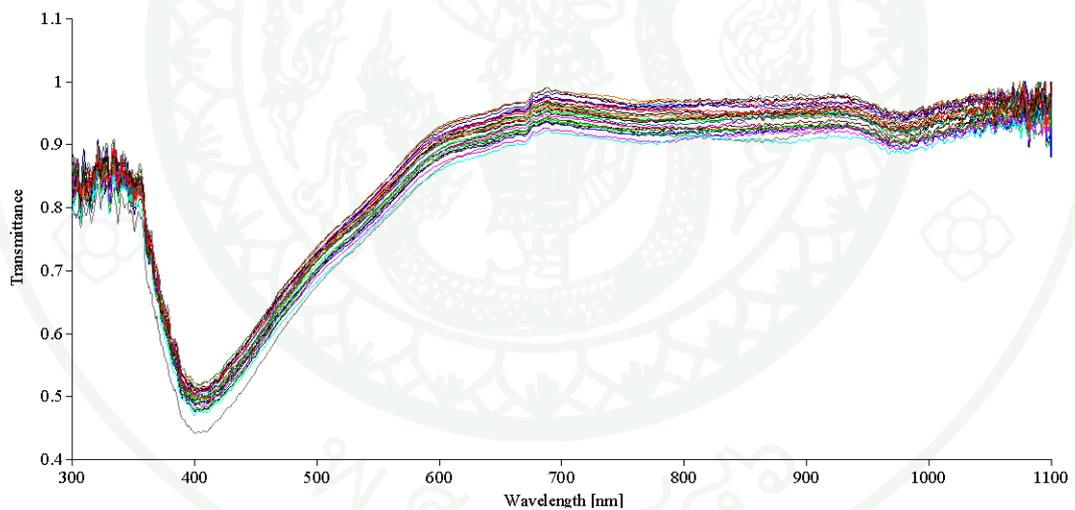
(ข)

ภาพที่ 32 (ต่อ)

A5 ใ้แง่มุกประเภทอะ โทยกามีสีเหลืองครีมสีผิวสมำ้เสมอ ใ้้นผิวลักษณะเรียบและรูปร่างกลม

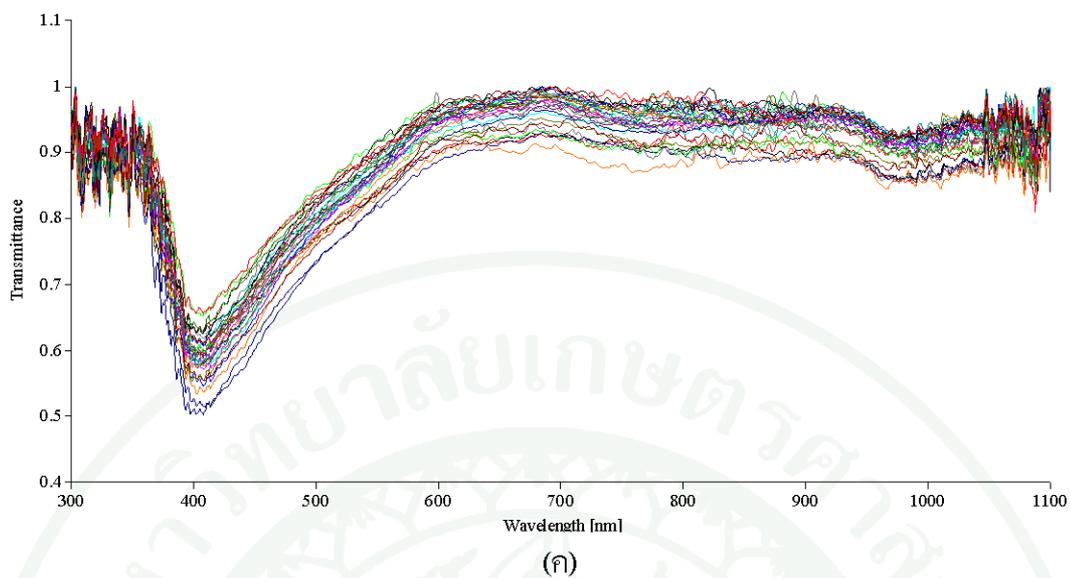


(ก)



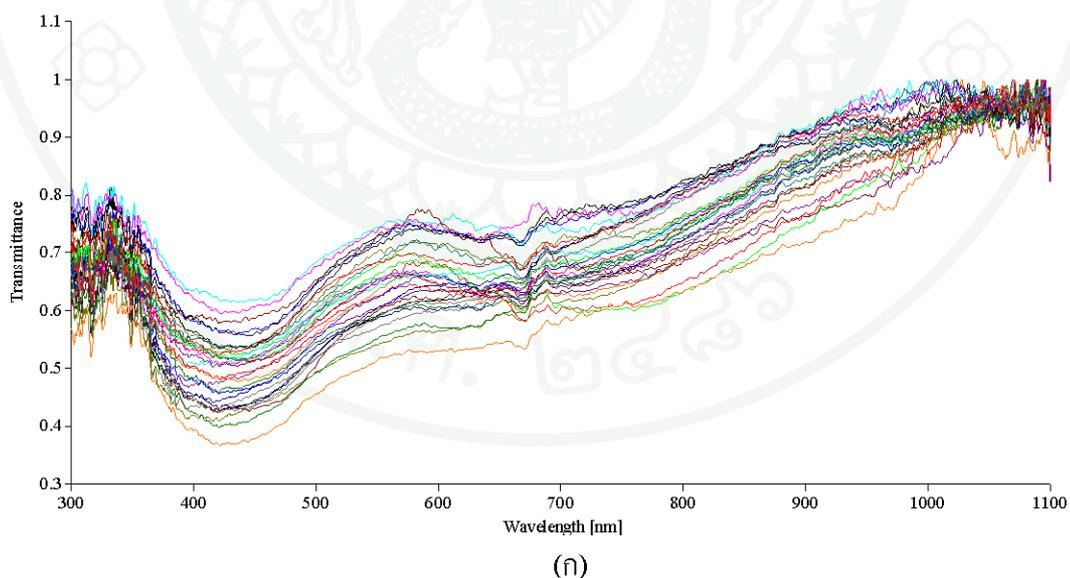
(ข)

ภาพที่ 33 (ก) สเปกตรัมของใ้แง่มุก A5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใ้แง่มุก A5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้แง่มุก A5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°

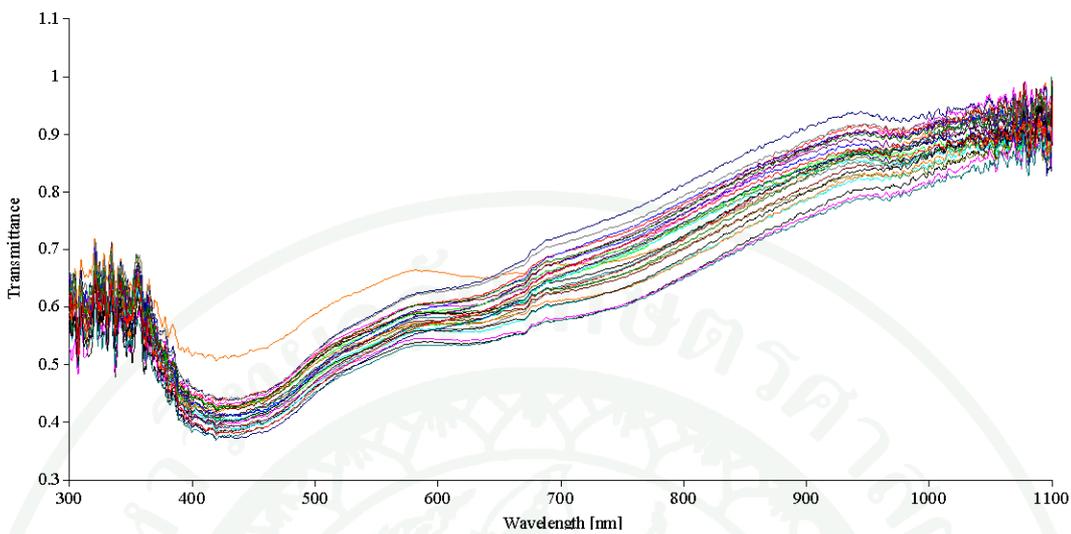


ภาพที่ 33 (ต่อ)

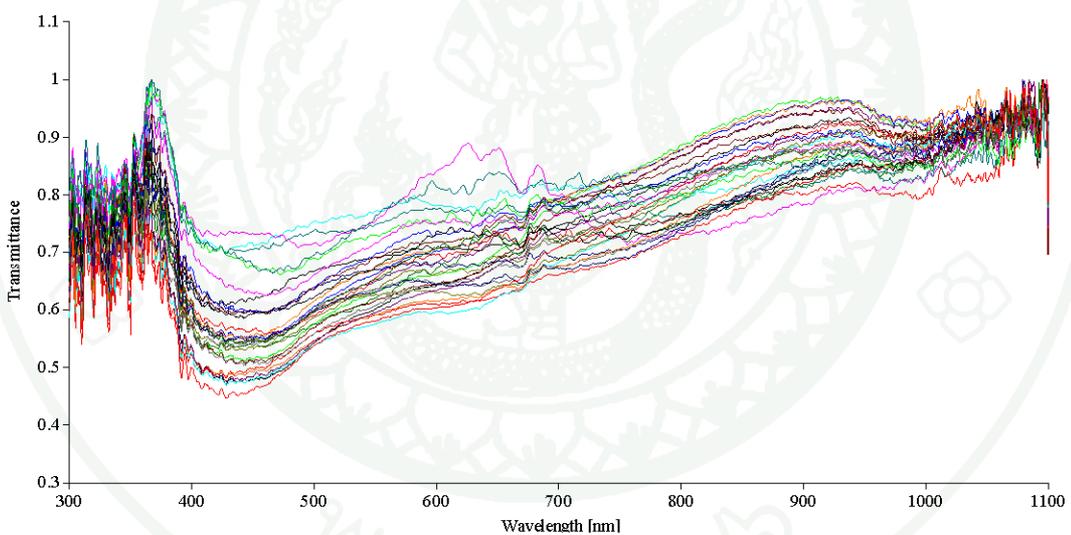
A6 ไข่มุกประเภทอะโกยามีสีเหลืองเหลืองเทา สีผิวไข่มุกไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวไม่เรียบและรูปร่างค่อนข้างกลม



ภาพที่ 34 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก A6 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของไข่มุก A6 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของไข่มุก A6 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



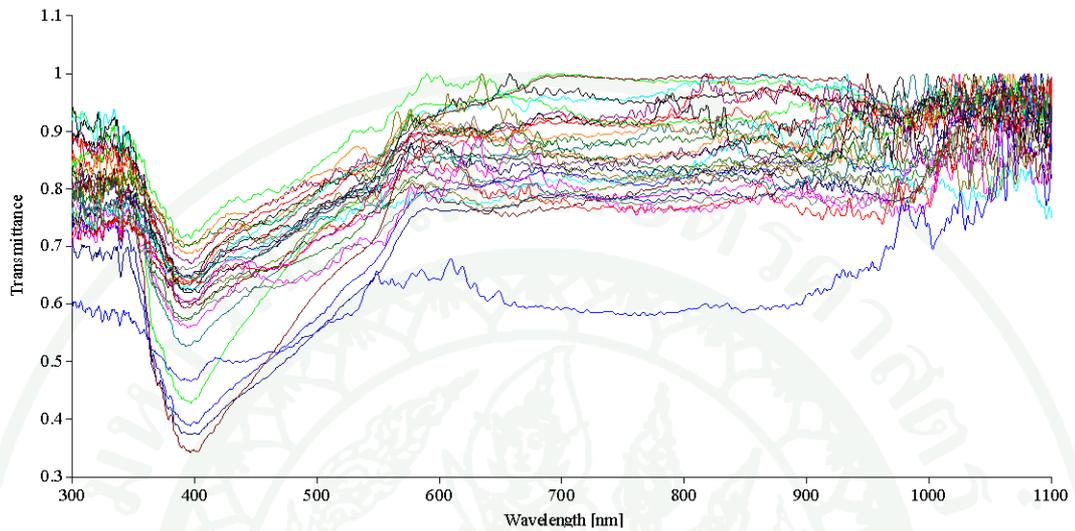
(จ)



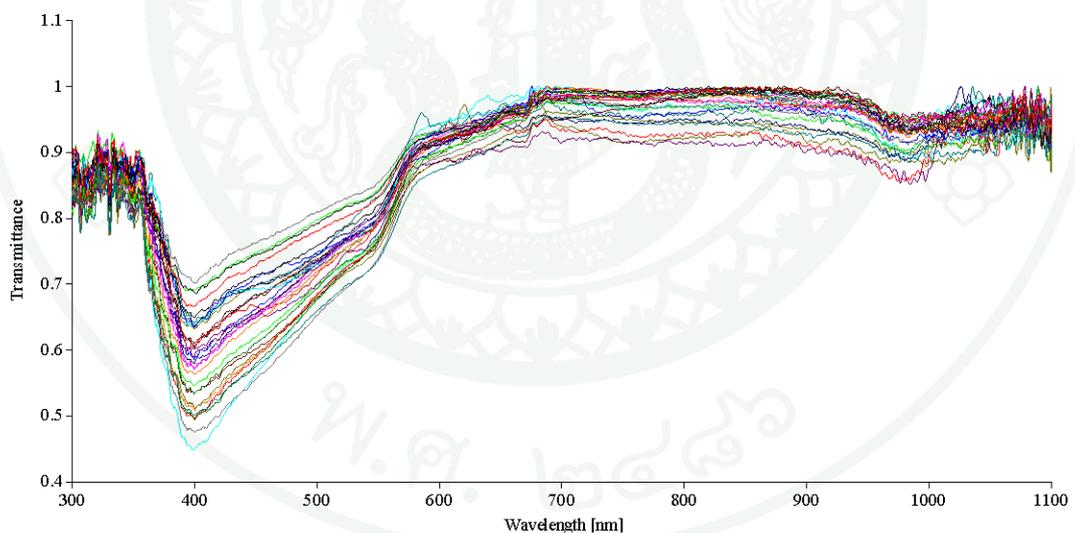
(ก)

ภาพที่ 34 (ต่อ)

A7 ใ้แง่มุกประเภทอะโกยามีสีเหลืองเหลืองหมอมหุสึฝิวใ้แง่มุกสม้่าเสมอ พื้นผิวลักษณะเรียบและรูปร่างกลมแต่มีการค้ดใ้แง่มุกออกบางส่วน

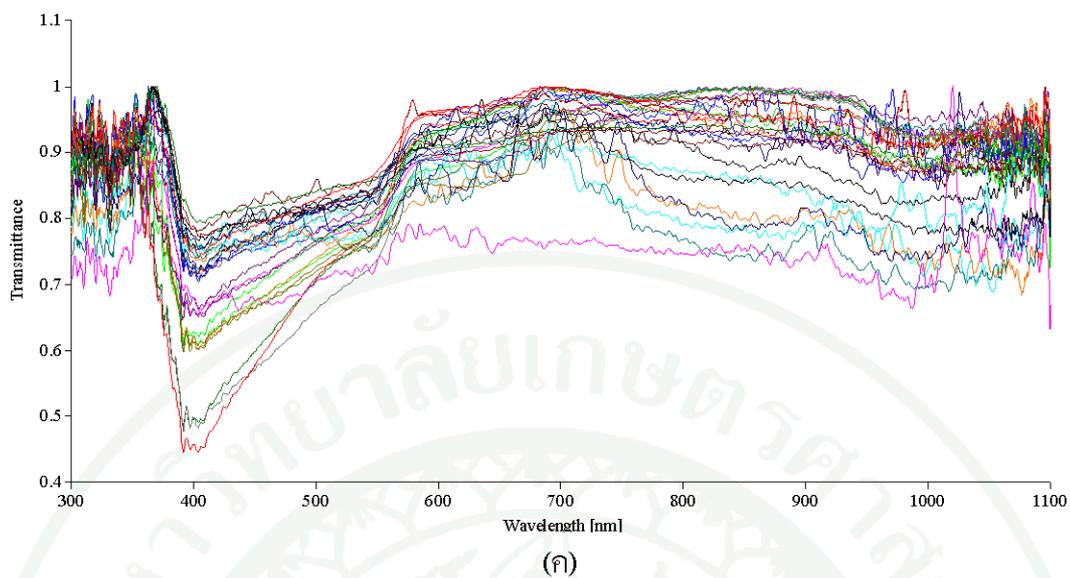


(ก)



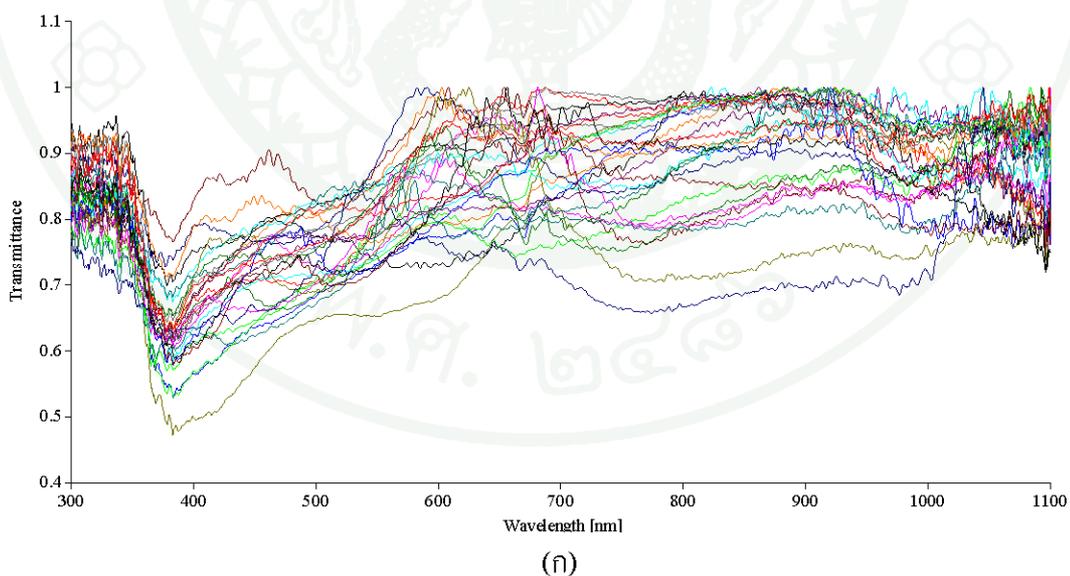
(จ)

ภาพที่ 35 (ก) สเปกตรัมของใ้แง่มุก A7 วดัโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (จ) สเปกตรัมของใ้แง่มุก A7 วดัโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้แง่มุก A7 วดัโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°

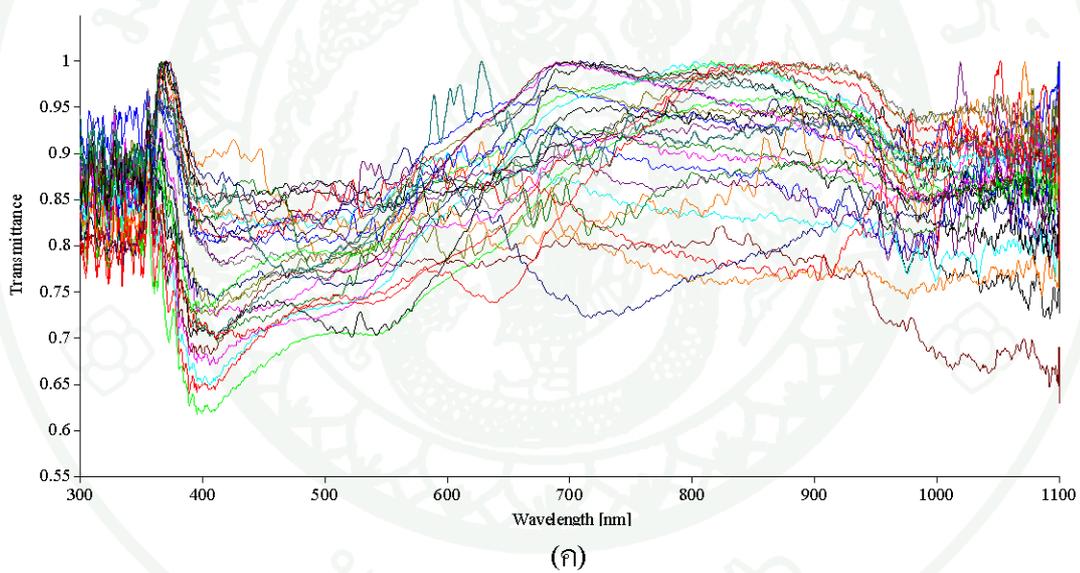
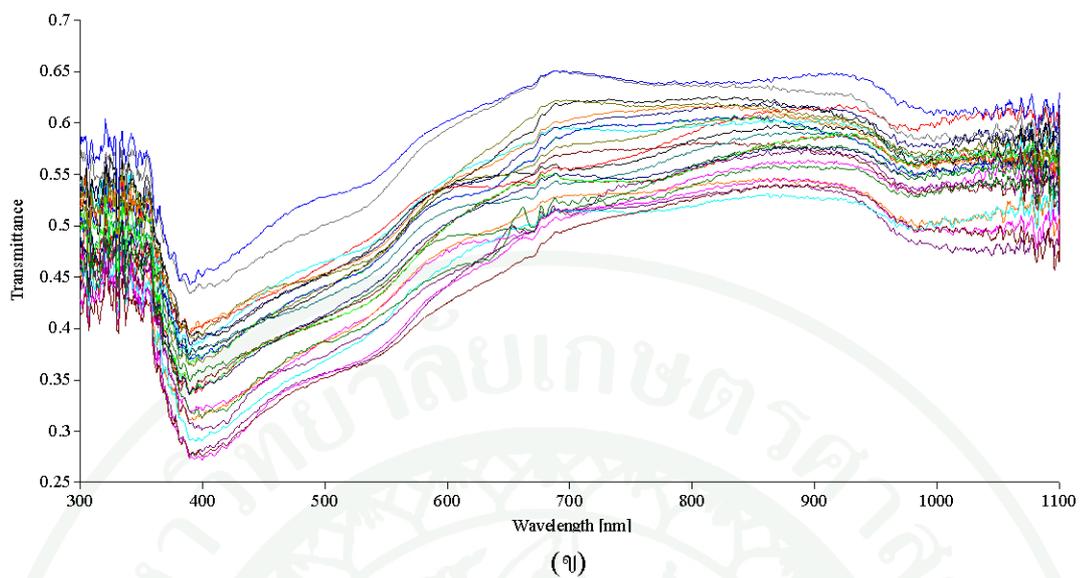


ภาพที่ 35 (ต่อ)

A8 ใข้มุกประเภทอะโกยามีสีขาวเหลืองบรรมพู่สีผิวใข้มุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่สม่ำเสมอและรูปร่างบิดเบี้ยวอย่างชัดเจน

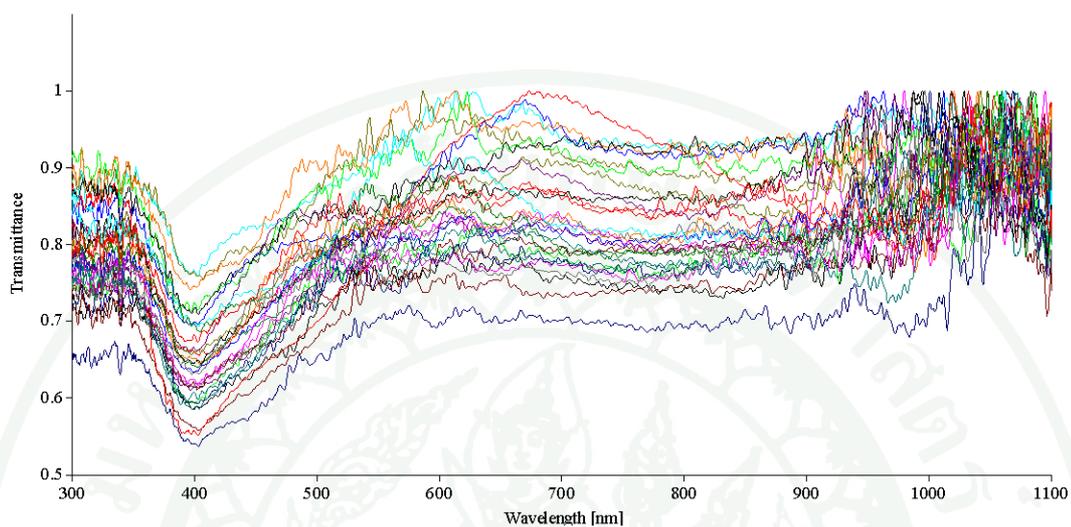


ภาพที่ 36 (ค) สเปกตรัมของใข้มุก A8 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใข้มุก A8 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใข้มุก A8 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°

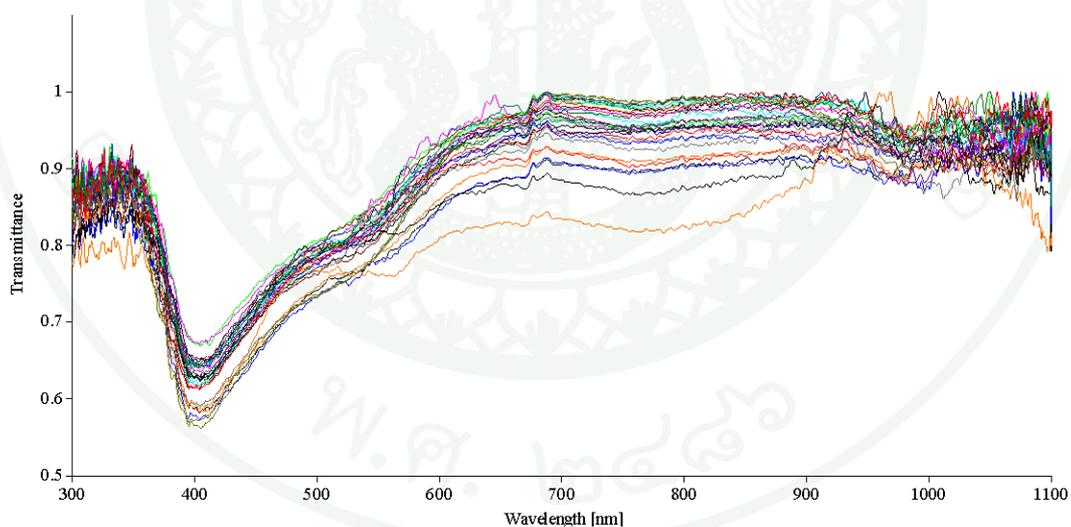


ภาพที่ 36 (ต่อ)

A9 ใ้่มุกประเภทอะ โทยามีสีครีมเหลืองชมพูสีผิวใ้่มุกสีน้ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่สม่ำเสมอมีปุ่มยื่นออกมาและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน

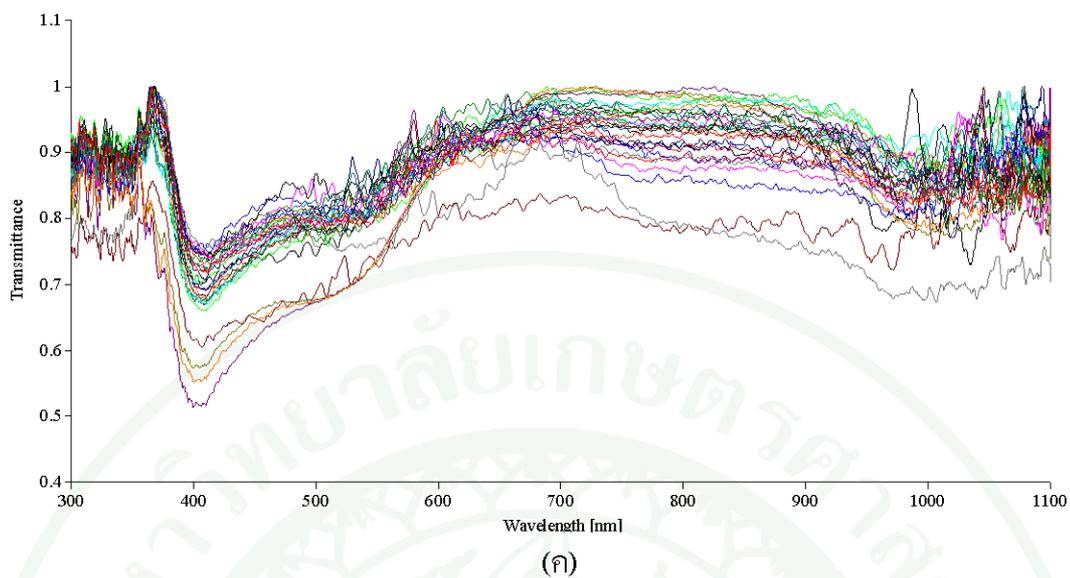


(ก)



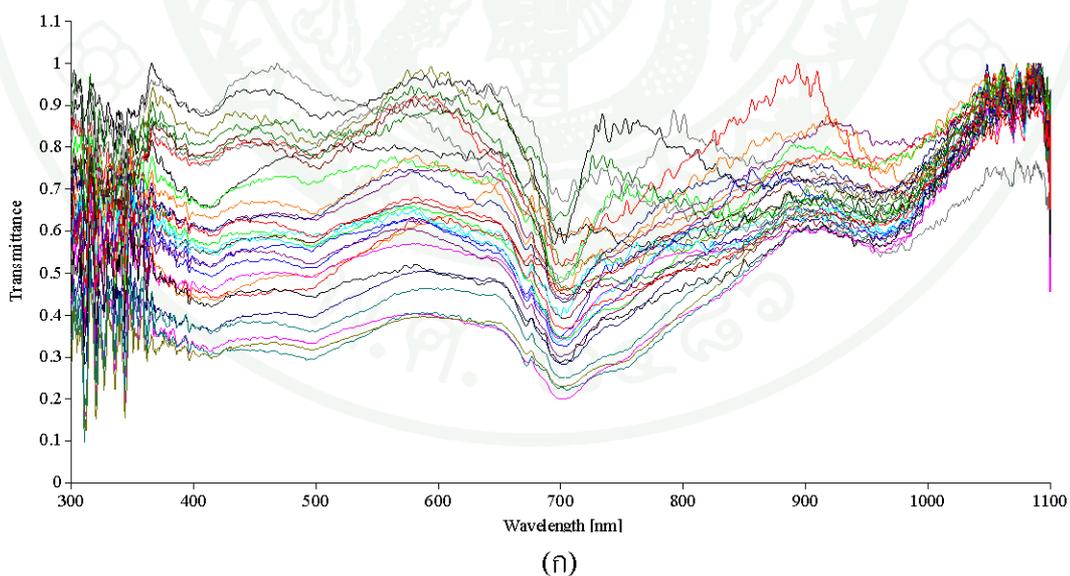
(ข)

ภาพที่ 37 (ก) สเปกตรัมของใ้่มุก A9 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใ้่มุก A9 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้่มุก A9 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



ภาพที่ 37 (ต่อ)

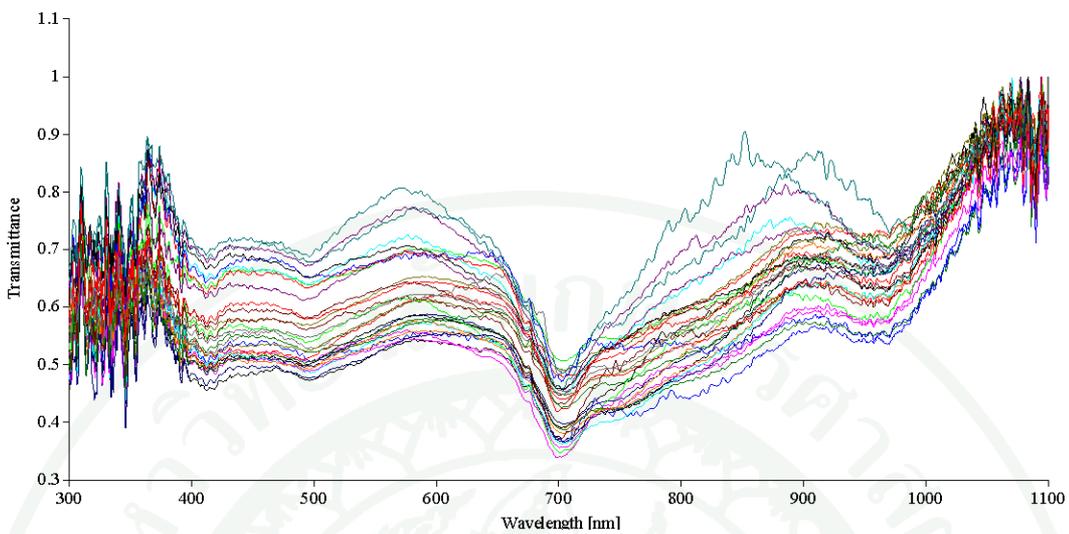
B1 ใม่กประเภทคาคิติมีสีเทาเหลือบทองสีผิวใม่กก่อนข้างสม่าเสมอ พื้นผิวลักษณะใม่สม่าเสมอ และรูปร่างบิดเบี้ยวอย่างชัดเจน



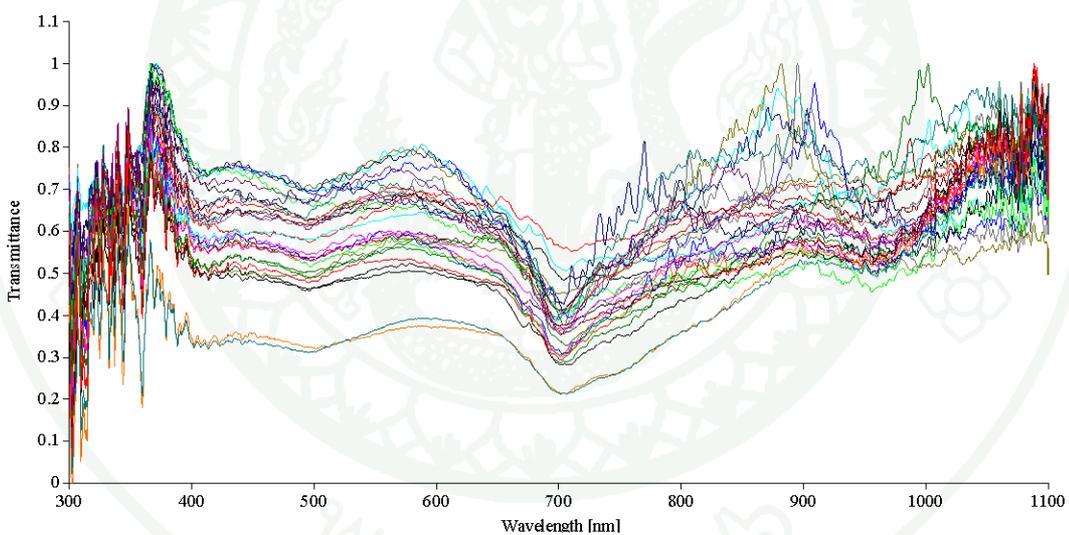
ภาพที่ 38 (ค) สเปกตรัมของใม่ก B1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°

(ข) สเปกตรัมของใม่ก B1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของใม่ก B1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



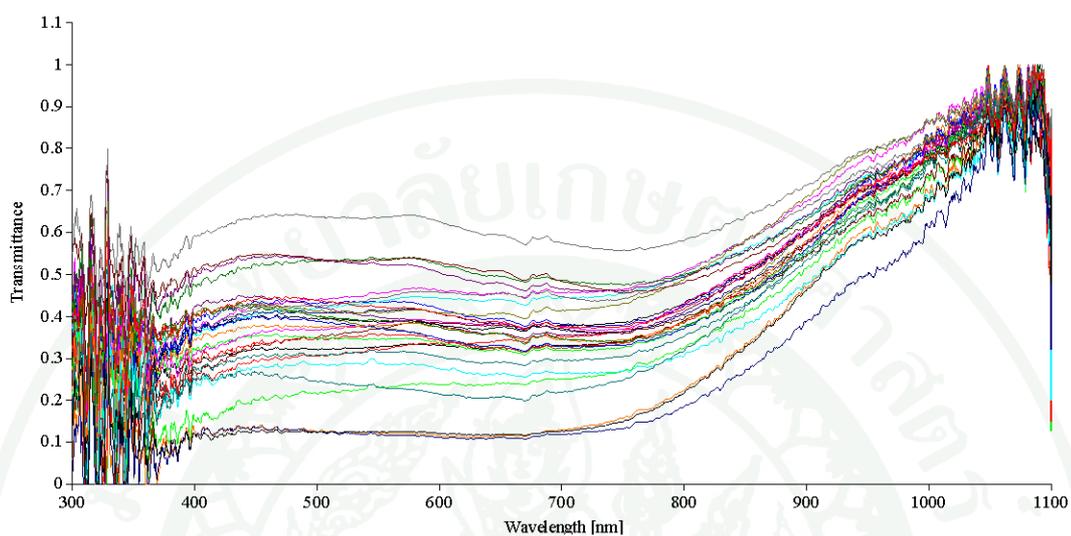
(ก)



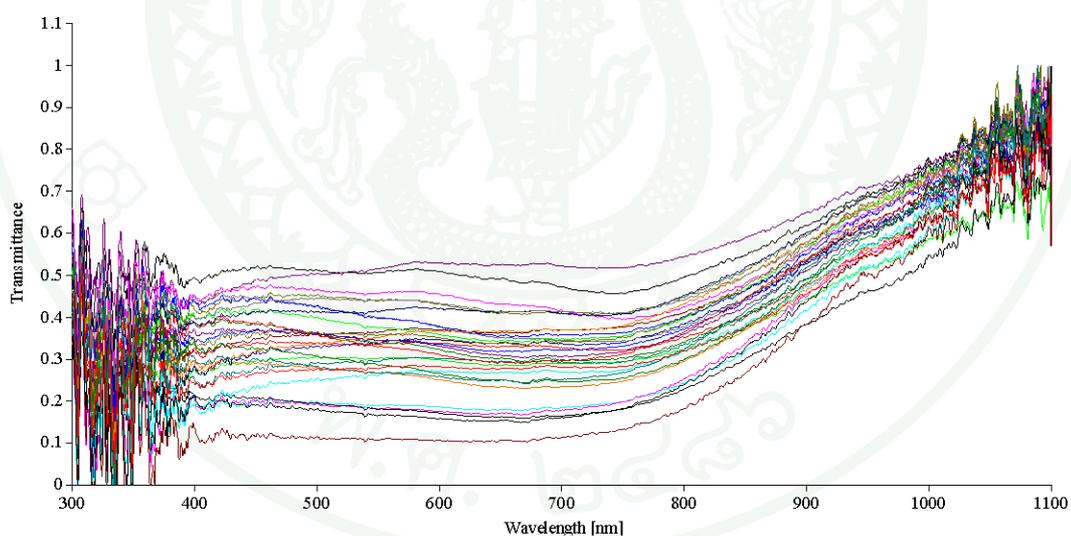
(ข)

ภาพที่ 38 (ต่อ)

B2 ใ้หมุกประเภทฮาติมีสีเทาเหลืองชมพูสีผิวใ้หมุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวมีลักษณะไม่สม่ำเสมอและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน

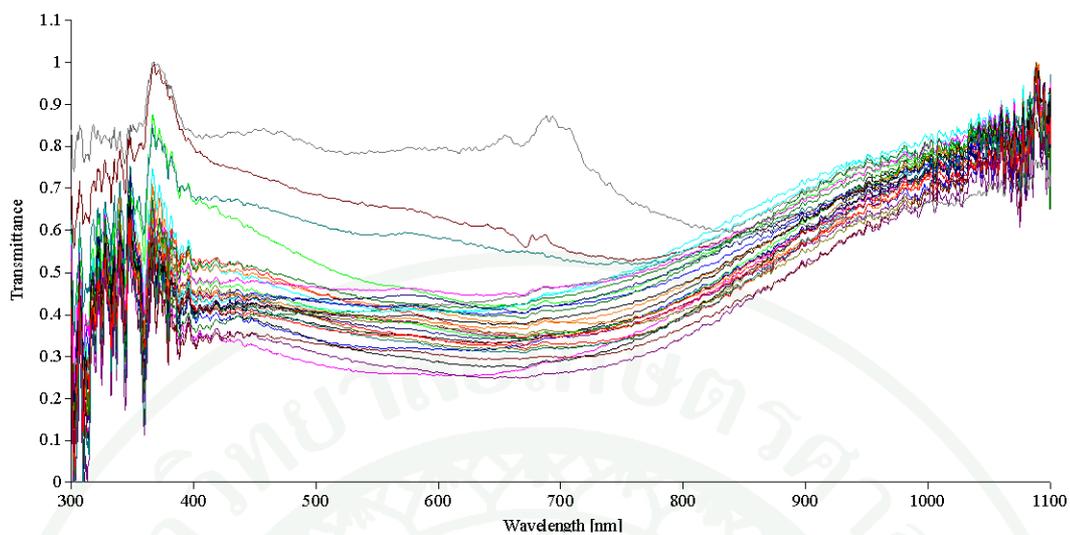


(ก)



(ข)

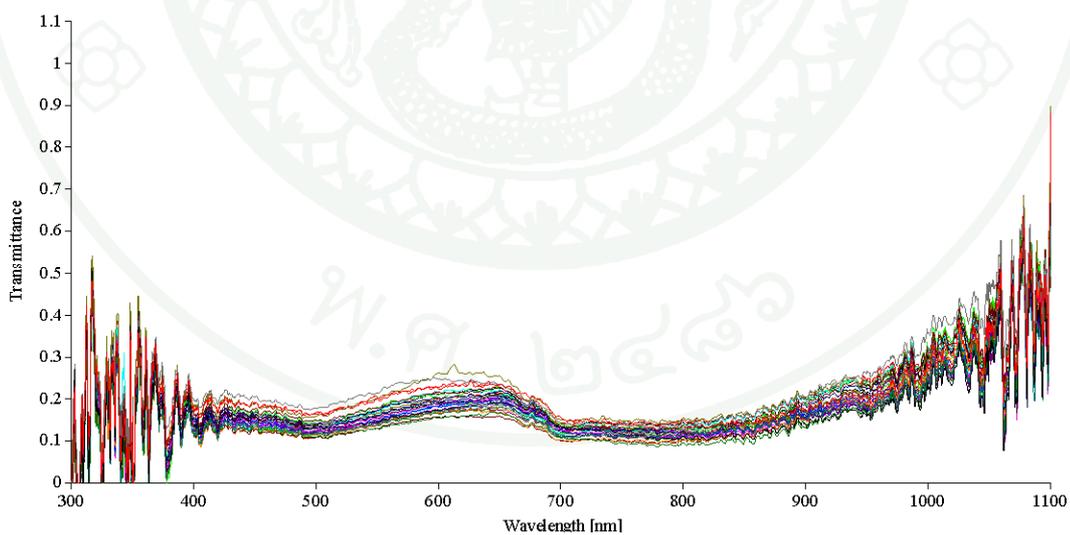
ภาพที่ 39 (ก) สเปกตรัมของใ้หมุก B2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใ้หมุก B2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้หมุก B2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



(ค)

ภาพที่ 39 (ต่อ)

B3 ใยมุกประเภทคาอิติมีสีดำเหลืองบทองสีผิวใยมุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่สม่ำเสมอ มีรอยหลุมและรูปร่างค่อนข้างกลม

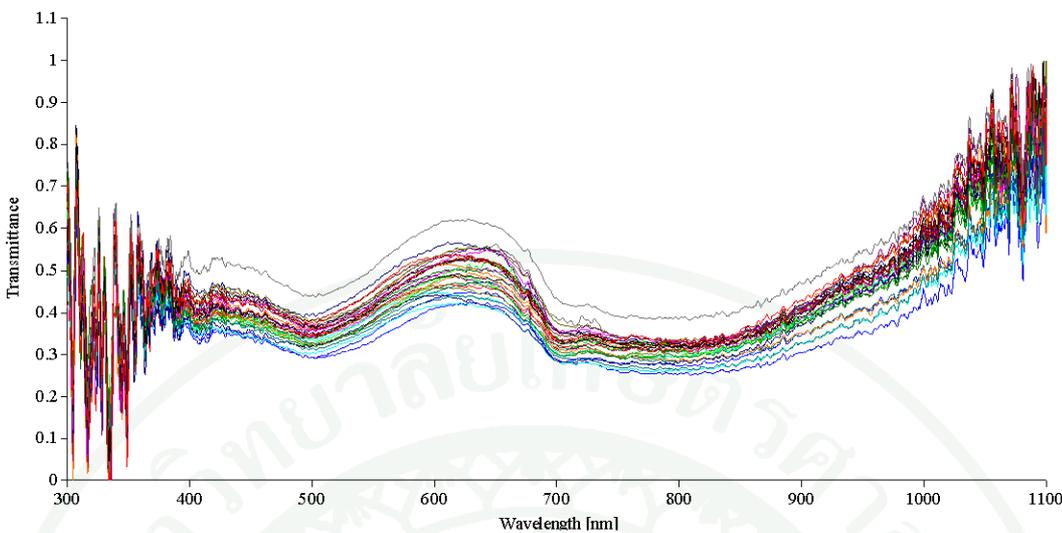


(ก)

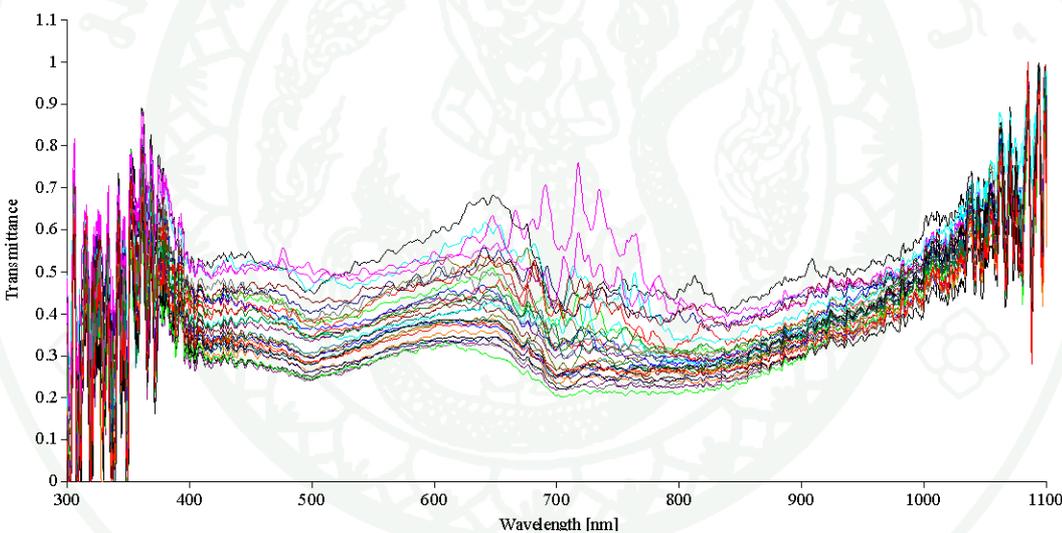
ภาพที่ 40 (ก) สเปกตรัมของใยมุก B3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°

(ข) สเปกตรัมของใยมุก B3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของใยมุก B3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



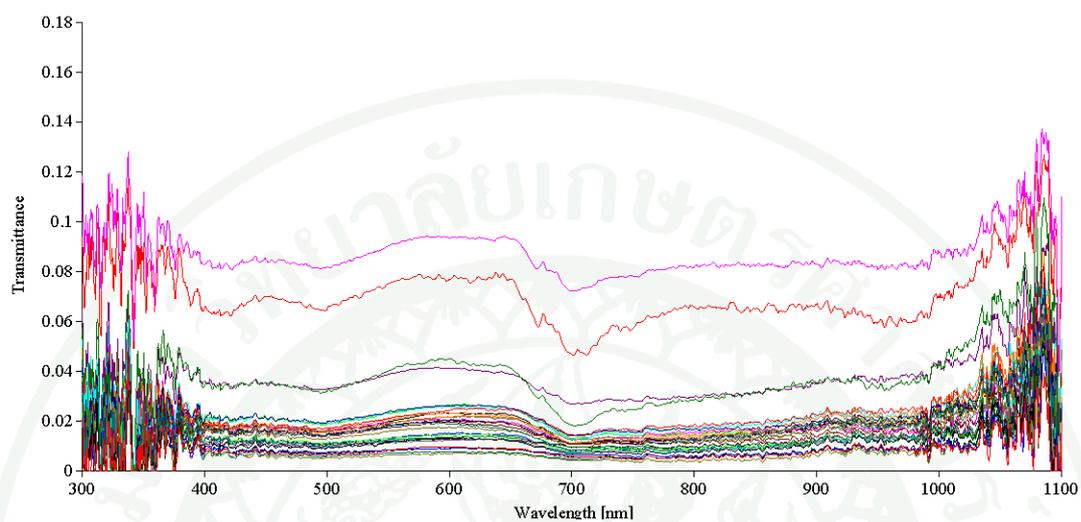
(จ)



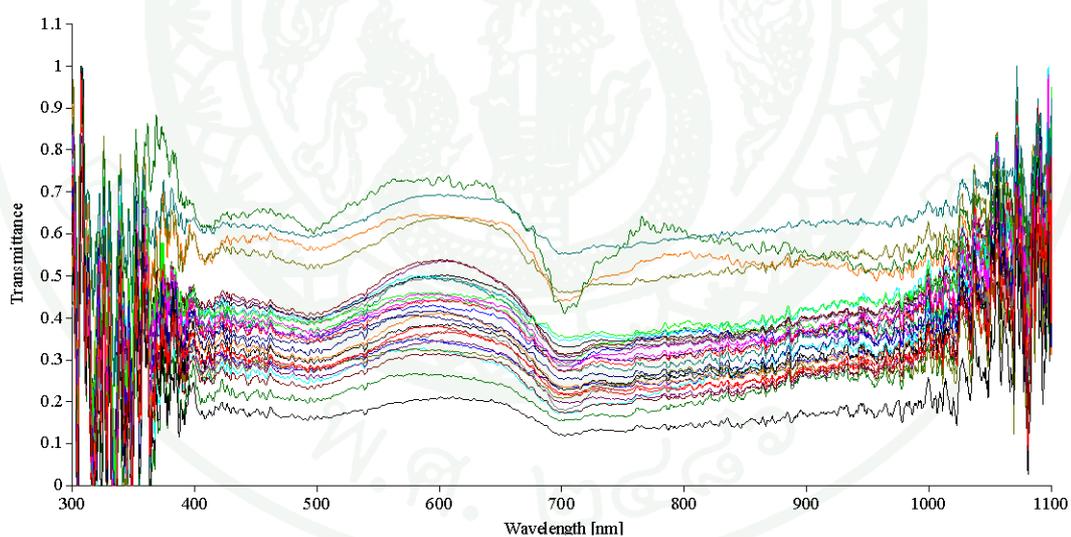
(ข)

ภาพที่ 40 (ต่อ)

B4 ใ้หมุกประเภทฮาติมีสีดำเหลืองทองสีผิวใ้หมุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะ ไม่สม่ำเสมอ และรูปร่างบิดเบี้ยวอย่างชัดเจน

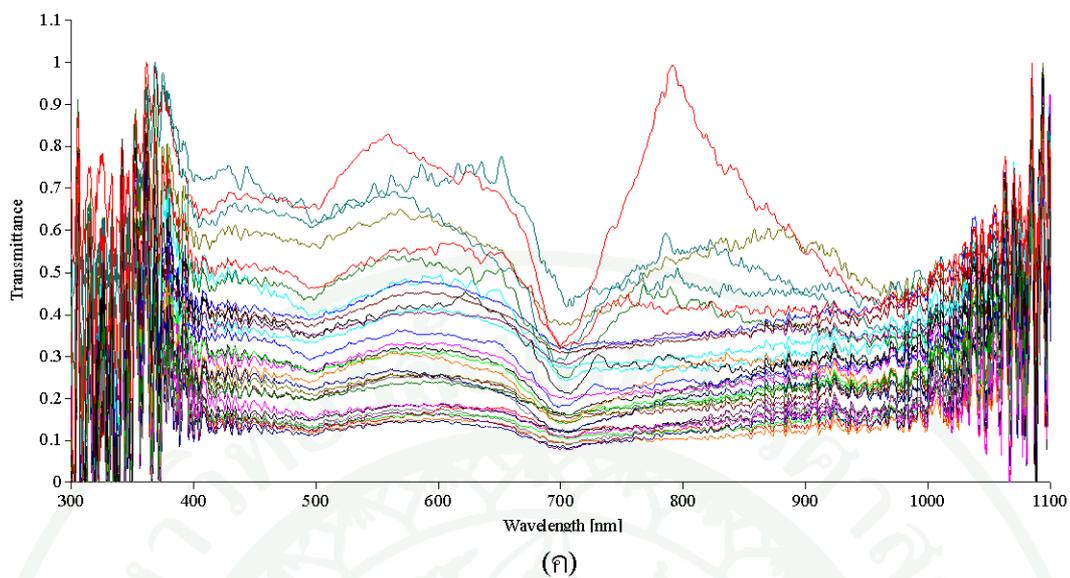


(ก)



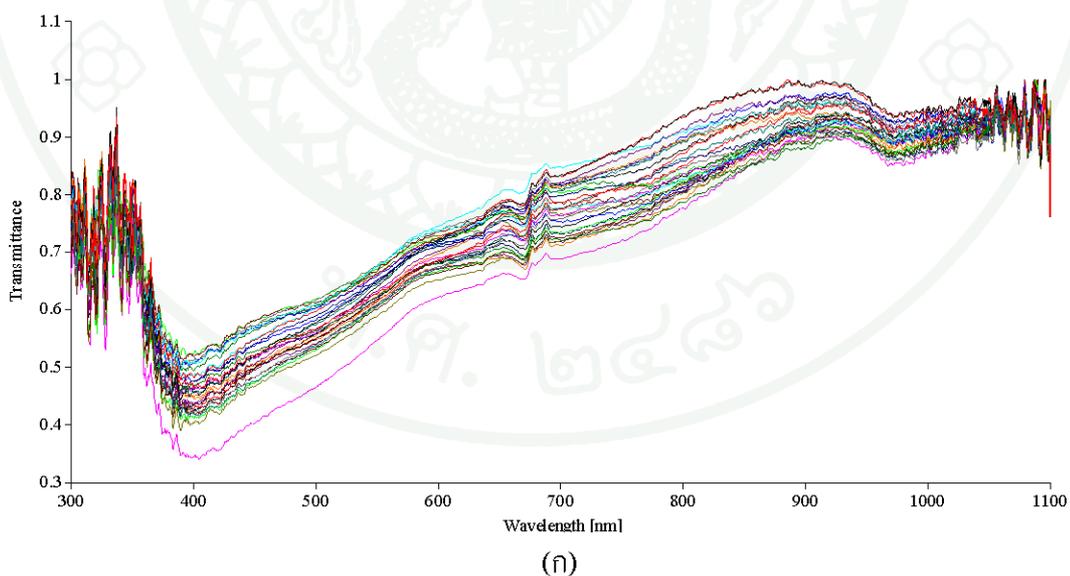
(จ)

ภาพที่ 41 (ก) สเปกตรัมของใ้หมุก B4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (จ) สเปกตรัมของใ้หมุก B4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้หมุก B4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°

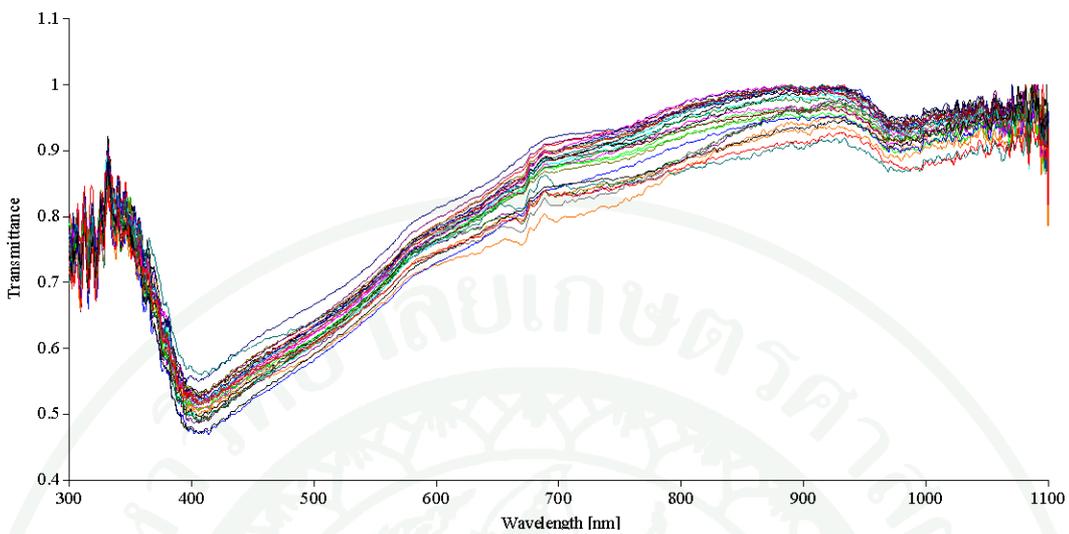


ภาพที่ 41 (ต่อ)

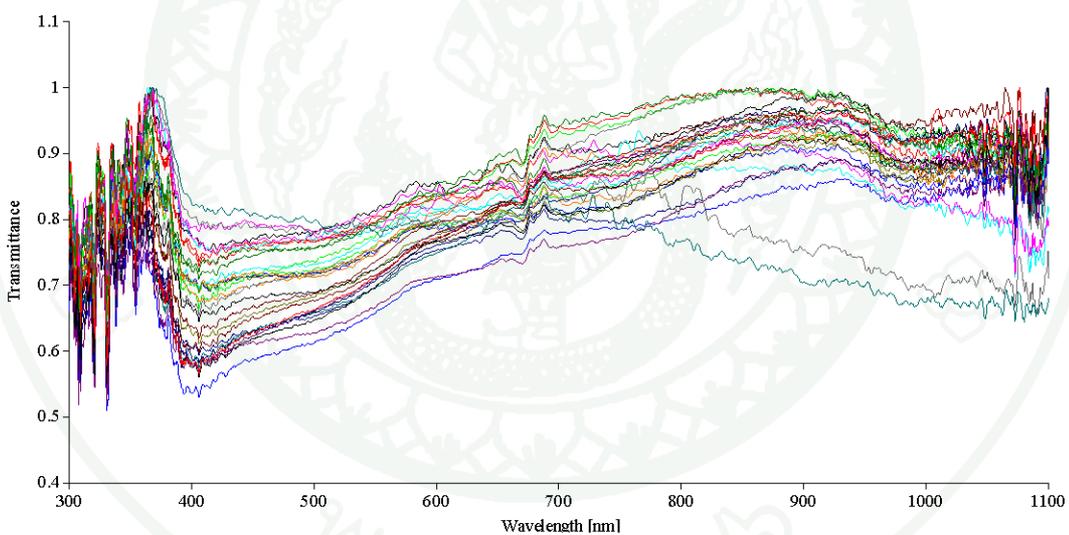
D1 ไข่มุกประเภทเซาท์ซีดีขาวเหลืองชมพูสีไข่มุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่สม่ำเสมอมีรอยดึกและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน



ภาพที่ 42 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก D1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของไข่มุก D1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของไข่มุก D1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



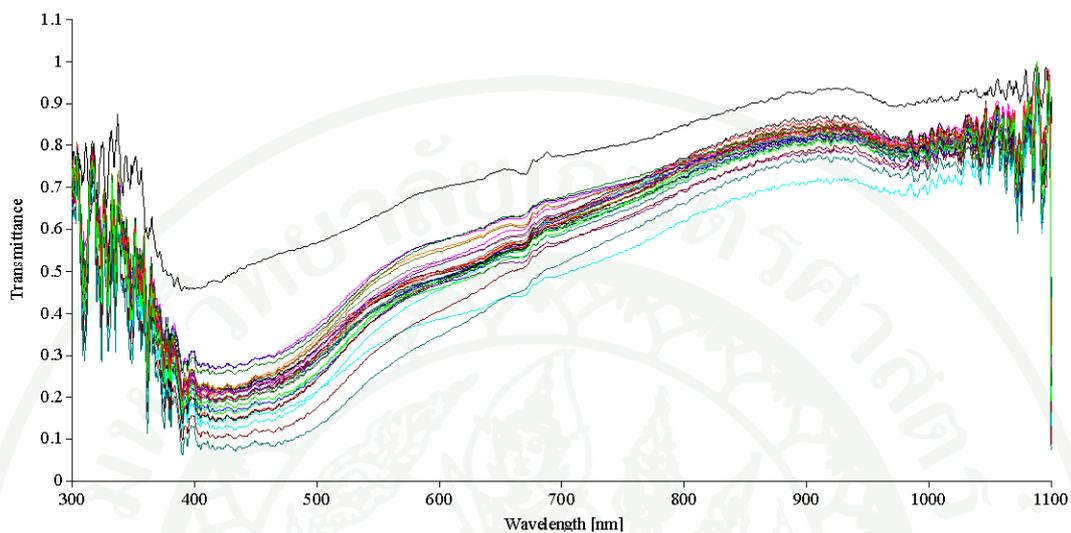
(ก)



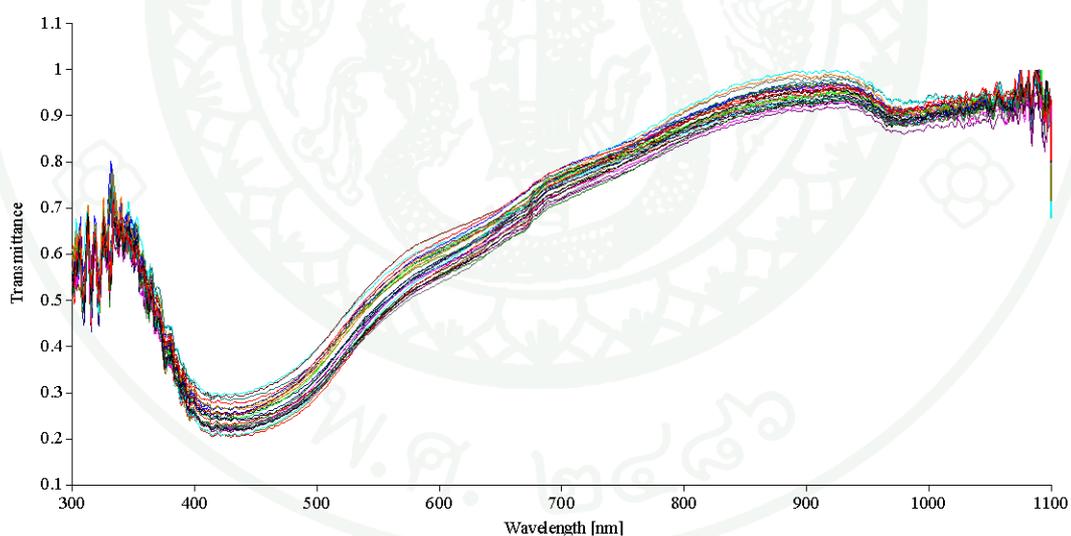
(ข)

ภาพที่ 42 (ต่อ)

E1 ใ้หมุกประเภทเซาท์ซีตีทองสีของใ้หมุกก่อนข้างสม่าเสมอ พื้นผิวลักษณะ ไม้สม่าเสมอมีรอยลึก และรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน

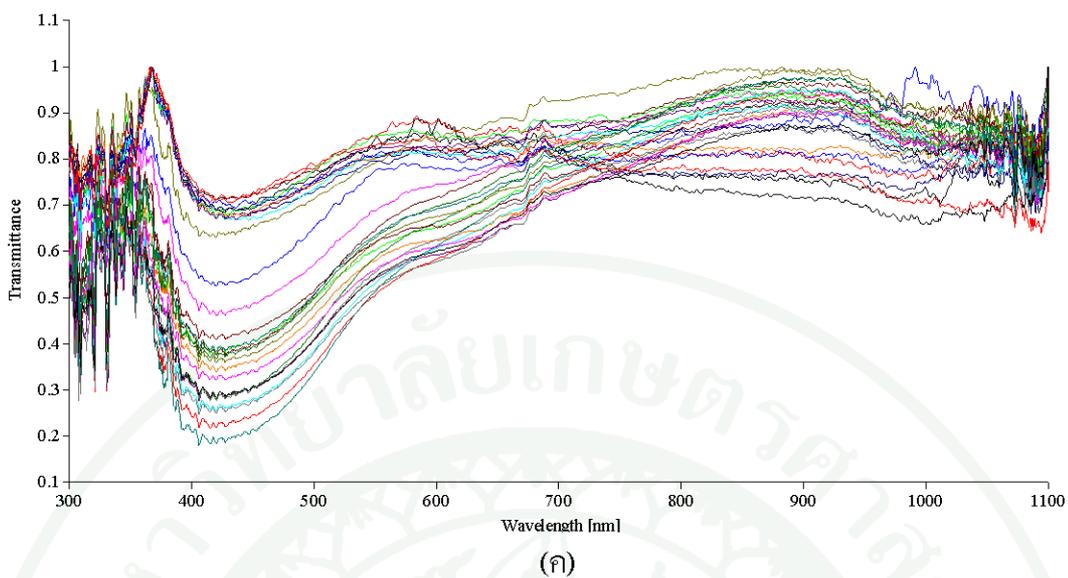


(ก)



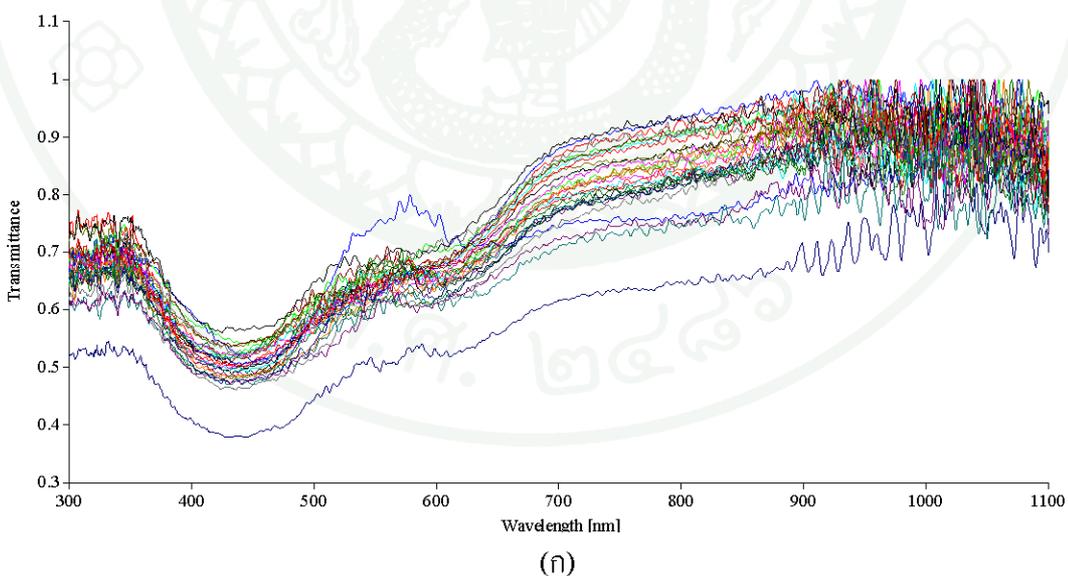
(ข)

ภาพที่ 43 (ก) สเปกตรัมของใ้หมุก E1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใ้หมุก E1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้หมุก E1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°

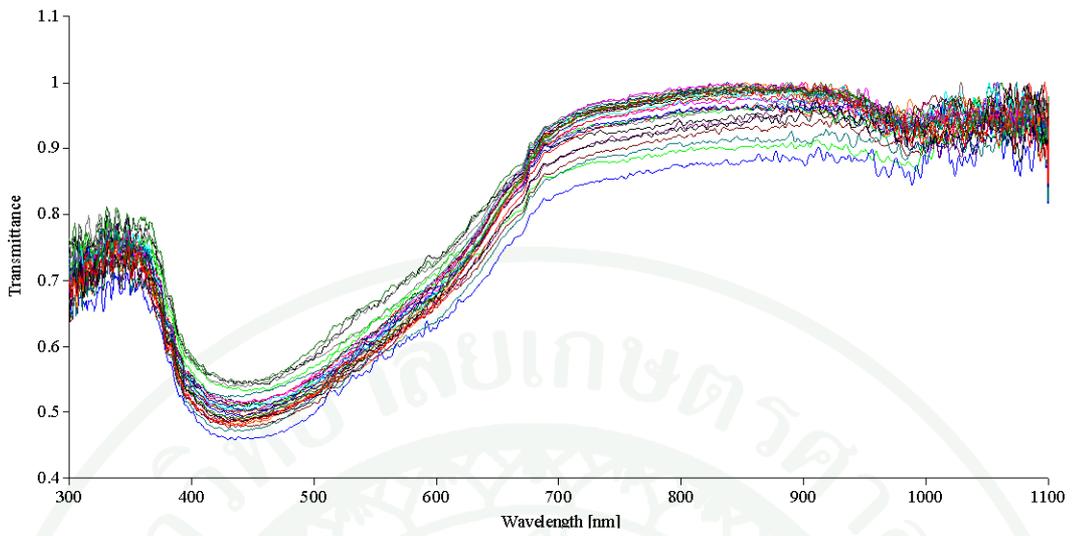


ภาพที่ 43 (ต่อ)

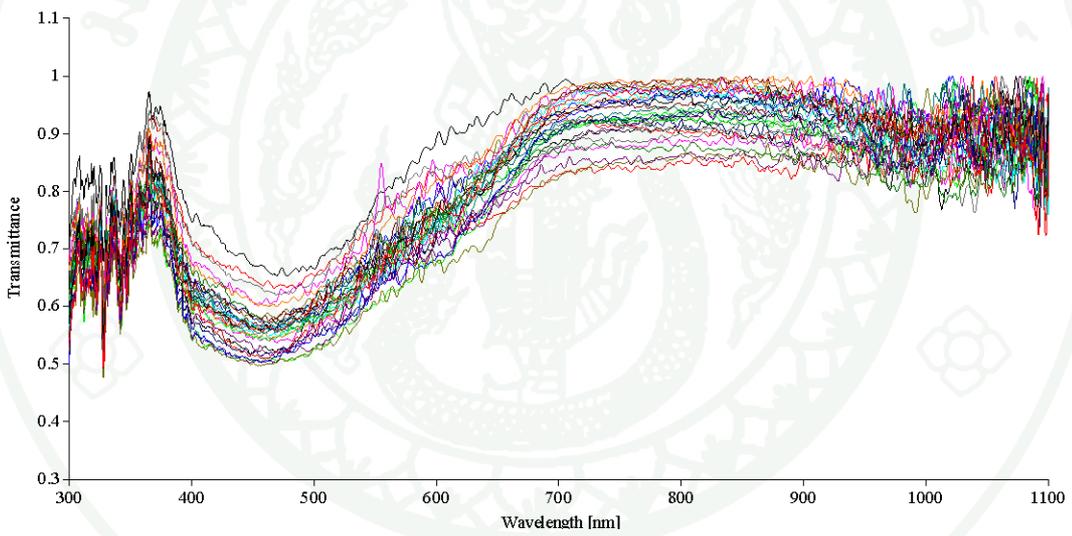
C1 ไข่มุกประเภทน้ำจืดสีชมพูเหลืองทองสีผิวไข่มุกสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะเรียบสม่ำเสมอและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน



ภาพที่ 44 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก C1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของไข่มุก C1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของไข่มุก C1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



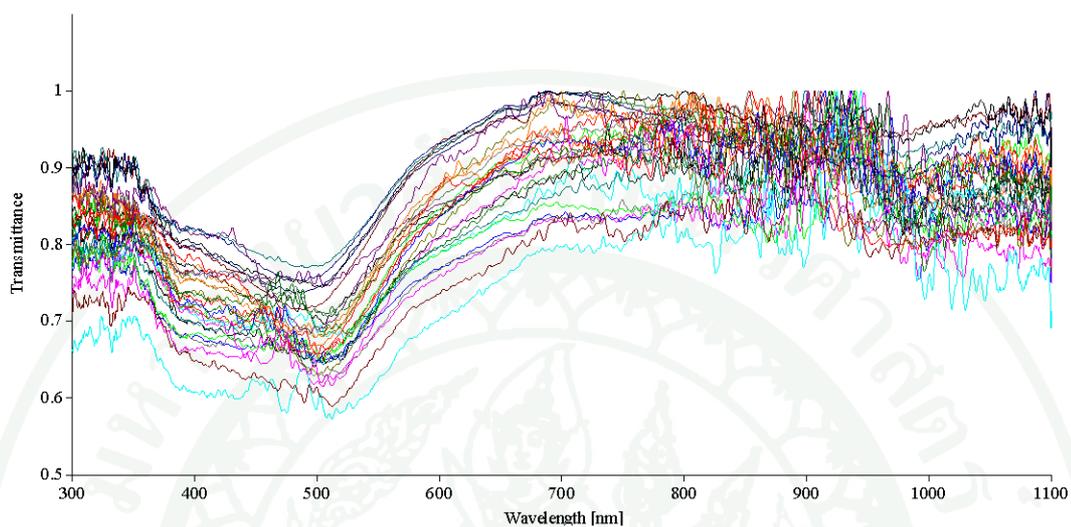
(จ)



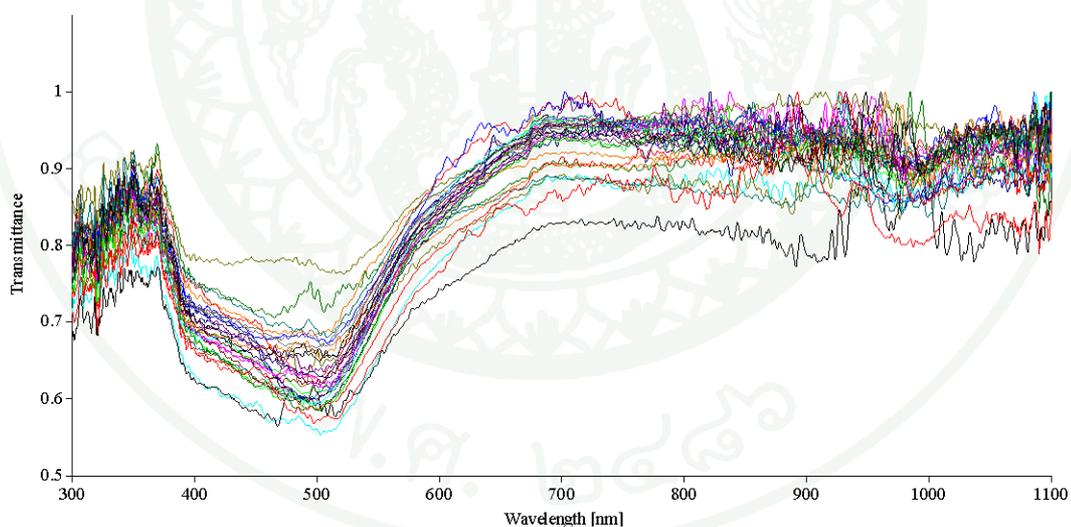
(ข)

ภาพที่ 44 (ต่อ)

C2 ใ้มนุกประเภหน้าจี้ดสีชมพูเหลือบทองสีผิวใ้มนุกสมำ้เสมอ พื้นผิวลักษณะเรียบสมำ้เสมอและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน

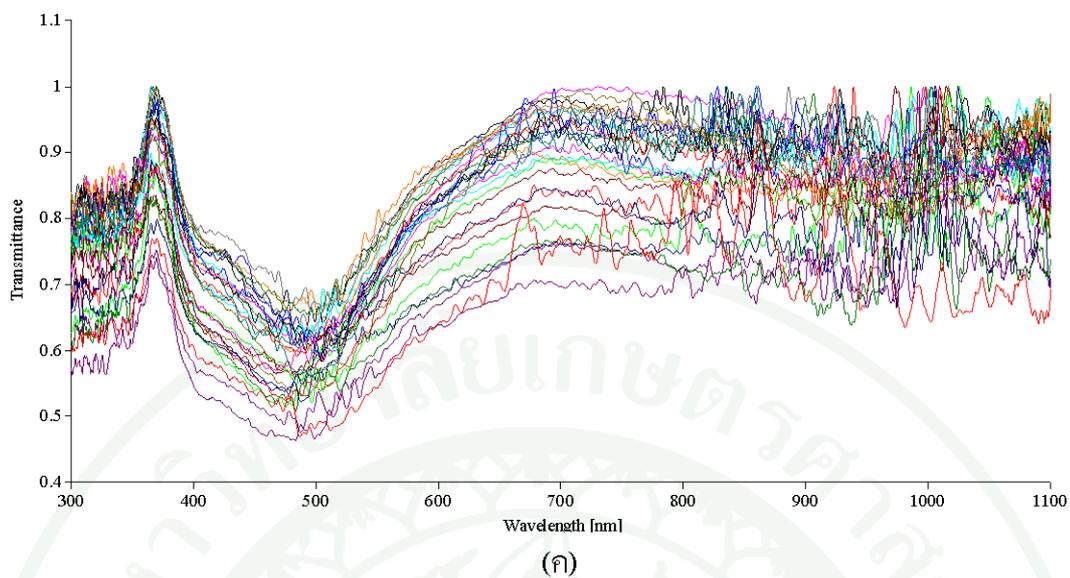


(ก)



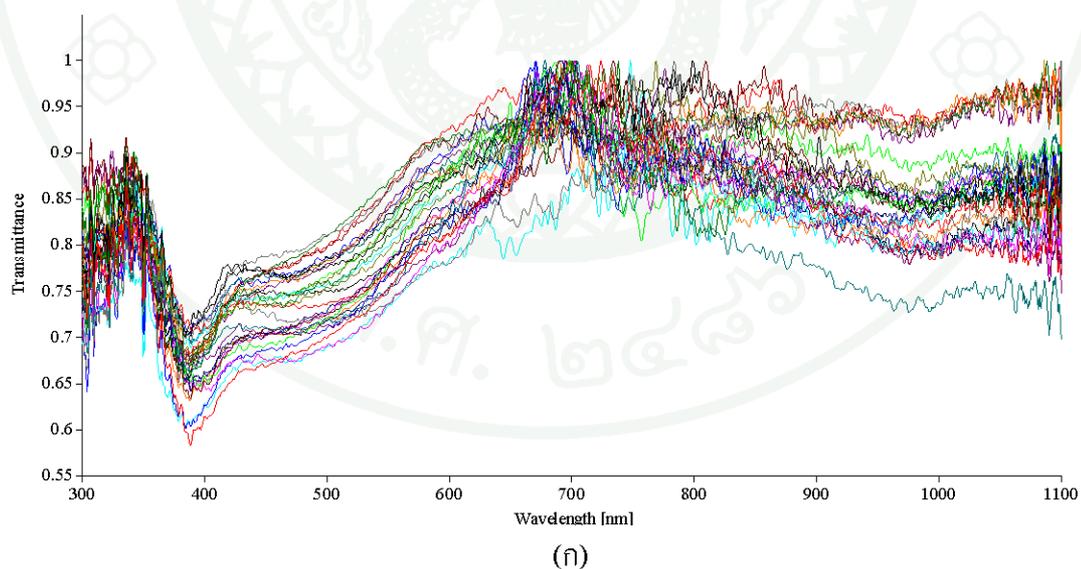
(ข)

ภาพที่ 45 (ก) สเปกตรัมของใ้มนุก C2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใ้มนุก C2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้มนุก C2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



ภาพที่ 45 (ต่อ)

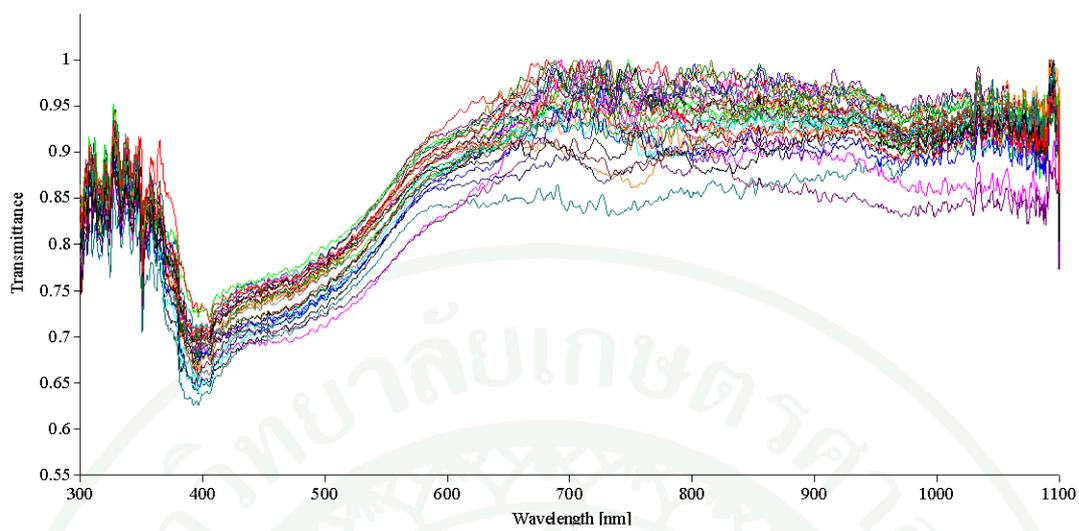
C3 ไข่มุกประเภทน้ำจืดสีเหลืองเหลืองเทา สีของไข่มุกก่อนล้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่สม่ำเสมอมีรอยลึกและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน



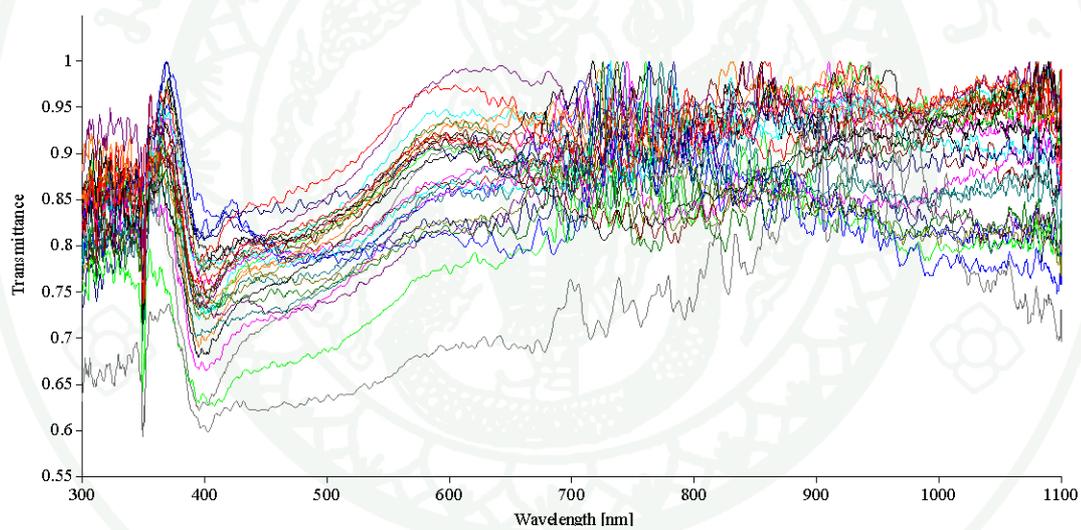
ภาพที่ 46 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก C3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°

(ข) สเปกตรัมของไข่มุก C3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของไข่มุก C3 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



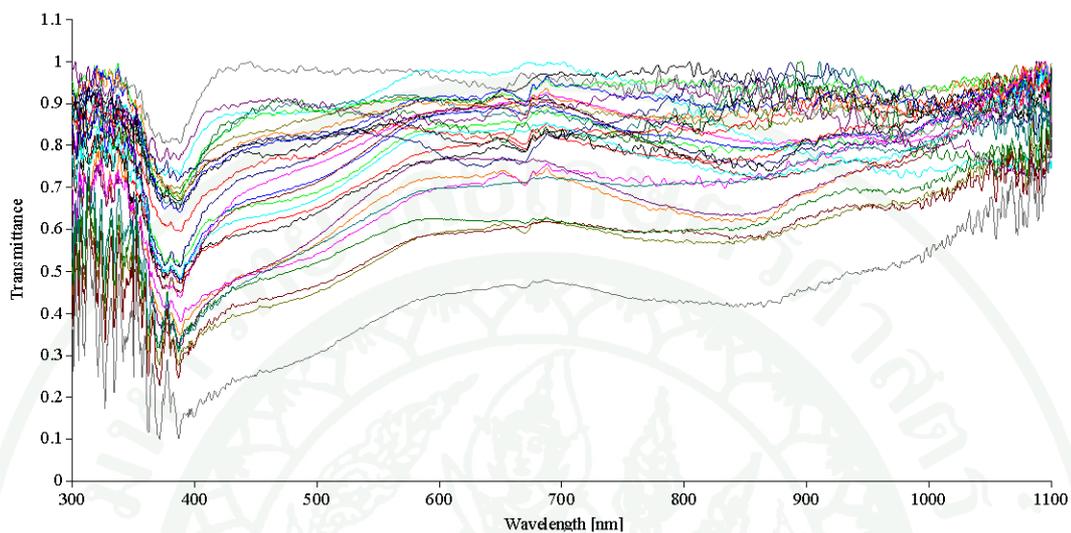
(จ)



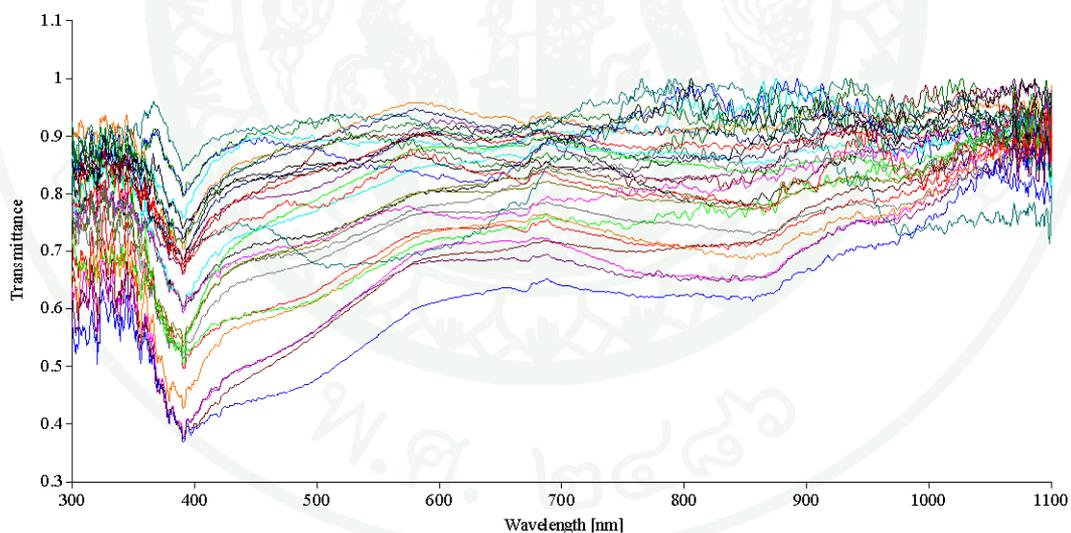
(ค)

ภาพที่ 46 (ต่อ)

C4 ใ้มนูกประเภทน้ำจืดสีขาวเหลืองเทา สีของใ้มนูกก่อนข้างสม้าเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่เรียบ สม้าเสมอและรูปร่างบิดเบี้ยวอย่างชัดเจน

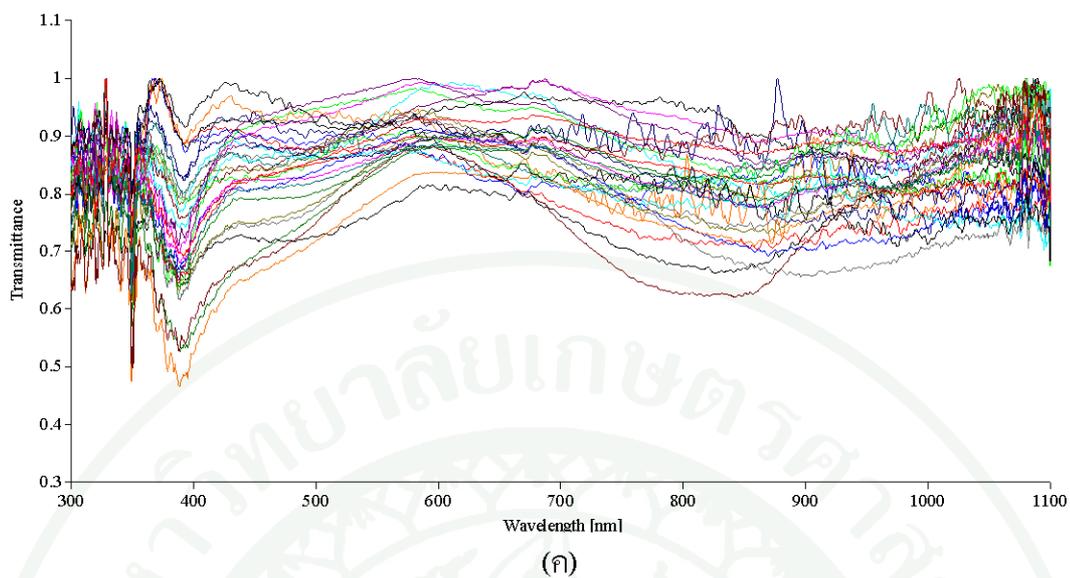


(ก)



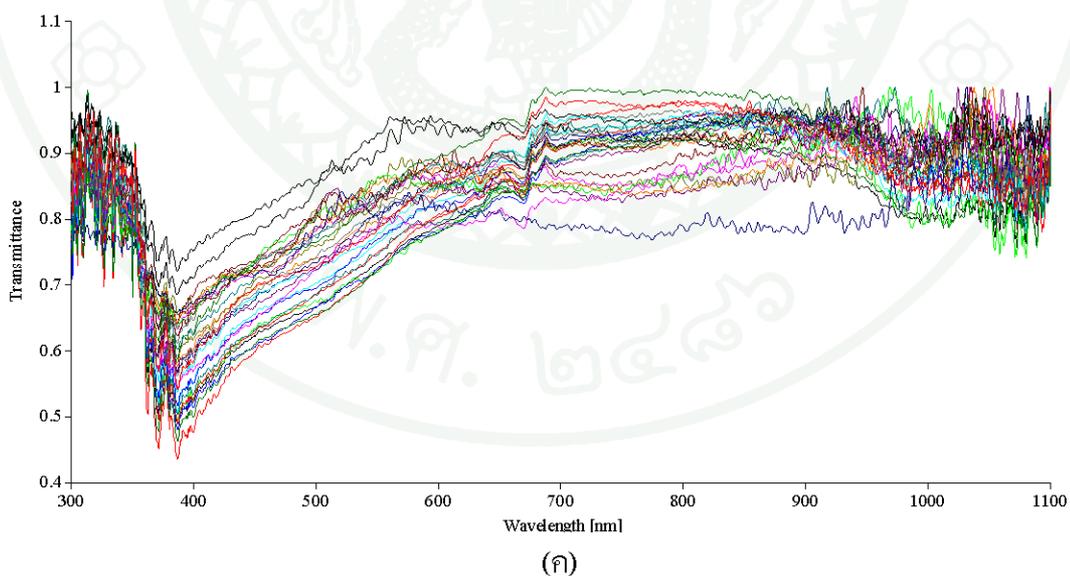
(ข)

ภาพที่ 47 (ก) สเปกตรัมของใ้มนูก C4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใ้มนูก C4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้มนูก C4 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



ภาพที่ 47 (ต่อ)

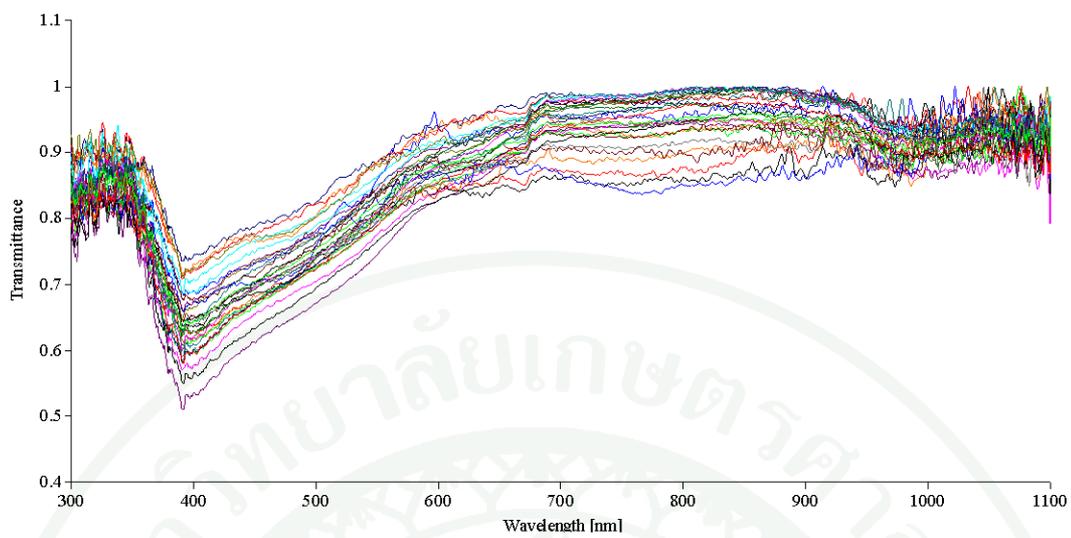
C5 ไข่มุกประเภทน้ำจืดสีขาวเหลืองชมพูสีผิว ไข่มุกสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะเรียบสม่ำเสมอและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน



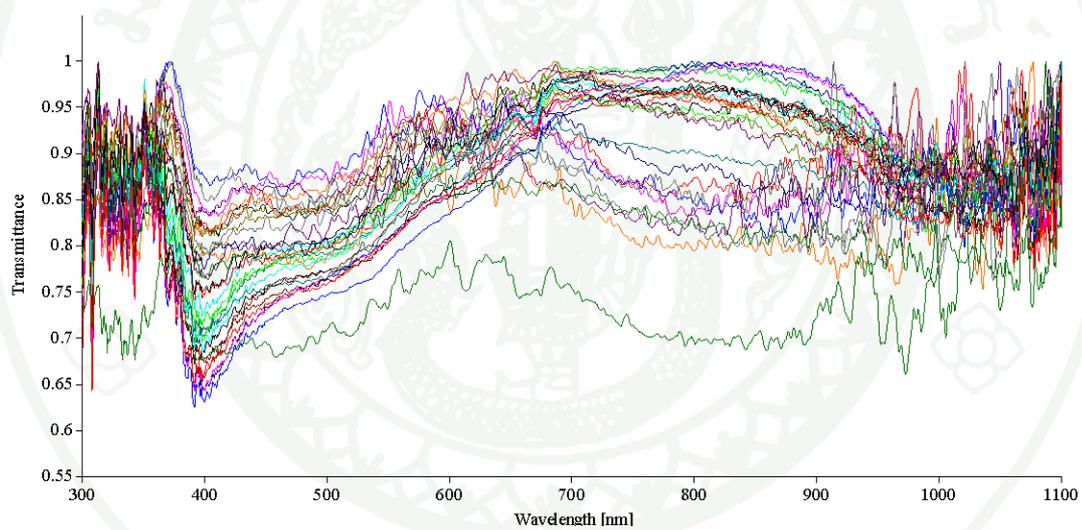
ภาพที่ 48 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก C5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°

(ข) สเปกตรัมของไข่มุก C5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของไข่มุก C5 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



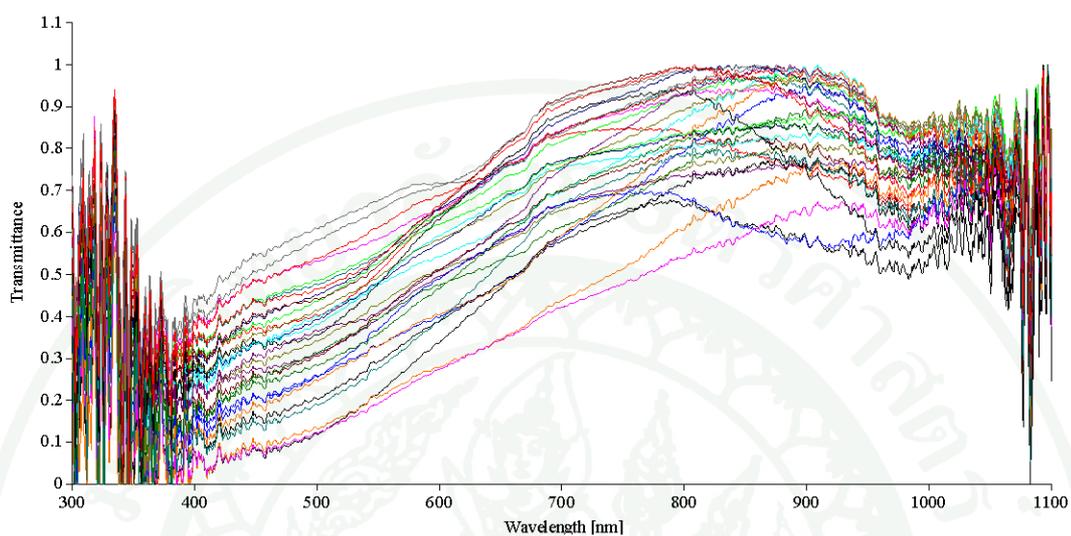
(จ)



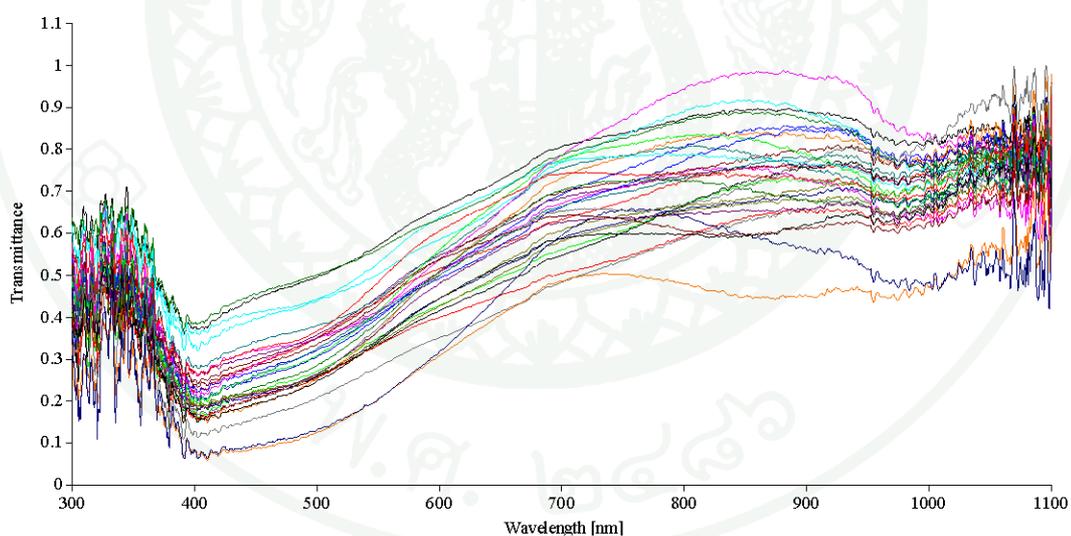
(ข)

ภาพที่ 48 (ต่อ)

C6 ไข่มุกประเภทน้ำจืดสีขาวเหลืองชมพูสีของไข่มุกไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่เรียบสม่ำเสมอ และรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน

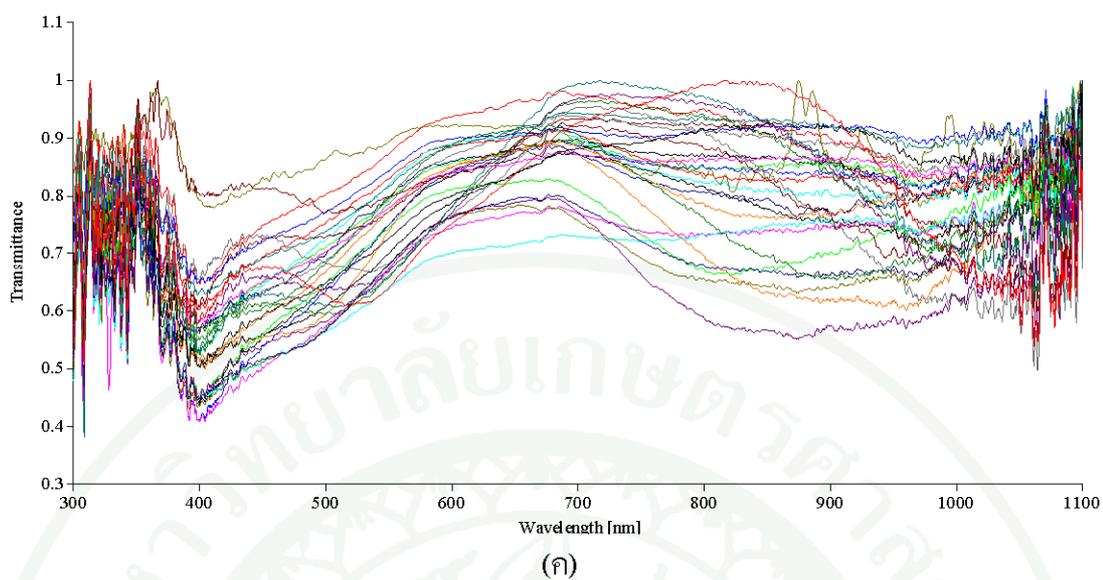


(ก)



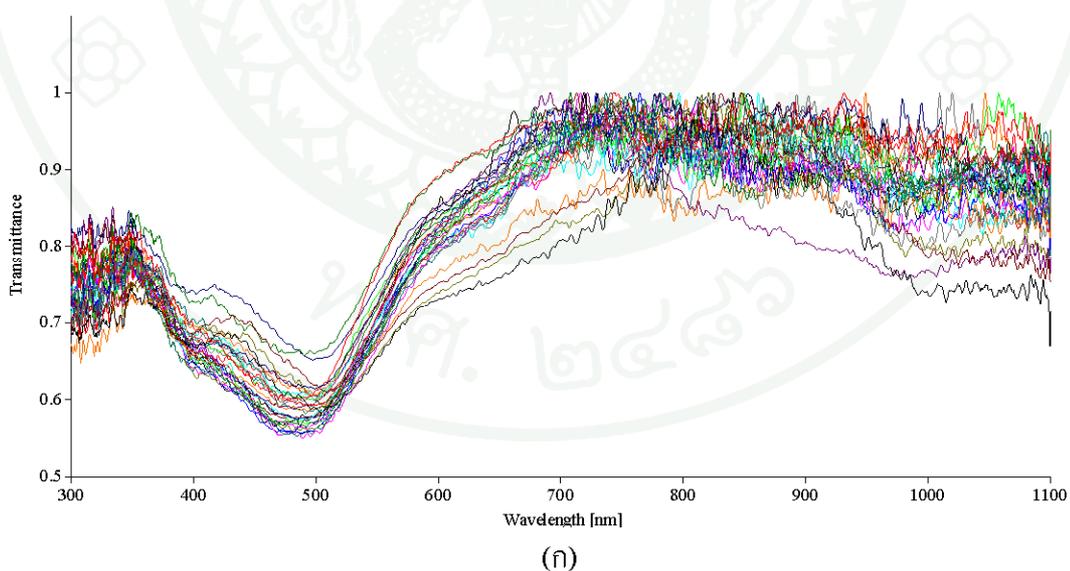
(ข)

ภาพที่ 49 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก C6 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของไข่มุก C6 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของไข่มุก C6 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



ภาพที่ 49 (ต่อ)

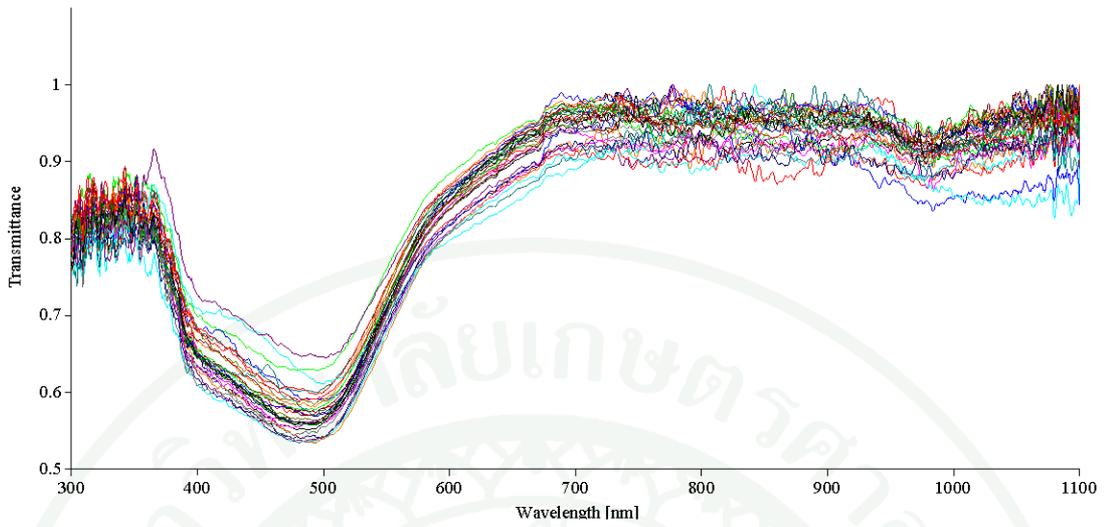
C7 ไข่มุกประเภทน้ำจืดสีชมพูเหลืองบของสีของไข่มุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่เรียบสม่ำเสมอและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน



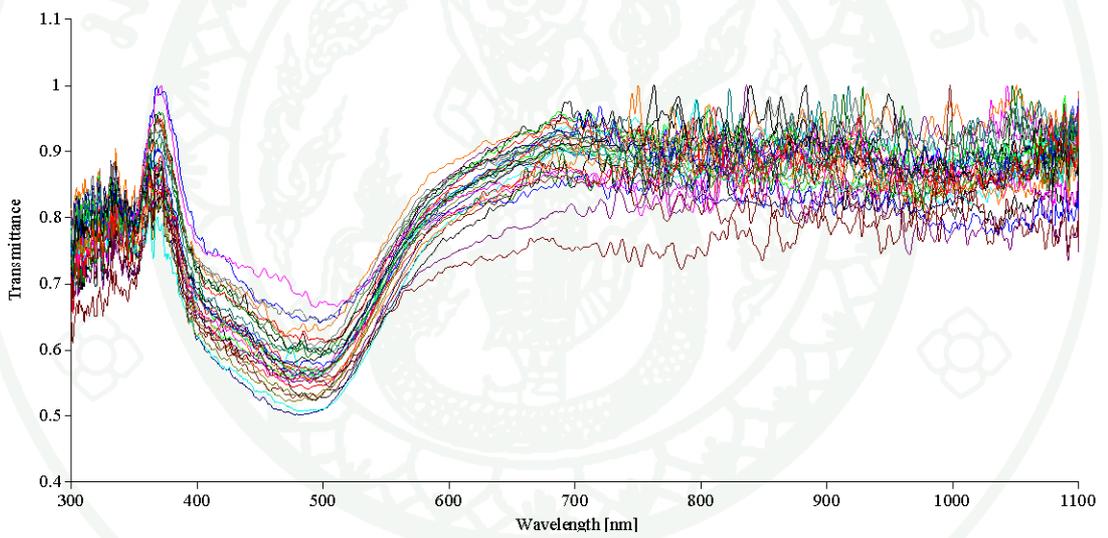
ภาพที่ 50 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก C7 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°

(ข) สเปกตรัมของไข่มุก C7 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของไข่มุก C7 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



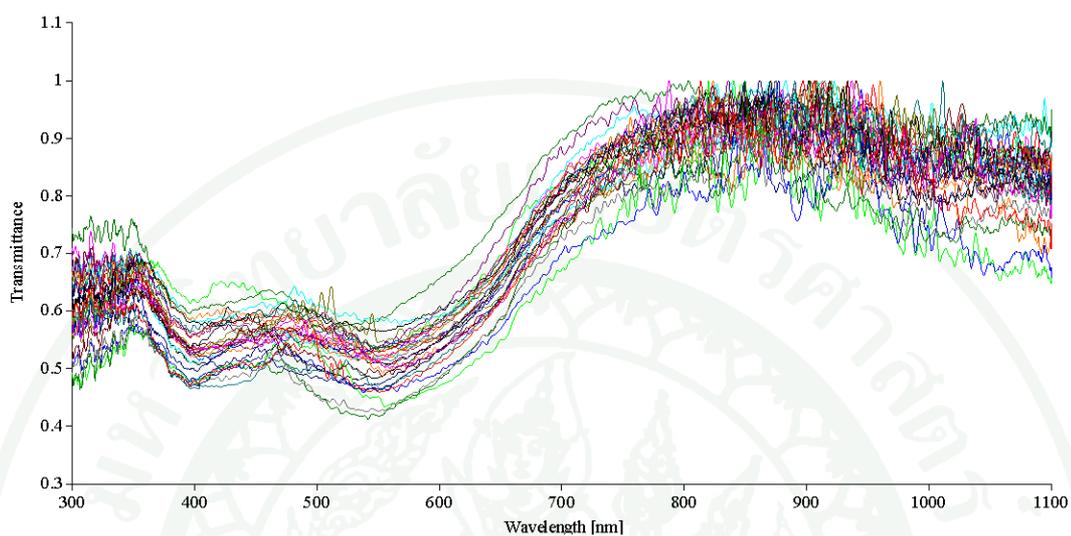
(จ)



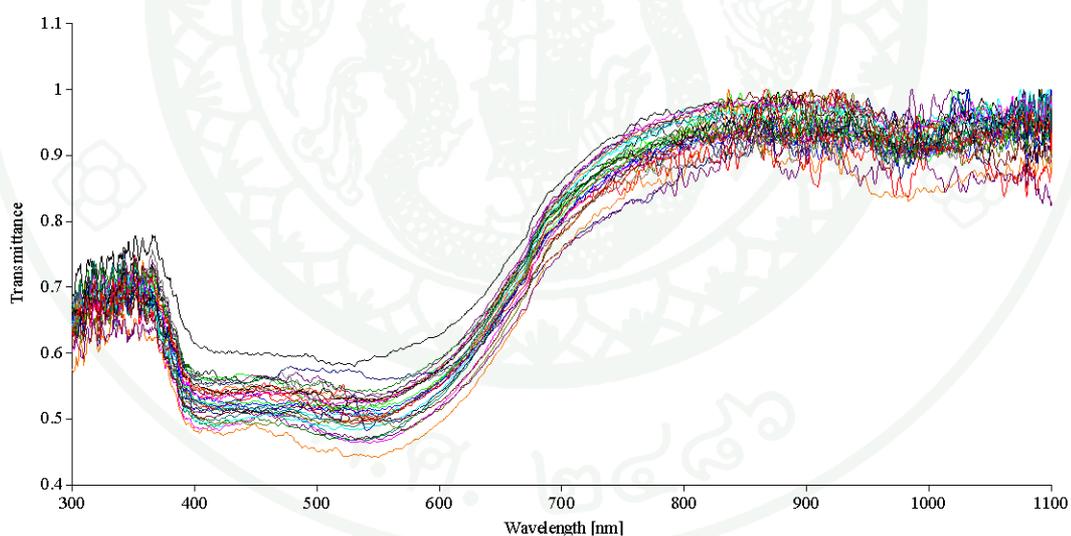
(ข)

ภาพที่ 50 (ต่อ)

C8 ไข่มุกประเภทน้ำจืดสีม่วงเหลืองทองสีของไข่มุกก่อนล้างสีสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่เรียบ สม่ำเสมอและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน

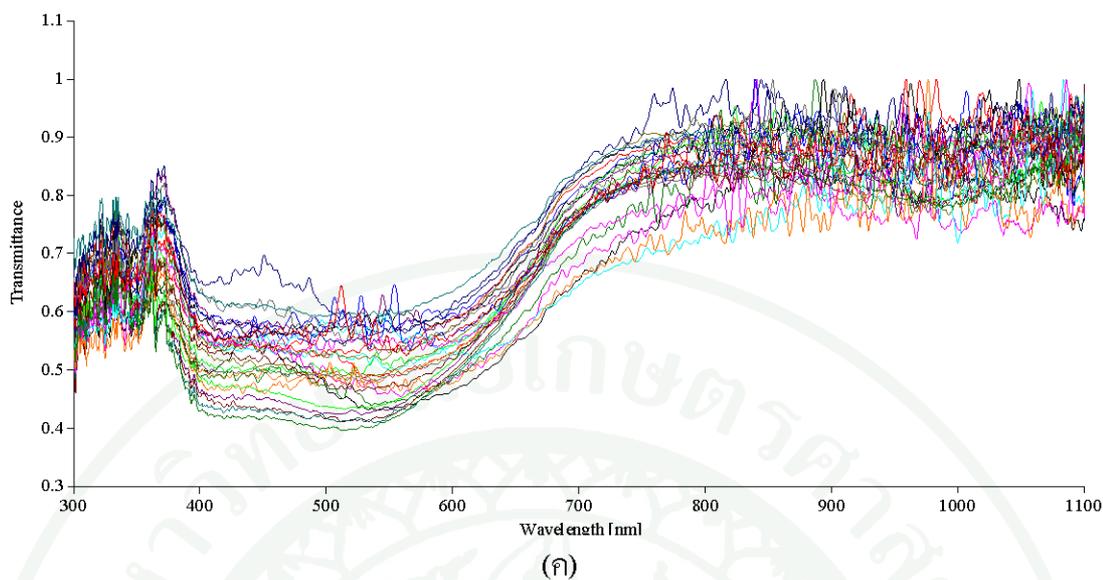


(ก)



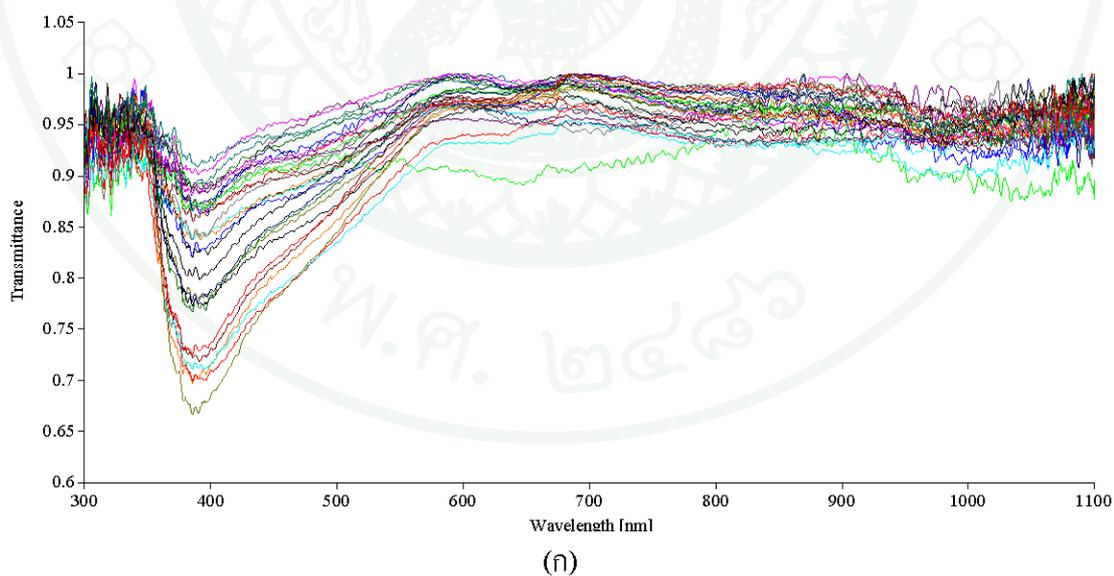
(ข)

ภาพที่ 51 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก C8 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของไข่มุก C8 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของไข่มุก C8 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



ภาพที่ 51 (ต่อ)

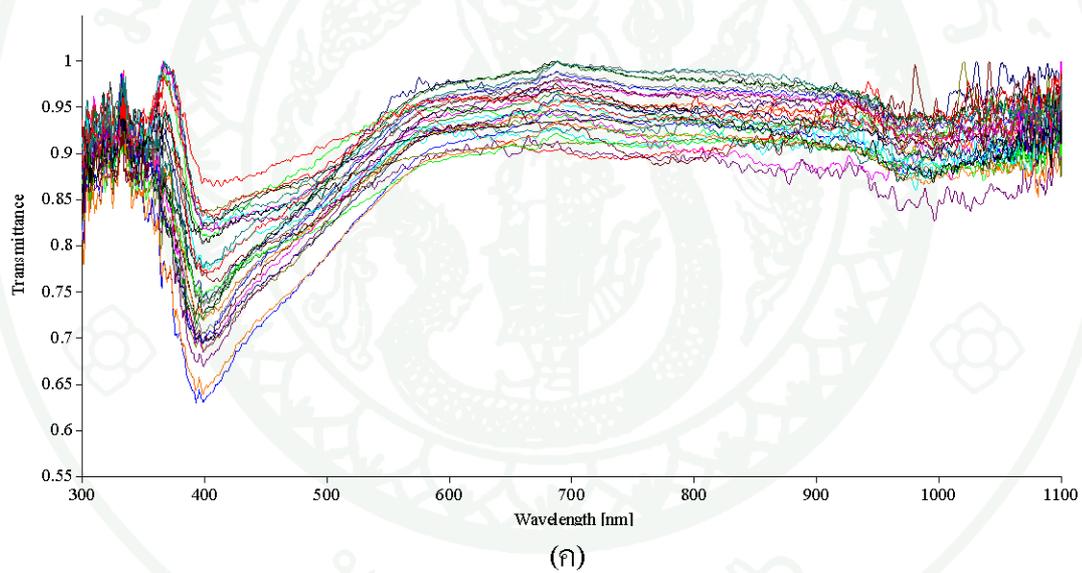
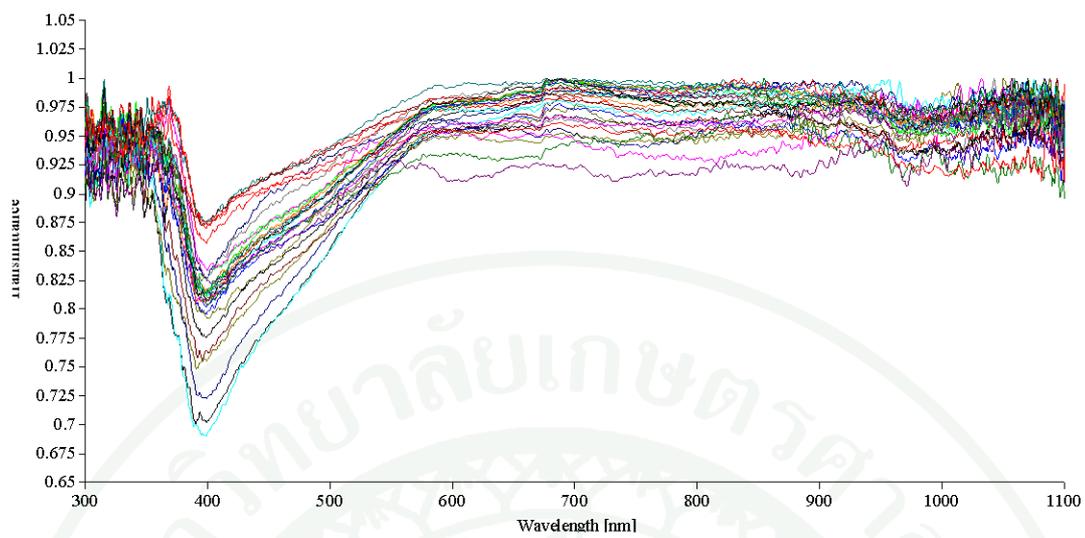
C9 ไข่มุกประเภทน้ำจืดสีขาวเหลืองเทา สีของไข่มุกก่อนล้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่เรียบสม่ำเสมอและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน



ภาพที่ 52 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก C9 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°

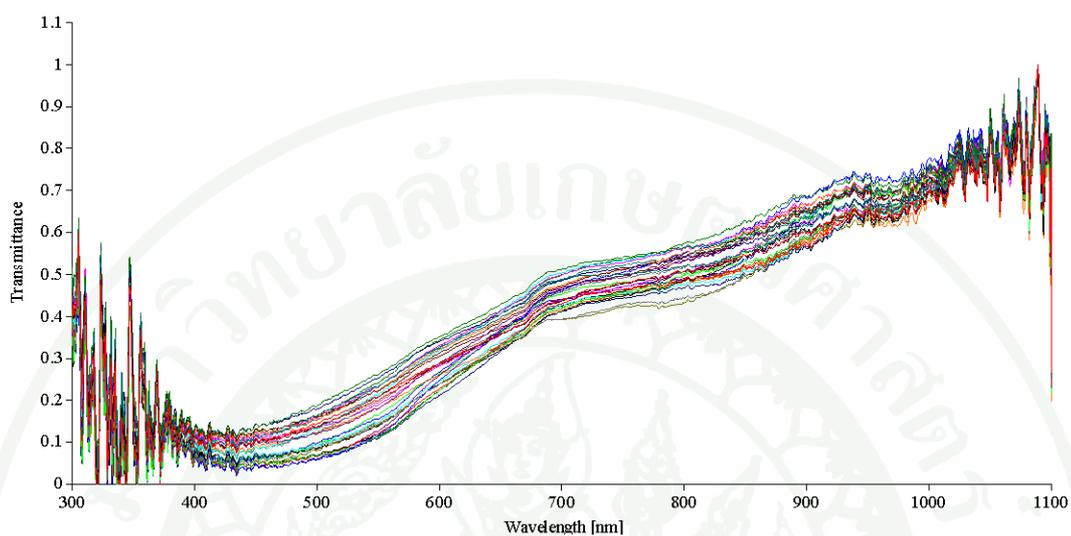
(ข) สเปกตรัมของไข่มุก C9 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของไข่มุก C9 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°

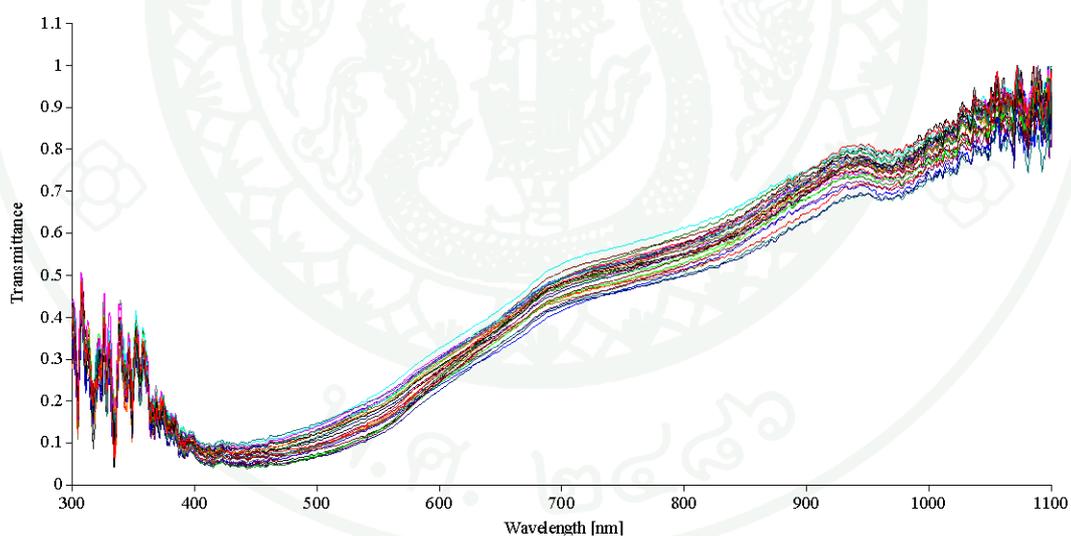


ภาพที่ 52 (ต่อ)

F1 ใ้มนุกประเภทเซทที่ซึ่ตีทงปรึบปร่งคุณภาพโดยการย้อมสี สีของใ้มนุกไม่สม่าเสมอ พื้นผิวลักษณะค่อข้างเรียบสม่าเสมอและรูปร่างค่อนข้างกลม

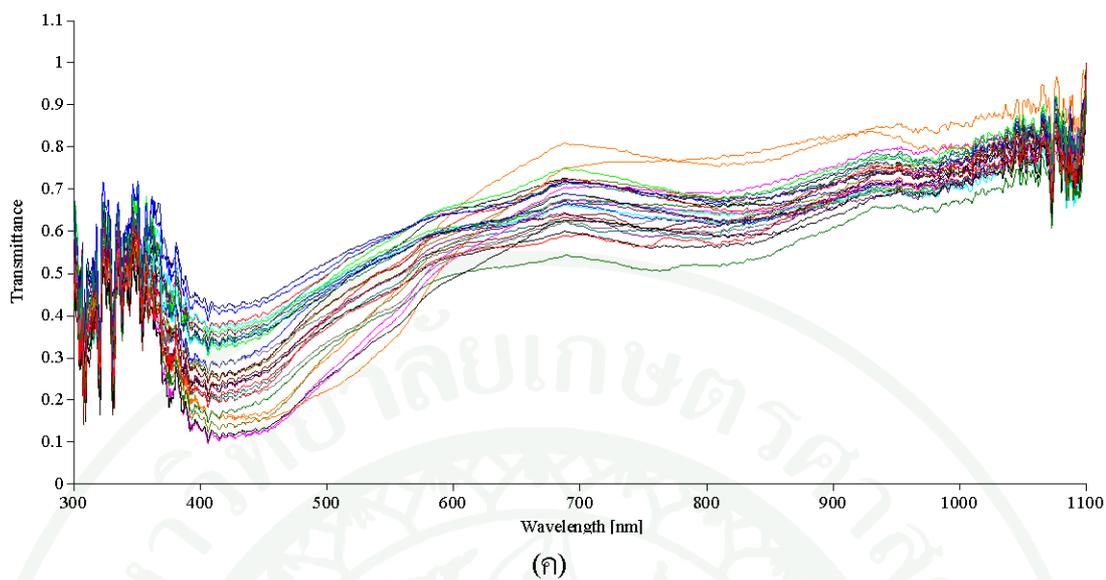


(ก)



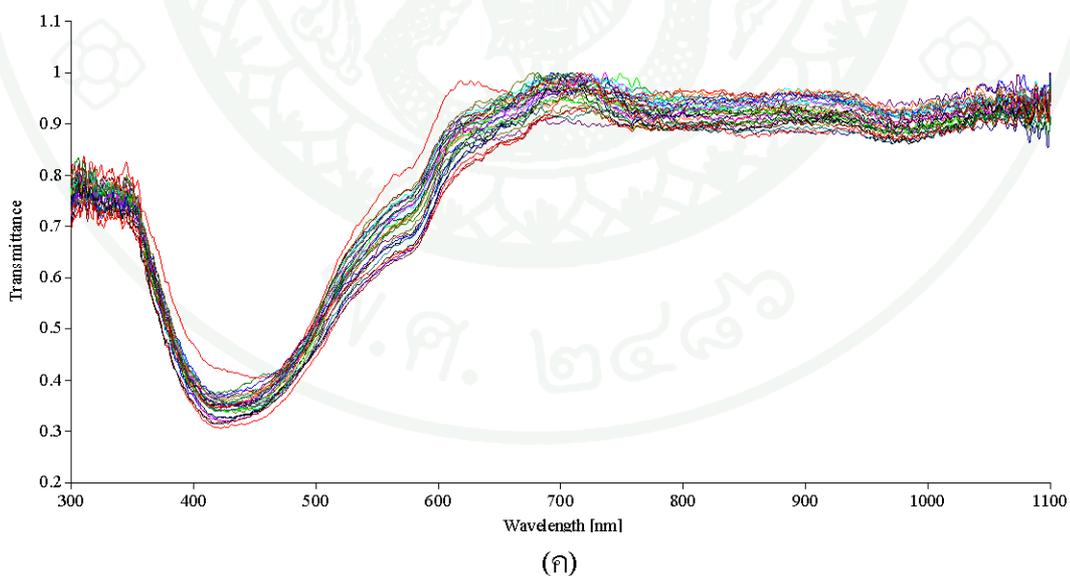
(จ)

ภาพที่ 53 (ก) สเปกตรัมของใ้มนุก F1 วดัโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (จ) สเปกตรัมของใ้มนุก F1 วดัโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้มนุก F1 วดัโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°

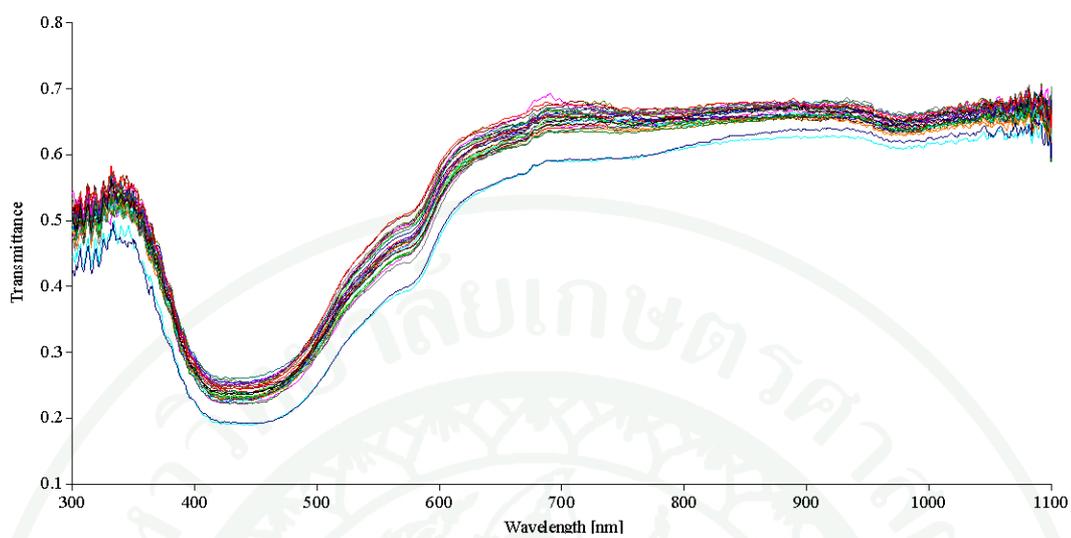


ภาพที่ 53 (ต่อ)

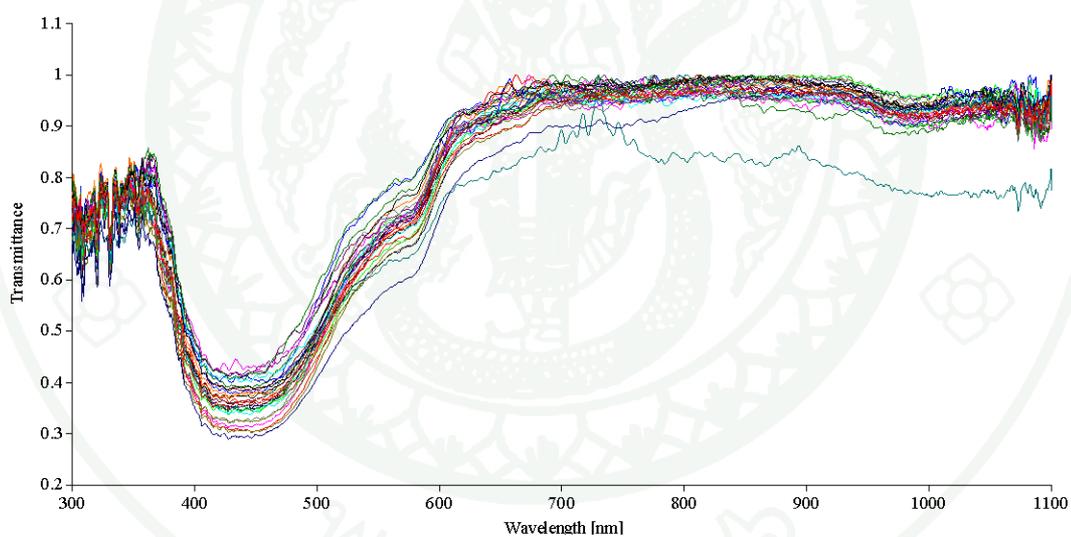
F2 ใ้หมุกประเภทเซทที่ซีสีทองปรับปรุงคุณภาพโดยการย้อมสี สีของใ้หมุกก่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่เรียบเรียบสม่ำเสมอและรูปร่างค่อนข้างกลม



ภาพที่ 54 (ก) สเปกตรัมของใ้หมุก F2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใ้หมุก F2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้หมุก F2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



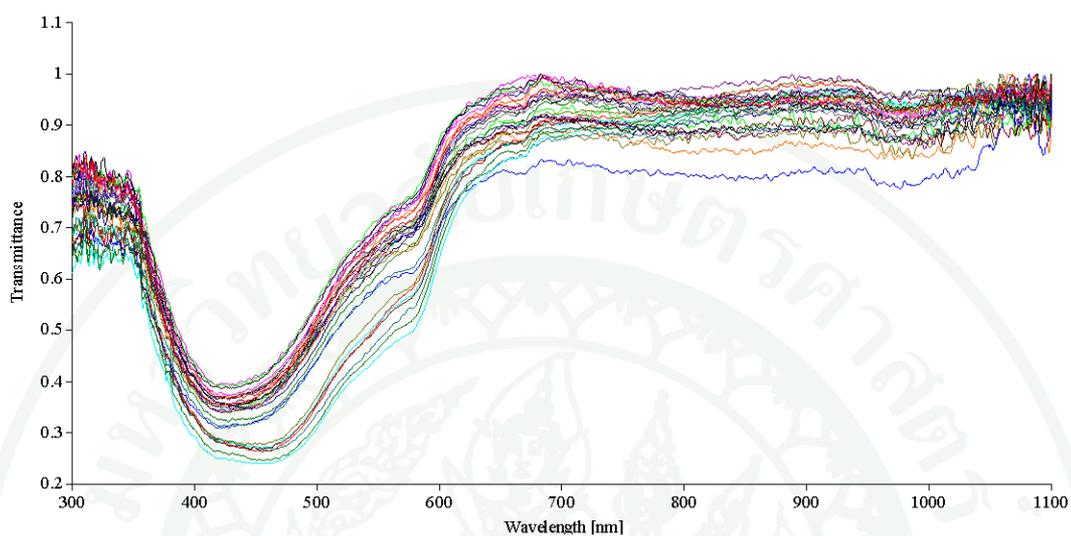
(ก)



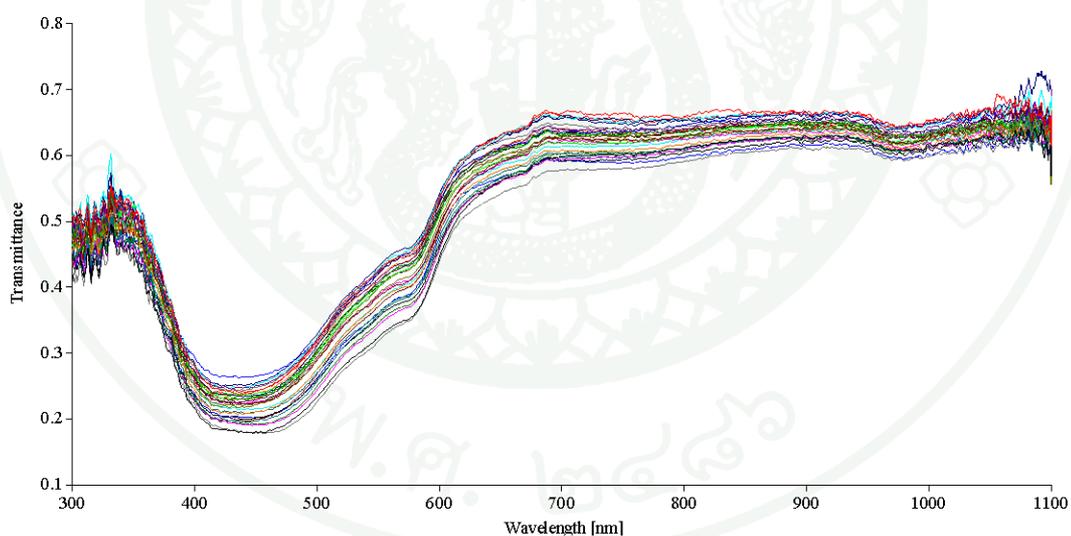
(ข)

ภาพที่ 54 (ต่อ)

F3 ใ้หมุกประเภทเซาท์ซีทีทองปรับปรุงคุณภาพโดยการเชื่อมสี่ สีของใ้หมุกไม่สม่ำเสมอ พื้นผิว ลักษณะไม่เรียบสม่ำเสมอและรูปร่างค่อนข้างกลม

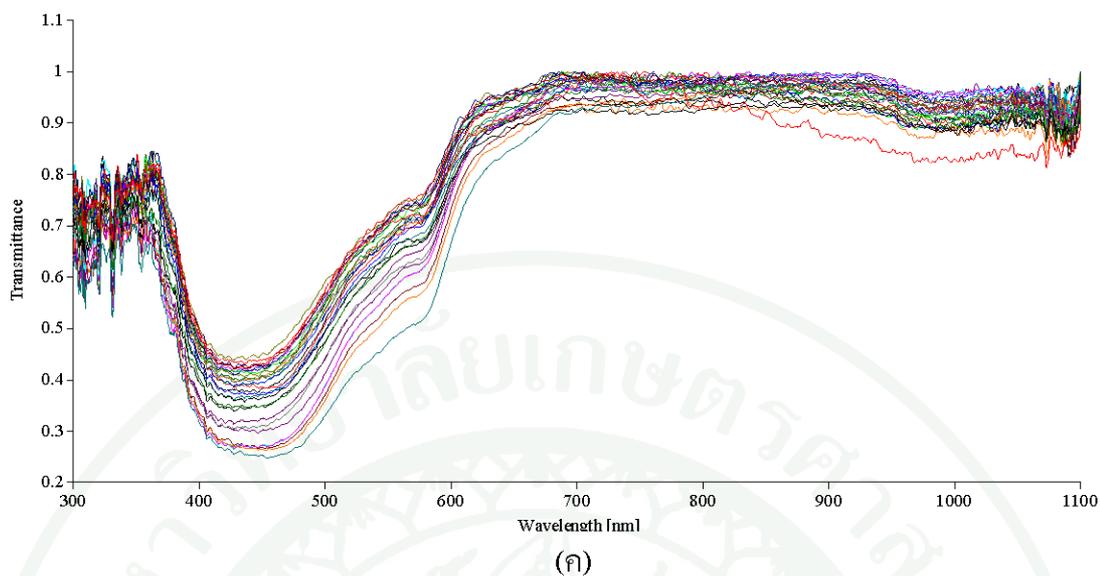


(ก)



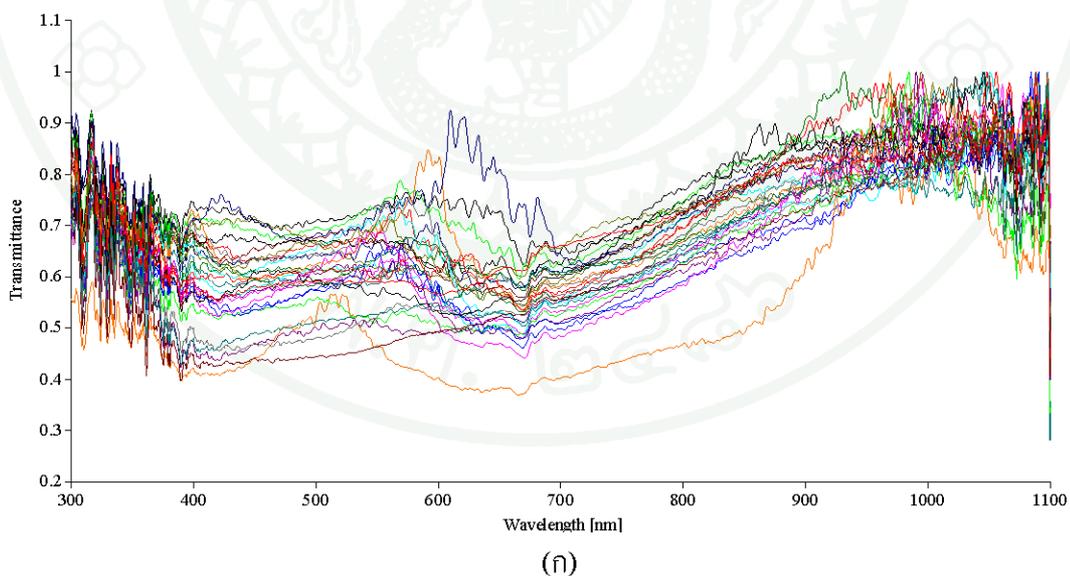
(จ)

ภาพที่ 55 (ก) สเปกตรัมของใ้หมุก F3 วด โดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (จ) สเปกตรัมของใ้หมุก F3 วด โดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้หมุก F3 วด โดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



ภาพที่ 55 (ต่อ)

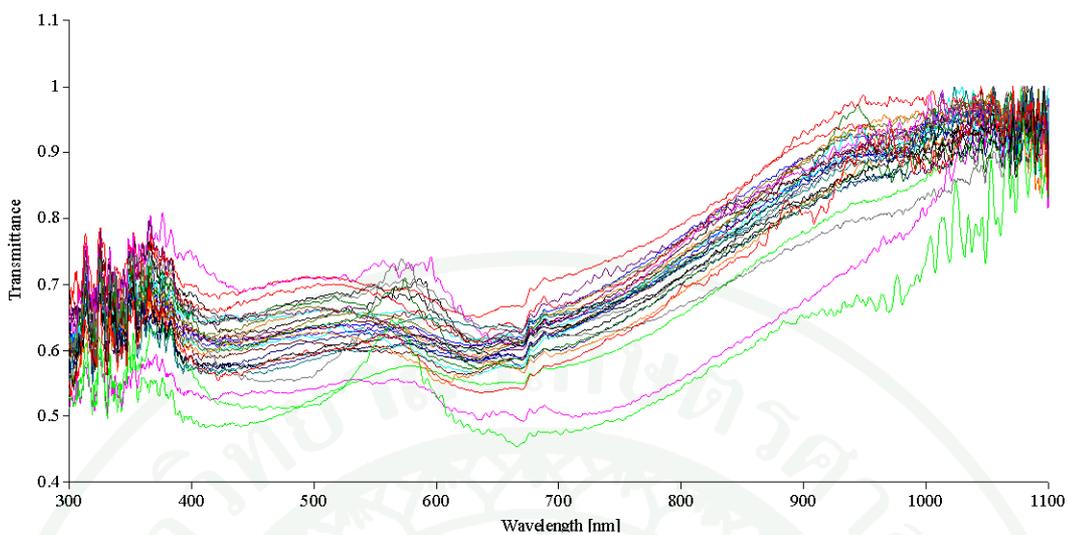
G1 ไข่มุกประเภทอะโกยาสีเทาเหลืองอมชมพูปรับปรุงคุณภาพโดยการอาบรังสีสีของไข่มุกไม่สม่ำเสมอ พื้นผิวลักษณะไม่เรียบสม่ำเสมอมีรอยร้าวและรูปร่างค่อนข้างกลม



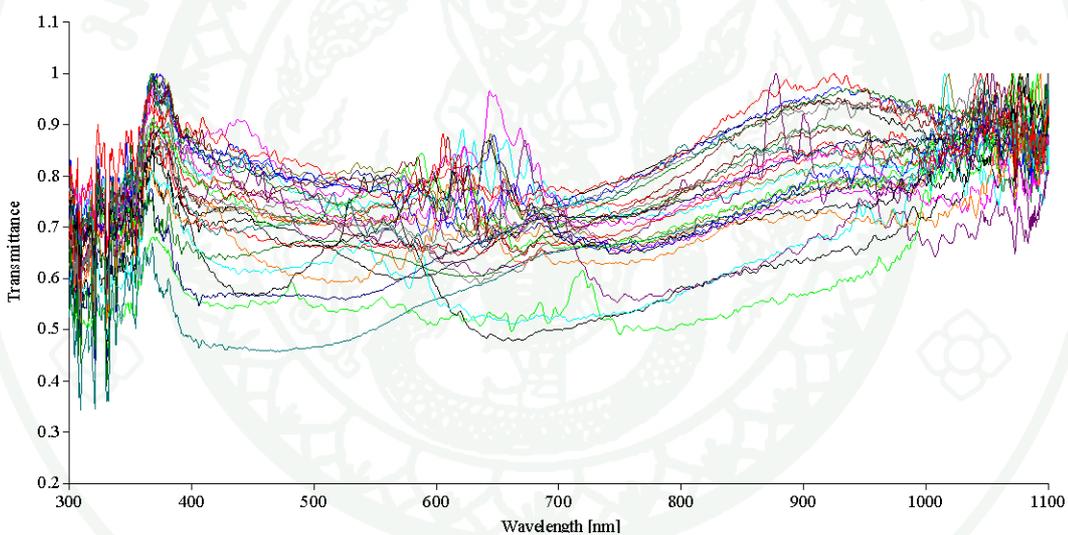
ภาพที่ 56 (ก) สเปกตรัมของไข่มุก G1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ข) สเปกตรัมของไข่มุก G1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°

(ค) สเปกตรัมของไข่มุก G1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



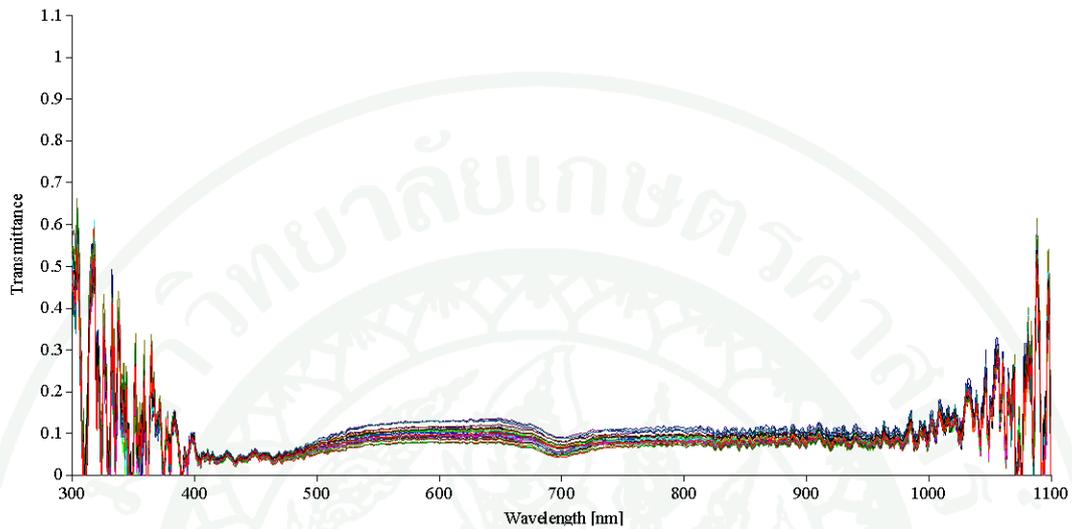
(จ)



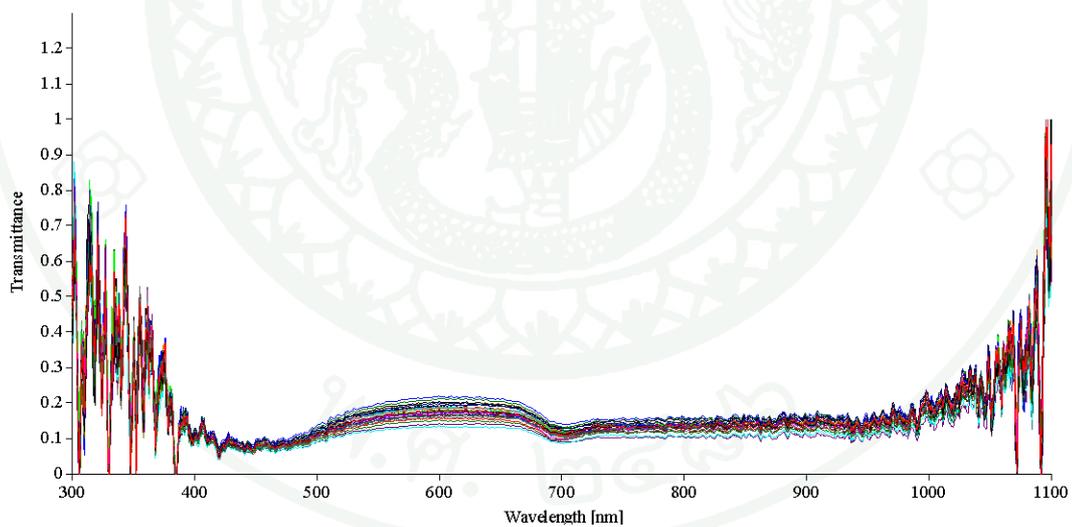
(ข)

ภาพที่ 56 (ต่อ)

H1 ใ้หมุกประเภทเซาท์ซีตีเจียวเหลือบทองปรับปรุงคุณภาพโดยการทำให้เป็นสี่เจียว สีของใ้หมุก สม่่าเสมอ พื้นผิวลักษณะค่อนข้างเรียบสมม่่าเสมอและรูปร่างค่อนข้างกลม

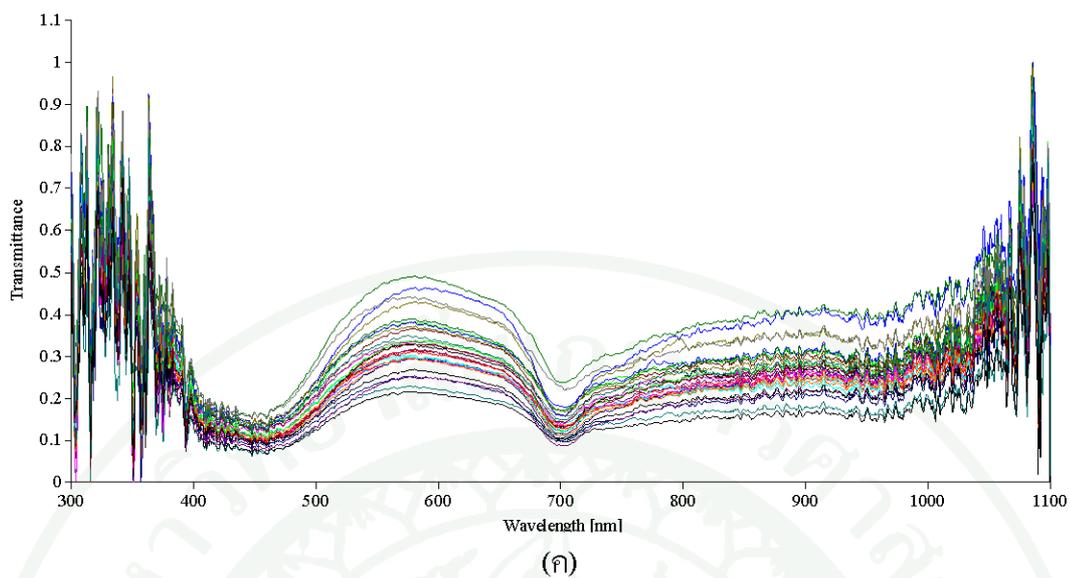


(ก)

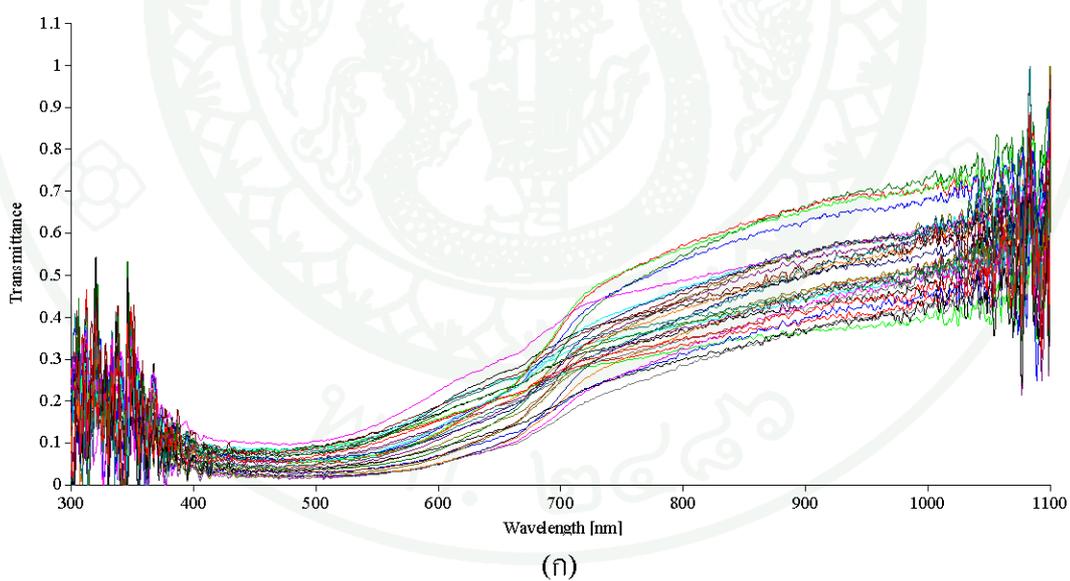


(จ)

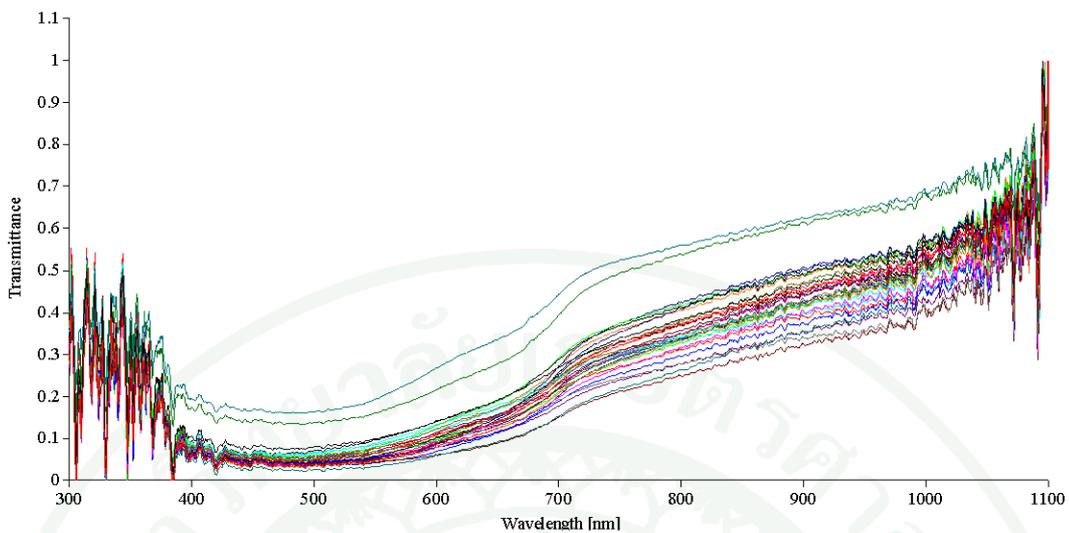
ภาพที่ 57 (ก) สเปกตรัมของใ้หมุก H1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (จ) สเปกตรัมของใ้หมุก H1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้หมุก H1 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



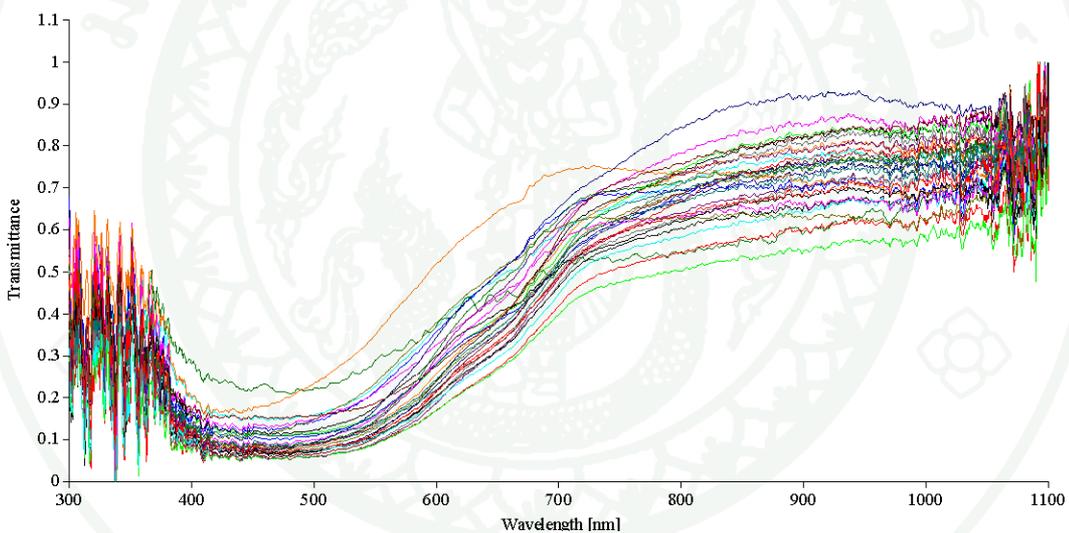
II ใข้มุกประเภทตาฮีตีสีน้ำตาลปรับปรุงคุณภาพโดยการฟอกสีค้ำออกแล้วทำเป็นสีน้ำตาล สีของใข้มุกก่อนจ้ำงส่มำเสมอ พื้นผิวลักษณะ ไม่เรียบส่มำเสมอและรูปร่างบิดเบี้ยวอย่างชัดเจน



ภาพที่ 58 (ก) สเปกตรัมของใข้มุก II วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (ข) สเปกตรัมของใข้มุก II วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใข้มุก II วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



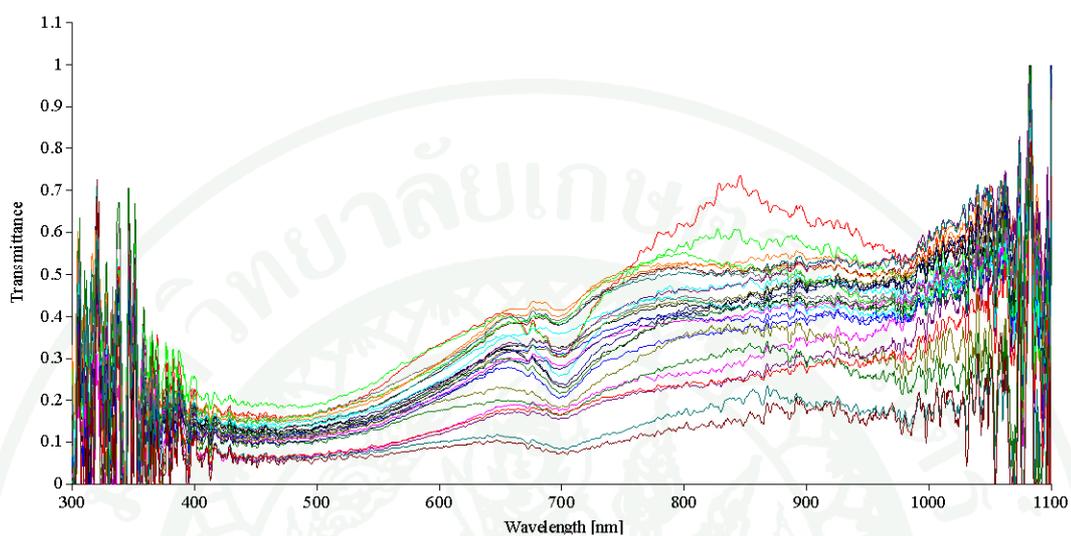
(ก)



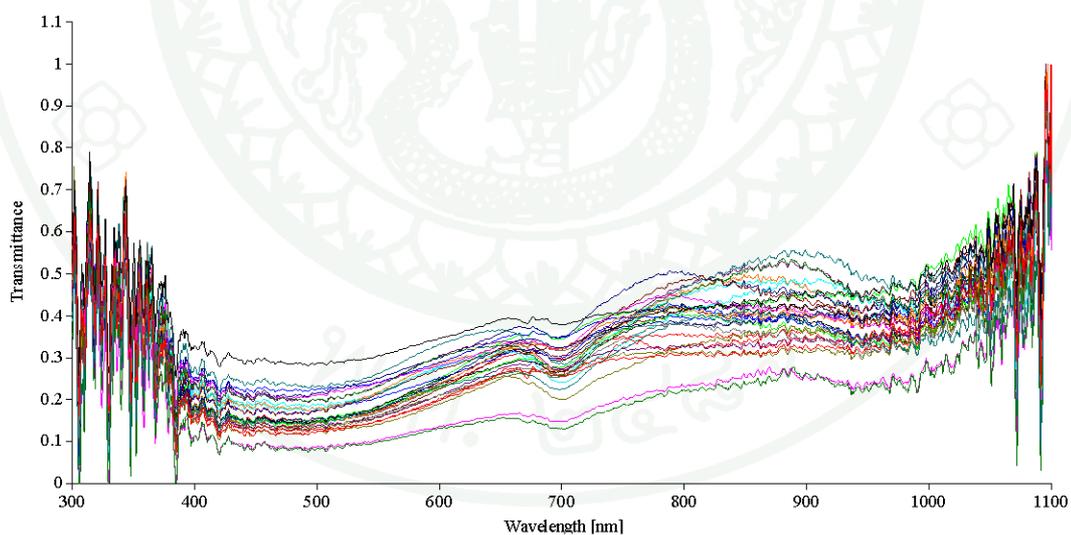
(ข)

ภาพที่ 58 (ต่อ)

I2 ใ้หมุกประเภทตาฮิติสีน้ำตาลปรับปรุงคุณภาพโดยการฟอกสีค้ำออกแล้วทำเป็นสีน้ำตาล สีของ ใ้หมุกก่อนข้างสมำเสมอ พื้นผิวลักษณะก่อนข้างเรียบสมำเสมอและรูปร่างไม่กลมอย่างชัดเจน

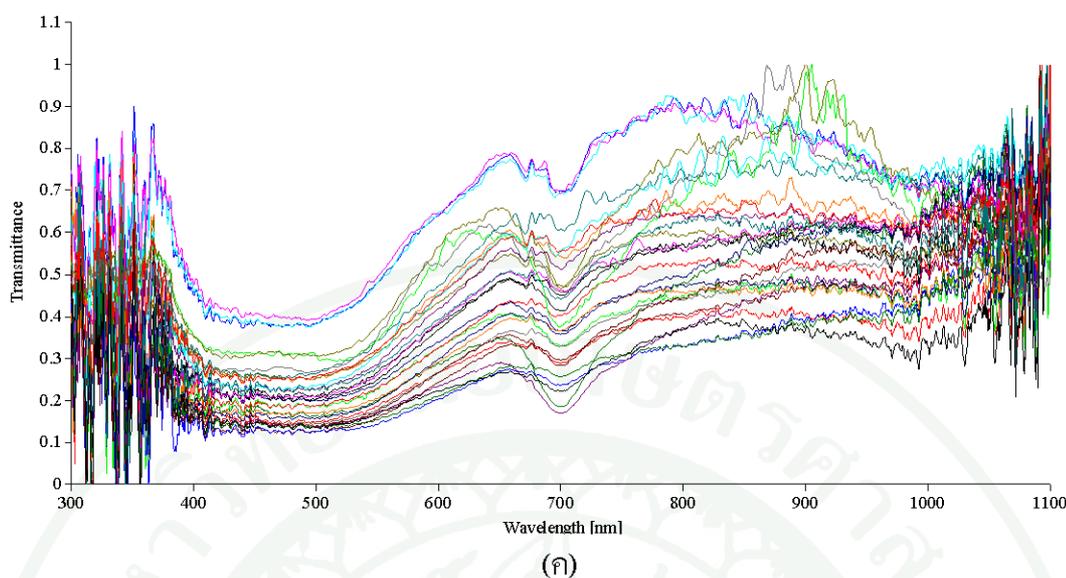


(ก)



(จ)

- ภาพที่ 59** (ก) สเปกตรัมของใ้หมุก I2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 25°
 (จ) สเปกตรัมของใ้หมุก I2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 45°
 (ค) สเปกตรัมของใ้หมุก I2 วัดโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ที่มุมรับแสง 75°



ภาพที่ 59 (ต่อ)

การวัดสีของไข่มุกด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีจะใช้รูปแบบการวัดแบบ 3 มุมรับแสง เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของไข่มุกมีความวาวจึงใช้รูปแบบของการวัดสีที่ใช้วัดความวาวของสีตามมาตรฐาน CIE โดยการวัดสีของไข่มุกนี้จะใช้การวัดรูปแบบ มุมส่องสว่างตั้งฉากกับตัวอย่างไข่มุกและมุมรับแสงหรือตัวตรวจวัดประกอบด้วย 3 มุมคือ 25° 45° และ 75° สเปกตรัมที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อสังเกตความต่างของสเปกตรัม โดยการวัดในแต่ละมุมจะใช้การวัดโดยหมุนตัวอย่าง 30 ครั้งเพื่อให้ได้สเปกตรัมของพื้นผิวไข่มุกทั้งหมด เมื่อพิจารณาตัวอย่างไข่มุกพบว่าสเปกตรัมที่ได้จากไข่มุกจะมีลักษณะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับสีและความสม่ำเสมอของผิวไข่มุกจึงทำให้สามารถแยกสเปกตรัมของไข่มุกได้ การศึกษาสเปกตรัมจะเริ่มจากไข่มุกน้ำเค็มสีธรรมชาติเมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของทั้ง 3 มุมรับแสง โดยนำสเปกตรัมที่ได้จากการวัด 30 ครั้งในแต่ละมุมรับแสงหาค่าเฉลี่ยของสเปกตรัม จะพบว่าสเปกตรัมที่ได้จะมีความคล้ายกันเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นสเปกตรัมของไข่มุก A1 ที่จะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยสเปกตรัมที่ได้จากมุมรับแสง 45° จะมีความใกล้เคียงกันมากแต่สเปกตรัมที่ได้มุม 25° และ 75° มีความแตกต่างกันมาก ไข่มุก A2 มีสเปกตรัมที่คล้ายกันของทั้ง 3 มุมแต่ในมุมรับแสง 25° มีค่าการส่งผ่าน (Transmittance) ที่ค่อนข้างต่างกันในการวัด 30 ครั้ง รวมถึงไข่มุก A3 และ A4 ที่มีค่าการส่งผ่านที่แตกต่างกันในมุมรับแสง 25° และ 75° ไข่มุก A5 สเปกตรัมของทั้ง 3 มุมรับแสงมีสเปกตรัมที่คล้ายกันและมีค่าการส่งผ่านใกล้เคียงกันในการวัด 30 ครั้งของแต่ละมุมรับแสง ไข่มุก A6 สเปกตรัมที่ได้จะมีหน้าตาต่างไปจากตัวอย่างไข่มุกที่ผ่านมาแต่สเปกตรัมของการวัด 30 ครั้งคล้ายกันทั้ง 3 มุมรับแสงและมีค่าการ

ส่งผ่านที่ใกล้เคียงกันในการวัดแต่ละมุมรับแสงสเปกตรัม A7 และ A8 มีลักษณะที่คล้ายกันจากค่าเฉลี่ยของการวัด 30 ครั้ง ที่มุมรับแสง 45° แต่ที่มุมรับแสง 25° และ 75° มีความแตกต่างของสเปกตรัมในการวัด 30 ครั้ง ไซมูก A9 สเปกตรัมค่าเฉลี่ยของมุมรับแสง 3 มุมมีลักษณะคล้ายกันต่างกันที่มุม 25° มีค่าการส่งผ่านของการวัด 30 ครั้งค่อนข้างต่างกันมากสเปกตรัม B1 จะต่างกับสเปกตรัมที่ผ่านมาทั้งหมดโดยจะมียอดที่ประมาณ 700 นาโนเมตร ซึ่งไซมูก B3 และ B4 มีสเปกตรัมที่คล้ายกับไซมูก B1 แต่จะไม่มียอดแหลมลงที่ตำแหน่ง 700 นาโนเมตรต่างจากไซมูก B2 ที่สเปกตรัมไม่มีตำแหน่งยอดใดๆ ไซมูก D1 และ E1 มีสเปกตรัมคล้ายกันและมีค่าการส่งผ่านที่ใกล้เคียงกันในการวัดแต่ละมุมรับแสงแต่ต่างตรงตำแหน่งยอดของไซมูก E1 จะกว้างกว่ายอดของไซมูก D1 ต่อมาเป็นกลุ่มไซมูกน้ำจืดสีธรรมชาติสเปกตรัมที่ได้จากไซมูก C1 จะมียอดกว้างที่บริเวณ 400 ถึง 500 นาโนเมตรและมีค่าการส่งผ่านใกล้เคียงกันในแต่ละมุมรับแสง ไซมูก C2 มีลักษณะสเปกตรัมคล้าย C1 แต่จะมียอดแหลมที่ 500 นาโนเมตรด้วย ส่วนไซมูก C3 C4 C5 C6 และ C9 มีสเปกตรัมคล้ายกันโดยจะมียอดแหลมที่ประมาณ 400 นาโนเมตรแต่จะต่างกันบ้างในช่วง 800-1000 นาโนเมตรแต่ยอดของไซมูก C6 จะไม่แหลมมากและในไซมูกกลุ่มนี้มีค่าการส่งผ่านของมุมรับแสง 25° และ 75° มีค่าค่อนข้างต่างกันในแต่ละมุมการวัดสเปกตรัมของไซมูก C7 จะคล้ายกับสเปกตรัมของไซมูก C1 สเปกตรัมของไซมูก C8 จะต่างจากสเปกตรัมของไซมูกเมื่ออื่นตรงตำแหน่งยอดจะกว้างเป็นแถบตั้งแต่ 400 ถึง 600 นาโนเมตร ต่อมาเป็นกลุ่มไซมูกสีที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยไซมูก F1 จะมีสเปกตรัมคล้ายกับไซมูก A6 ส่วนไซมูก F2 และ F3 จะมีสเปกตรัมคล้ายกันไซมูกทั้ง 3 เม็ดนี้มีค่าการส่งผ่านของการวัดในแต่ละมุมรับแสงใกล้เคียงกัน ไซมูก G1 จะมีสเปกตรัมคล้ายกันที่มุมรับแสง 25° และ 45° แต่จะต่างจากมุมรับแสง 75° ซึ่งสเปกตรัมของการวัดแต่ละครั้งในมุมนี้มีความแตกต่างกันมาก ไซมูก H1 และ I2 เช่นเดียวกันมีความคล้ายกันที่มุมรับแสง 25° และ 45° แต่ในมุมรับแสง 75° ถึงจะมีสเปกตรัมที่คล้ายกันแต่ค่าการส่งผ่านค่อนข้างต่างกันมากสเปกตรัมของ I1 มีลักษณะคล้ายกับ F1 ค่าการส่งผ่านของแต่ละมุมรับแสงมีค่าใกล้เคียงกันด้วย ตำแหน่งของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์นี้มีความสัมพันธ์กับการดูกลิ่นของแต่ละสีซึ่งใช้การแปลงผลจากสเปกตรัมเป็นค่า CIE L*a*b* โดยใช้โปรแกรม Avasoft ในการคำนวณหาค่า L*a*b* และได้คำนวณหาค่าความต่างสี(MCDM) ของไซมูกภายในตัวอย่างเดียวกัน เนื่องจากการทดลองนี้ใช้การหมุนตัวอย่างเพื่อต้องการวัดสีของไซมูกให้ได้ทั่วทั้งตัวอย่าง ดังนั้นค่าความต่างสีที่ได้จากการคำนวณจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความต่างของสีไซมูกภายในตัวอย่างเดียวกันซึ่งหาค่าความต่างสีได้จากสมการ(9)

$$MCDM = \frac{\sum_{i=1,N} [(L^*_i - \bar{L}^*)^2 + (a^*_i - \bar{a}^*)^2 + (b^*_i - \bar{b}^*)^2]^{1/2}}{N} \quad (9)$$

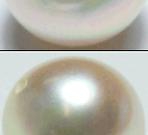
โดยผลของค่าเฉลี่ย $L^*a^*b^*$ และค่าความต่างสี (MCDM) แสดงในตารางที่ 3 ผลที่แสดงในตารางนี้ แบ่งไข่มุกเป็น 3 ส่วนคือ ไข่มุกน้ำเค็มสีธรรมชาติ ไข่มุกน้ำจืดสีธรรมชาติและไข่มุกปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของ $L^*a^*b^*$ และค่าความต่างสี (MCDM) จากการวัด 30 ครั้ง

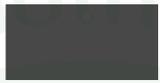
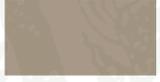
น้ำเค็ม	25				45				75			
	L*	a*	b*	MCDM	L*	a*	b*	MCDM	L*	a*	b*	MCDM
A1	78.78	2.33	1.42	10.54	64.08	1.21	2.28	1.94	69.50	2.95	-2.68	8.56
A2	77.31	-2.40	0.51	5.19	73.68	-1.18	0.96	2.32	75.12	0.02	-0.92	4.06
A3	86.66	2.60	6.55	2.62	83.50	2.97	9.12	1.22	85.86	2.40	7.59	2.30
A4	87.14	0.37	10.29	5.40	74.44	3.47	12.14	1.33	80.36	4.32	8.22	4.02
A5	89.00	-0.46	13.50	1.62	78.89	1.08	15.68	0.84	85.04	0.37	12.82	1.64
A6	70.76	-1.36	10.06	4.35	60.48	-0.14	10.15	1.42	68.42	0.71	6.48	4.16
A7	89.85	1.16	10.57	4.76	79.36	3.79	11.54	3.58	84.26	3.05	7.13	5.85
A8	83.24	2.51	5.75	6.25	74.48	2.95	8.36	3.30	82.19	2.25	2.41	7.08
A9	91.15	-0.78	7.48	3.32	81.84	2.07	8.84	1.59	84.53	3.27	5.88	3.48
B1	53.40	0.24	3.04	8.90	50.40	0.60	1.95	3.21	59.17	-0.32	0.83	8.34
B2	33.34	-0.68	-0.02	7.31	32.86	-0.60	-0.79	7.07	47.57	0.25	-4.16	6.87
B3	26.04	4.41	2.78	2.27	30.31	4.58	2.16	1.35	36.14	3.82	0.69	3.89
B4	14.60	1.62	1.74	4.77	23.75	1.34	2.16	4.85	29.65	0.71	1.27	9.48
D1	63.33	2.16	9.02	2.16	65.45	2.67	9.47	1.41	72.07	1.96	3.88	4.18
E1	49.69	3.07	21.95	4.11	50.41	4.11	21.27	2.60	65.66	0.29	13.79	11.27
น้ำจืด	L*	a*	b*	MCDM	L*	a*	b*	MCDM	L*	a*	b*	MCDM
C1	82.16	-0.14	11.01	2.48	72.42	4.92	9.83	1.47	77.53	5.23	9.30	2.65
C2	88.29	6.93	4.69	2.59	81.50	7.90	6.91	2.48	81.90	8.09	7.24	3.12
C3	86.62	3.27	5.74	2.03	82.50	2.59	6.99	1.32	86.09	1.52	4.70	2.68
C4	73.94	0.56	6.56	10.86	72.97	0.35	4.50	7.30	78.26	1.18	2.89	9.06
C5	82.41	0.60	8.20	6.31	78.37	1.62	8.23	3.57	85.57	1.96	4.59	5.84
C6	42.62	4.90	12.98	8.12	41.26	5.41	13.88	5.29	70.91	2.91	9.02	6.92
C7	81.92	8.32	7.92	2.73	78.46	8.94	10.19	1.92	80.75	8.52	9.14	2.77
C8	73.64	4.93	-1.70	3.39	68.66	5.58	0.18	2.32	71.75	4.70	-0.22	5.23
C9	92.22	0.18	4.61	3.40	93.60	0.05	5.30	2.27	92.80	0.23	6.75	3.84
ปรับปรุง	L*	a*	b*	MCDM	L*	a*	b*	MCDM	L*	a*	b*	MCDM
F1	78.78	2.33	1.42	5.13	28.19	10.61	19.74	3.17	52.83	2.38	19.29	6.47
F2	79.46	5.54	28.59	2.46	72.55	7.17	26.65	1.99	76.95	5.80	27.56	3.71
F3	76.31	7.45	27.23	4.97	69.68	8.94	24.52	2.28	75.43	7.12	25.96	4.37
G1	67.25	-2.68	1.66	5.96	63.17	-2.18	1.28	2.69	73.68	0.83	-1.40	7.85
H1	17.94	-1.03	11.91	2.36	17.20	-0.43	10.82	0.98	26.62	-2.30	17.20	2.30
I1	16.72	9.82	8.49	5.45	15.31	8.31	6.36	3.81	25.43	13.10	13.97	6.15
I2	19.44	6.29	7.40	4.53	23.72	5.51	4.90	2.85	28.57	8.49	7.58	9.09

จากนั้นนำค่า L*a*b* แทนค่าสีในโปรแกรม Photoshop เพื่อเปรียบเทียบสีไข่มุกที่ได้จากการวัดทั้ง 3 มุมของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์กับสีของไข่มุกที่มองเห็นด้วยสายตาดังแสดงในตารางที่ 4

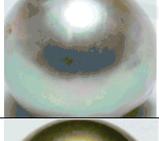
ตารางที่ 4 แสดงการเทียบสีของไข่มุก

ตัวอย่าง	สีของไข่มุก	สีจากมุม 25°	สีจากมุม 45°	สีจากมุม 75°
A1				
A2				
A3				
A4				
A5				
A6				
A7				
A8				
A9				

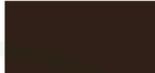
ตารางที่ 4 (ต่อ)

ตัวอย่าง	สีของไข่มุก	สีจากมุม 25°	สีจากมุม 45°	สีจากมุม 75°
B1				
B2				
B3				
B4				
D1				
E1				
C1				
C2				
C3				
C4				

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ตัวอย่าง	สีของไข่มุก	สีจากมุม 25°	สีจากมุม 45°	สีจากมุม 75°
C5				
C6				
C7				
C8				
C9				
F1				
F2				
F3				
G1				
H1				

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ตัวอย่าง	สีของไข่มุก	สีจากมุม 25°	สีจากมุม 45°	สีจากมุม 75°
I1				
I2				

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางทำให้เห็นว่าสีไข่มุกมีความเหลือบสีซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของไข่มุกการวัดสีของไข่มุกจึงต้องมีการวัดด้วยหลายมุมเพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกัน ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันแต่มุม 45° มีค่าเฉลี่ย L^* น้อยกว่ามุม 25° และ 75° แต่ค่า a^* b^* มีค่าไม่ต่างจากมุมรับแสง 25° และ 75° โดยค่าความต่างสี (MCDM) คำนวณได้จาก $L^*a^*b^*$ เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสม่ำเสมอของสีของไข่มุกจากการวัดในแต่ละตัวอย่างได้จากการวัดเฉลี่ยโดยการหมุนตัวอย่างซึ่งใช้การวัด 30 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง พบว่าเมื่อหมุนตัวอย่างที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอจะทำให้ได้ค่า $L^*a^*b^*$ แตกต่างกันมากในบางครั้งซึ่งจะสอดคล้องกับสเปกตรัมที่ได้จากการวัดในตัวอย่างเดียวกัน เนื่องจากเมื่อแสงตกกระทบลงบนตัวอย่างในบางด้านของผิวไข่มุกอาจเกิดการกระเจิงแสงมากกว่าด้านอื่นจึงทำให้ค่า $L^*a^*b^*$ สูงขึ้นส่งผลให้เมื่อคำนวณค่าความต่างสีค่าสูงมาก ดังนั้นสามารถบอกได้ว่ามุม 45° มีความเหมาะสมต่อการวัดสีของไข่มุกมากกว่ามุมอื่น เนื่องจากเมื่อดูสเปกตรัมการวัดไข่มุกในแต่ละตัวอย่างมุม 45° จะมีสเปกตรัมที่คล้ายกันมากกว่าและมีการส่งผ่านที่ใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวัดสีไข่มุกที่มุมรับแสง 45° สามารถทำการวัดซ้ำได้ดีที่สุด ส่วนมุมรับแสง 25° และ 75° ถึงแม้จะมีสเปกตรัมเฉลี่ยที่คล้ายกับมุม 45° แต่การวัด 30 ครั้งในแต่ละตัวอย่างมีค่าการส่งผ่านที่แตกต่างกันค่อนข้างมากในบางตัวอย่าง อย่างไรก็ตามการวัดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีจะบอกได้เฉพาะลักษณะของสเปกตรัมของไข่มุกและค่าสีที่วัดได้โดยไม่สามารถบอกได้ถึงความต่างของสีธรรมชาติกับสีที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและเมื่อนำค่า $L^*a^*b^*$ แทนค่าในโปรแกรม Photoshop ดังตารางที่ 4 จะพบว่าไข่มุกที่มองเห็นด้วยสายตาเป็นสีขาวหรือขาวอมชมพูเมื่อแทนค่าในโปรแกรม Photoshop สีที่แสดงออกมาเป็นสีชมพูอ่อนถึงชมพูเข้มขึ้นอยู่กับความเหลือบสีของไข่มุก ไข่มุกที่มีสีเหลือบมากสีที่วัดได้จาก 3 มุมจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

เช่น ไข่มุก A1, A4, A7, A8, A9, C5, B1 และ B2 ไข่มุกที่มีมีความยาวไม่มากค่าที่ได้เมื่อวัดด้วย เครื่องยิวีลีเปิดสเปกโทรมิเตอร์จะมีสีไม่ต่างกันมาก เช่น ไข่มุก C7, C8, C9, B3 และ B4 ส่วน ไข่มุกที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพสีที่ได้จากการวัดทั้ง 3 มุมก็เช่นกัน ถ้าไข่มุกตัวอย่างใดมีความยาว มากสีที่ได้จากการวัดทั้ง 3 มุมก็จะต่างกันด้วย เช่น ไข่มุก I1, F1 และ G1 เมื่อสังเกตจะพบว่าสีที่วัด ได้จากมุม 75° มีสีอ่อนกว่าสีที่วัดได้จากมุมอื่นซึ่งอาจเกิดจากมุมรับแสงตำแหน่ง 75° อยู่ใกล้กับมุม สะท้อนมากที่สุดจึงทำให้สีที่วัดได้จากมุมวัด 75° มีความยาวของไข่มุกรวมอยู่ด้วย



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

การวัดสีของไข่มุกด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์สเปกตรัมที่ได้จากการวัดโดยมุมรับแสงทั้ง 3 มุมนั้นมีความคล้ายคลึงกันแต่ผลที่ได้จากมุม 45° มีค่าความต่างสี(MCDM) น้อยที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวัดที่มุมรับแสง 45° มีค่าการวัดซ้ำที่ได้ผลดีที่สุดและผลจากค่าความต่างสี(MCDM) ยังบอกถึงความสม่ำเสมอของสีผิวและรูปร่างของไข่มุก สีที่ได้จากการวัดสีของไข่มุกนี้อ้างอิงตามระบบ CIE ซึ่งการเป็นระบบที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย และเมื่อนำค่าสี $L^*a^*b^*$ มาแทนค่าในโปรแกรม Photoshop เพื่อเปรียบเทียบสีไข่มุกที่มองเห็นด้วยตา กับสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าไข่มุกที่มีความวาวมากจะมีสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละมุมการวัด

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาสีของไข่มุกโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีนี้เป็น การเริ่มต้นการวัดสีของไข่มุกด้วยเครื่องมือ ซึ่งสีของไข่มุกมีความสำคัญมากต่อการประเมินราคาของไข่มุก เนื่องจากถ้ามีการใช้เครื่องมือในการวัดสีของไข่มุกจะส่งผลให้การประเมินราคาของไข่มุกมีมาตรฐานมากขึ้นและส่งผลดีต่อผู้ค้าและผู้บริโภค ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในการวัดมุมต่างๆและการใช้สีของตัวอย่างที่หลากหลายเพื่อผลิตเครื่องมือที่สามารถใช้ได้จริงในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สุริย์ ลิขิตทชัย. อัญมณีและเครื่องประดับ. ม.ป.ป.

Rodrigues. 2004. Color technology and paint, pp. 103-108. **In Proceedings of Color and Paints, Interim Meeting of the International Color Association.**

Berger-Schunn. 1994. **Practical Color Measurement: a Primer for the Beginner, a Reminder for the Expert.** John Wiley and Sons, Inc., New York.

Dalal, E.N. and Natale-Hoffman. 1999. **The Effect of Gloss on Color.** Color Research and Application 24: 369.

G. A. Klein. 2010. **Industrial Color Physics,** Herrenberg, Springer.

Minh A. Hoang, Jan-Mark Geusebroek, Arnold W.M. Smeulders. 2005. **Color texture measurement and segmentation.** J.Elsevier 85: 265-275.

N. G. F. Mamangkey, S. Agatonovic, and P. C. Southgate. 2010 **Assessing Pearl Quality Using Reflectance UV-Vis Spectroscopy: Does the Same Donor Produce Consistent Pearl Quality?.** Marine Drugs 8: 2517.

N. Nagata *et al.* 1997 **Modeling and Visualization for a Pearl-Quality Evaluation Simulator.** IEEE Trans. Visual. Graphics 3: 307.

Roy S. Berns. 2000. **Principles of Color Technology.** Third Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.

S. Karampelas, E. Fritsch, J.-Y. Mevellec, J.P. Gauthier, S. Sklavounos, and T. Soldatos. 2007 **Determination by Raman Scattering of the Nature of Pigments in Cultured**

Freshwater Pearls from the Mollusk Hyriopsis Cumingi. J. Raman Spectrosc. 38: 217.

S. Karampelas, E. Fritsch, J.-Y. Mevelle, S Sklavounos and T.Soldatos. 2009 **Role polyenes in the coloration of cultured freshwater pearls.** Eur. J. Mineral. 21: 85-97.

T.L. Tan, T.S. Tay, S.K Khairoman and Y.C. Low 2005 **Identification of an Imitation of pearl by FTIR, EDXRF and SEM.** J. Gemm 29: 316-324.

Y. Liu, J. E. Shigley, and K. N. Hurwit. 1999 **Iridescence Color of a Shell of the Mollusk Pinctada Margaritifera Caused by Diffraction.** Optics Express 4: 177.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นางสาวชญากาญจน์ รัศมีคุณารัตน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 17 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าพระนครเหนือ

