

การวัดบีอาร์ดีเอฟและการจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหม

นาย บุญเกียรติ ฉายเทพประสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEASUREMENT OF BRDF AND REFLECTANCE MODELING OF SILK FABRICS

Mr. Boonyakiat Chaiteprasith

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Imaging Technology

Department of Imaging and Printing Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดประสิทธิภาพและการจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหม
โดย	นาย บุญเกียรติ ฉายเทพประสิทธิ์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวาล คุร์พิพัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. สุดา เกียรติกำจรวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสี้อย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คุร์พิพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.สุดา เกียรติกำจรวงศ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา สีอประสาร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สุณี ภูสี่ม่วง)

บุญเกียรติ ฉายเทพประสิทธิ์: การวัดบีอาร์ดีเอฟและการจำลองการสะท้อนแสงของ
ผ้าไหม. (MEASUREMENT OF BRDF AND REFLECTANCE MODELING OF
SILK FABRICS) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. ชวาล คุรุพิพัฒน์, อ. ที่
ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร.สุดา เกียรติกำจรวงศ์, 197 หน้า.

ผ้าไหมเป็นสิ่งทอที่มีความมันวาวมากกว่าสิ่งทอประเภทอื่น เนื่องจากผ้าไหมมี
ลักษณะการสะท้อนแสงที่มีความเฉพาะตัว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาลักษณะการสะท้อนแสง
ของผ้าไหม โดยวัดค่า Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) ของผ้า
ไหม 3 ชนิด ที่มีการทอแตกต่างกัน และได้นำเสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงของพื้นผิวผ้า
ไหมที่คำนึงถึงการสะท้อนของแสงพุ่งและแสงกล้ำ โดยใช้วิธีการหาค่าความผิดพลาดกำลัง
สองน้อยที่สุด (least-square error) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดกับแบบจำลอง เมื่อ
ทดสอบแบบจำลองที่ได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (Phong
reflectance model) แบบจำลองการสะท้อนแสงของโอเรนและนayar (Oren-Nayar
reflectance model) แบบจำลองการสะท้อนแสงของวอร์ด (Ward reflectance model) และ
แบบจำลองของแอสซิกมิน (Ashikhmin-Shirley reflectance model) พบว่า แบบจำลองที่
นำเสนอมีความสัมพันธ์กับค่า BRDF ที่วัดได้ของผ้าไหมมากกว่าตัวอย่างแสดงผลที่ดีกว่า
ของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา มีค่าความความ
ผิดพลาดของค่าที่วัดจากผ้าไหมกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนออยู่ที่ 0.0214 จาก
แบบจำลองของฟองมีค่าอยู่ที่ 0.0192 จากแบบจำลองของโอเรนและนayar อยู่ที่ 0.1610
จากแบบจำลองของวอร์ด อยู่ที่ 0.1036 และจากแบบจำลองของแอสซิกมิน อยู่ที่ 0.0843 และ
แบบจำลองใหม่ของการสะท้อนแสงของผ้าไหมนี้ สามารถนำไปอธิบายลักษณะการสะท้อน
แสงของผ้าไหม

ภาควิชา.....วิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์.....ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีทางภาพ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา_2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5072335523: MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEYWORDS : BRDF / REFLECTANCE MODEL / SILK / FABRICS

BOONYAKIAT CHAITEPPRASITH: MEASUREMENT OF BRDF AND REFLECTANCE MODELING OF SILK FABRICS. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR CHAWAN COOIPAT, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: PROFESSOR SUDA KIATKAMJORNWONG, Ph.D., 197 pp.

Silk fabric is a fabric in which its gloss is perceived higher than other fabrics due to its specific reflectance. This research studied the reflectance characteristic of silk fabric by measuring Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) of three types of silk fabric having different weaving styles. Then silk fabrics reflectance model was proposed by considering a specular lobe and diffuse lobe using least square error method to fit the measured BRDF with the proposed model. When comparing the proposed model with Phong reflectance model, OrenNayar reflectance model, Ward reflectance model and Ashikhmin–Shirley reflectance model, it was found that the proposed model fitted the measured BRDF better than the other models. A good example of the better result is given as follows. The fabrics sample 3 was measured at -60 degrees incident angle, the RMS errors of the proposed model was 0.0214, Phong reflectance model was 0.01918, OrenNayar reflectance model was 0.1610, Ward reflectance model was 0.1036 and Ashikhmin–Shirley reflectance model was 0.0843. The proposed model can thus be used to approximate, analyze and elucidate the characteristics of light reflection of the three silk fabrics.

Department : Imaging and Printing Technology Student's Signature

Field of Study : Imaging Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2009 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศ.ดร. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ และ ผศ.ดร. ชวาล คูร์พิพัฒน์ ที่ให้คำแนะนำ ตักเตือน และสั่งสอนข้าพเจ้า จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ ขอขอบพระคุณ ศ.ดร. โยอิชิ มิยาเกะ จาก ศูนย์วิจัยฟรอนเทียร์เมดิคัลเอนจินีเยริง แห่ง มหาวิทยาลัยชิบะ ประเทศญี่ปุ่น ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือวิจัย ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุจิตรา สื่อประสาร ที่ช่วยให้คำแนะนำที่ดีในหลายเรื่อง ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลามาให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณบุคลากรในภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคน ที่คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้า และสุดท้ายขอขอบพระคุณบิดาและมารดาของข้าพเจ้าที่ช่วยส่งเสริมข้าพเจ้ามาโดยตลอด

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญกราฟ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4. ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6. วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1. ทฤษฎี.....	4
2.1.1. การสะท้อนแสงของผิววัตถุ (surface reflection)	4
2.1.1.1. การสะท้อนแสงแบบก้ำ (specular reflection)	5
2.1.1.2. การสะท้อนแสงแบบฟุ้ง (diffuse reflection).....	6
2.1.1.3. การสะท้อนแสงแบบผสม (mixed reflection)	6
2.1.2. การวัดการแผ่รังสี (radiometric)	7
2.1.2.1. พลังงานการแผ่รังสี (radiant energy).....	7

2.1.2.2. กำลังการแผ่รังสี (radiant power) หรือ ฟลักซ์ (radiant flux)	7
2.1.2.3. ปริมาณกำลังแผ่รังสีที่ตกลงบนพื้นที่ (irradiance) และปริมาณกำลัง รังสีที่แผ่ออกจากพื้นที่ (exitance)	8
2.1.2.4. ความเข้มของกำลังการแผ่รังสี (radiant intensity)	9
2.1.2.5. การแผ่รังสี (radiance)	11
2.1.2. การวัดแสง (photometry).....	13
2.1.3. ปีอาร์ดีเอฟ (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)	17
2.1.3.1. แบบจำลองการสะท้อนแสงของแสงแบบพุ่ง.....	18
2.1.3.2. แบบจำลองการสะท้อนแสงของแสงแบบกล้ำ.....	21
2.1.3.3. แบบจำลองการสะท้อนแสงของแสงแบบผสม	22
2.1.3.4. สมบัติเชิงแสงของปริซึม.....	23
2.2. วารสารปริทรรศน์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1. วิธีการทดลองตอนที่ 1 การวัดค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม	29
3.2. วิธีการทดลองตอนที่ 2 การเสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงและทดสอบแบบจำลอง	25
3.2.1. วิธีการคำนวณหาค่าคงตัวในแบบจำลองการสะท้อนแสงโดยใช้วิธีกำลังสอง น้อยที่สุด (least-square error method)	36
3.2.2. วิธีการคำนวณหาความผิดพลาดโดยใช้ root-mean-square errors	37
3.2.3. รายละเอียดของชุดคำสั่งที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.2.4. แผนการทำงานของชุดคำสั่งในงานวิจัย	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	40
4.1. การทดลองตอนที่ 1: ลักษณะการสะท้อนแสง	40
4.1.1. ผลของกราฟที่ 4.1	40

4.1.2. ผลของกราฟที่ 4.2	41
4.1.3. ผลของกราฟที่ 4.3	42
4.1.4. ผลของกราฟที่ 4.4	43
4.1.5. ผลของกราฟที่ 4.5	44
4.1.6. ผลของกราฟที่ 4.6	45
4.1.7. ผลของการใช้ผู้สังเกตเปรียบเทียบลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหม	47
4.2. วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1: ลักษณะการสะท้อนแสง	49
4.3. เสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหม	55
4.4. อภิปรายและวิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 2 : แบบจำลองการสะท้อนแสง	63
4.4.1. ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ	63
4.4.2. เปรียบเทียบแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่น	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	90
5.1. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	90
5.2. ข้อเสนอแนะ	93
รายการอ้างอิง	95
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก	98
ภาคผนวก ข	191
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	197

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 การวัดการแผ่รังสีและการวัดแสง.....	16
ตารางที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดจากค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย	89

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 ลักษณะการสะท้อนแสงแบบพุ่ง แบบกล้า และแบบผสม	5
ภาพที่ 2.2 ปริซึมฐานสามเหลี่ยมที่เกิดการกระจายแสง	23
ภาพที่ 2.3 ปริซึมฐานสามเหลี่ยมที่เกิดการสะท้อนแสง	24
ภาพที่ 3.1 ภาพผิวผ้าไหมตัวอย่างที่ 1	26
ภาพที่ 3.2 ภาพผิวผ้าไหมตัวอย่างที่ 2	27
ภาพที่ 3.3 ภาพผิวผ้าไหมตัวอย่างที่ 3	27
ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างแผ่นกระดาษที่ใช้ติดกับผ้าไหมเพื่อใช้ในการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม	30
ภาพที่ 3.5 แผนภูมิการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 1 สำหรับการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม	31
ภาพที่ 3.6 แผนภูมิการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 2 สำหรับการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม	32
ภาพที่ 3.7 แผนภูมิการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 3 สำหรับการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม	33
ภาพที่ 3.8 แผนภูมิการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 4 สำหรับการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม	34
ภาพที่ 4.1 ทางเดินของแสงที่ตกกระทบลงบนผิวผ้าไหมแล้วเกิดการสะท้อนรอบทิศทางแบบแสงพุ่ง	55
ภาพที่ 4.2 เวกเตอร์ทางเดินแสง เมื่อเวกเตอร์แสง a ตกกระทบลงที่ผิววัตถุแล้ว สะท้อนแสงไปในทิศทางเวกเตอร์ b, c และ d	56
ภาพที่ 4.3 การสะท้อนแสงแบบกล้าที่ปรกติ	59
ภาพที่ 4.4 การสะท้อนแสงแบบกล้าที่เกิดออฟสเปกคูลาร์ของผิวผ้าไหม	59
ภาพที่ 4.5 ลักษณะการสะท้อนแสงที่สามารถคำนวณจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ 62	
ภาพที่ 5.1 ทิศทางของแสงตกกระทบและมุมรับภาพ เมื่อมองผิวผ้าไหมที่ระยะทางต่าง ๆ	91

สารบัญญกราฟ

กราฟที่ 4.1 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม 0 องศา.....	41
กราฟที่ 4.2 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม -15 องศา.....	42
กราฟที่ 4.3 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม -30 องศา.....	43
กราฟที่ 4.4 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม -45 องศา.....	44
กราฟที่ 4.5 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม -60 องศา.....	45
กราฟที่ 4.6 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม -75 องศา.....	47
กราฟที่ 4.7 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้มุมตกกระทบบ - 60 องศา.....	50
กราฟที่ 4.8 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตก กระทบบที่มุม 0 องศา.....	63
กราฟที่ 4.9 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตก กระทบบที่มุม -15 องศา.....	64

- กราฟที่ 4.46 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสง
จากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก
แบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1
ที่มุมตกกระทบ -30 องศา 86
- กราฟที่ 4.47 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสง
จากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก
แบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1
ที่มุมตกกระทบ -45 องศา 86
- กราฟที่ 4.48 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสง
จากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก
แบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1
ที่มุมตกกระทบ -60 องศา 87
- กราฟที่ 4.49 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสง
จากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก
แบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1
ที่มุมตกกระทบ -75 องศา 87

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผ้าไหมเป็นสิ่งทอชนิดหนึ่งที่มีมูลค่าสูงทางธุรกิจการส่งออกของประเทศ ซึ่งสามารถทำรายได้เข้าประเทศไทย 1339.39 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2549 [1] ดังนั้นถ้าสามารถขยายตลาดส่งออกผ้าไหม จะสามารถทำรายได้เพิ่มให้กับประเทศได้อีกมาก แต่จากข้อมูลทางสถิติของตลาดส่งออกเสื้อผ้าสำเร็จรูปทำจากไหม 30 ประเทศแรกของ [2] เห็นว่า อัตราการขยายตัวของตลาดส่งออกไหมไทยมีความอึมตัวมาหลายปีแล้ว ปัจจุบันจึงควรวหาวิธีการเพื่อขยายตลาดส่งออก

สาเหตุที่อัตราการขยายตัวของตลาดส่งออกอุตสาหกรรมไหมไทยมีความอึมตัว อาจเป็นปัญหาเรื่องของระยะทางระหว่างผู้ซื้อกับผู้ผลิต เนื่องจากการเลือกซื้อสิ่งทอต่าง ๆ นั้น อิงกับความพึงพอใจของผู้ซื้อ จึงต้องมีการเลือกดูทั้งจากสิ่งทอจริง หรือจากภาพถ่ายสิ่งทอเหล่านั้น ปัจจุบันสามารถลดระยะทางได้ด้วยพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถให้ผู้ซื้อและผู้ขายติดต่อกันได้โดยตรงผ่านอินเทอร์เน็ต แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นต่อมา คือ ภาพผ้าไหมหรือสินค้าที่ผลิตจากผ้าไหมแสดงในพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์นั้น เป็นภาพ 2 มิติเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ผู้ซื้อเห็นสินค้าไม่ครบถ้วน และหากต้องนำเสนอสินค้า แบบ 3 มิติ จำเป็นต้องถ่ายภาพเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะเสียเวลาและไม่สะดวกในการเลือกดูสินค้า การใช้เทคโนโลยีของการสร้างภาพ 3 มิติ ด้วยคอมพิวเตอร์ จะช่วยให้ผู้บริโภคสามารถเห็นสินค้าได้ครบทุกด้านอย่างสะดวก โปรแกรมสร้างภาพ 3 มิติ หลายโปรแกรมมีความสามารถในการสร้างโครงสร้างของวัตถุ และสามารถสร้างลักษณะการสะท้อนแสงของผิววัตถุให้มีความเหมือนกับวัตถุในธรรมชาติได้ระดับหนึ่ง โดยจะต้องมี 3 องค์ประกอบด้วยกัน คือ รูปร่างของวัตถุ ลักษณะลวดลายของผิววัตถุ และลักษณะการสะท้อนแสงของผิววัตถุ จึงจะทำให้สามารถผลิตภาพได้สมจริง แต่ขณะนี้ยังไม่มีโปรแกรมหรือแบบจำลองการสะท้อนแสงใดที่เป็นของผิวผ้าไหมโดยตรง ดังนั้น เมื่อต้องการผลิตภาพผ้าไหม ต้องนำลักษณะการสะท้อนแสงของผิววัตถุอื่นที่มีลักษณะการสะท้อนที่ใกล้เคียงกับผิวผ้าไหมมาใช้ในการสร้างภาพและนำเสนอสินค้า

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษารายละเอียดและลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม และสร้างแบบจำลองการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมขึ้นมา

แบบจำลองการสะท้อนแสงนั้น เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณและหาค่าการสะท้อนแสงของวัตถุในตำแหน่งและทิศทางต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ผลิตเป็นภาพ งานวิจัยนี้จึงสร้างแบบจำลองการสะท้อนแสงขึ้นมาจากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมที่วัดจากเครื่องโกนियोสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถให้ค่าการสะท้อนแสงมีความสัมพันธ์กับลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมมากที่สุด เพื่อหวังว่าจะสามารถนำแบบจำลองการสะท้อนแสงที่เสนอในงานวิจัยนี้ไปใช้สร้างภาพผ้าไหมให้มีลักษณะการสะท้อนแสงสมจริงมากยิ่งขึ้น

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติและลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม และสร้างแบบจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหม

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการวัดค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมด้วยเครื่องโกนियोสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากตัวอย่างผ้าไหมสีขาว 3 แบบ ซึ่งมีชนิดของเส้นไหมและใช้แบบการทอที่ต่างกัน ให้ผู้สังเกตทดสอบแบบจำลองเพื่อตรวจสอบการรับรู้ความแตกต่างของตัวอย่างผ้าไหมสีขาวทั้ง 3 แบบ และสุดท้ายแล้วสร้างแบบจำลองการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงที่วัดมา จากนั้นจึงเปรียบเทียบความสามารถในการพยากรณ์ค่าการสะท้อนแสงของแบบจำลองที่นำเสนอ กับแบบจำลองการสะท้อนแสง อื่น ๆ ที่มีอยู่แล้ว

1.4. ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้วัดค่าการสะท้อนแสงของผิวกว้างด้วยเครื่องโกนิโอสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Goniospectrophotometer) ยี่ห้อ มูราคามิ รุ่น จีเอสพี-2 เอส (Murakami GSP - 2S) แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ จึงทำให้สามารถวัดค่าการสะท้อนแสงได้เพียงในแนวมุมเงยเท่านั้น และมีระยะห่างระหว่างผิวใหม่กับเซนเซอร์รับแสงอยู่ที่ 30 เซนติเมตร ไม่สามารถวัดค่าในระยะใกล้ได้ ดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองการสะท้อนแสงได้เพียง 2 มิติ และเป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับการมองในระยะทางปรกติ (normal view) เท่านั้น

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวกว้าง และแบบจำลองการสะท้อนแสงของผิวกว้าง

1.6. วิธีการดำเนินงานวิจัย

เลือกตัวอย่างผิวกว้างสีขาวที่ทอด้วยลายขัด 3 แบบ ซึ่งซื้อจากร้านไหมไทยคอลเล็คชัน และร้าน จิม ทอมป์สัน มีตัวอย่างที่ใช้เส้นไหมในการทอแตกต่างกัน แล้ววัดค่าการสะท้อนแสงของผิวกว้างทั้ง 3 ตัวอย่าง ด้วยเครื่องโกนิโอสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำค่าที่วัดได้มาศึกษาและสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นจึงทดสอบแบบจำลองด้วยการทดสอบย้อนกลับ (back testing) พร้อมทั้งนำแบบจำลองการสะท้อนแสงอื่นที่มีอยู่ทั่วไปมาเปรียบเทียบด้วย เพื่อหาว่าแบบจำลองใดใช้ได้ดีทีสุดกับผิวกว้าง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎี

2.1.1. การสะท้อนแสงของผิววัตถุ (surface reflection)

การสะท้อนแสงเป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่พลังงานของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบนผิวของวัตถุแล้ว เกิดการสะท้อนกลับออกมาบางส่วนจากวัตถุโดยไม่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นของแสง และสามารถวัดค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการแผ่รังสีของแสงสะท้อนกับค่าการแผ่รังสีของแสงตกกระทบบนผิว ซึ่งเรียกว่า ค่าการสะท้อนแสง (reflectance) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดการสะท้อนแสงของผิววัตถุ ค่าการสะท้อนแสงของผิววัตถุ $\rho(\lambda)$ [3] ดังสมการที่ (2.1)

$$\rho(\lambda) = L_r(\lambda)/L_i(\lambda) \quad (2.1)$$

โดย

L_r คือ ค่าการแผ่รังสีของแสงสะท้อนจากผิววัตถุ

L_i คือ ค่าการแผ่รังสีของแสงตกกระทบบนผิววัตถุ

ρ คือ ค่าการสะท้อนแสงของผิววัตถุ

λ คือ ความยาวคลื่นของแสง

การสะท้อนแสงของผิววัตถุสามารถแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ [3]

1. การสะท้อนแสงแบบฟุ้ง (diffuse reflection)
2. การสะท้อนแสงแบบก้ำ (specular reflection)
3. การสะท้อนแสงแบบผสม (mixed reflection)



ภาพที่ 2.1 ลักษณะการสะท้อนแสงแบบฟุ้ง แบบก้ำ และแบบผสม [4]

2.1.1.1. การสะท้อนแสงแบบก้ำ (specular reflection)

เป็นการสะท้อนแสงที่มุมของแสงตกกระทบเท่ากับมุมของแสงสะท้อน ซึ่งเป็นไปตามกฎการสะท้อนแสงทางทัศนศาสตร์ และไม่เกิดการกระเจิงแสงขึ้นทั้งที่ผิววัตถุและในเนื้อของวัตถุ สามารถเรียกการสะท้อนแสงลักษณะนี้ได้อีกชื่อว่า การสะท้อนแสงแบบกระจก (mirror reflection) หรือการสะท้อนแสงแบบปรกติ (regular reflection) ตัวอย่างผิววัตถุที่มีการสะท้อนแสงลักษณะนี้ เช่น การสะท้อนแสงของกระจกเงา การสะท้อนแสงของโลหะผิวมัน การสะท้อนแสงของพลาสติกผิวมันมาก ฯลฯ

2.1.1.2. การสะท้อนแสงแบบฟุ้ง (diffuse reflection)

เป็นการสะท้อนแสงของผิววัตถุที่มีความขรุขระและไม่เกิดการสะท้อนแสงแบบกล้ำขึ้นมา ถ้ามีการสะท้อนแสงออกรอบทิศทางอย่างเท่ากัน เรียกว่า เกิดการสะท้อนแสงแบบไอโซโทรปิก (isotropic) หรือ เกิดการสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ต (Lambert reflection) ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงแบบฟุ้งที่เป็นไปตามอุดมคติ แต่ถ้ามีการสะท้อนแสงออกรอบทิศทางที่ไม่เท่ากันในบางตำแหน่งจะเรียกว่า เป็นการสะท้อนแบบฟุ้งที่เป็นสะท้อนแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) ซึ่งเป็นการสะท้อนแบบฟุ้งที่ไม่เป็นไปตามอุดมคติ ตัวอย่างผิววัตถุที่มีการสะท้อนแสงแบบฟุ้ง เช่น การสะท้อนแสงของผิวกระดาษ การสะท้อนแสงของพลาสติกผิวด้าน การสะท้อนแสงของโลหะผิวด้าน ฯลฯ

2.1.1.3. การสะท้อนแสงแบบผสม (mixed reflection)

เป็นการสะท้อนแสงที่ผสมกันระหว่างการสะท้อนแสงแบบฟุ้งกับการสะท้อนแสงแบบกล้ำ โดยสามารถเขียนเป็นสมการคำนวณค่าการสะท้อนแสง (ρ) ได้ ตามสมการที่ (2.2)

$$\rho = \rho_s + \rho_d \quad (2.2)$$

โดย

ρ คือ ค่าการสะท้อนรวม

ρ_s คือ ค่าการสะท้อนแสงของแสงแบบกล้ำ

ρ_d คือ ค่าการสะท้อนแสงของแสงแบบฟุ้ง

2.1.2. การวัดการแผ่รังสี (radiometric)

การวัดการแผ่รังสีเป็นการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีสมบัติพื้นฐาน ดังนี้ พลังงานการแผ่รังสี (radiant energy) กำลังการแผ่รังสี (radiant power) ความเข้มของกำลังการแผ่รังสี (radiant intensity) ปริมาณกำลังแผ่รังสีที่ตกลงบนพื้นที่ (irradiance) การแผ่รังสี (radiance) การวัดสมบัติเหล่านี้มีส่วนประกอบของปริมาณของแสง เวลา พื้นที่ และทิศทาง [5]

2.1.2.1. พลังงานการแผ่รังสี (radiant energy)

พลังงานการแผ่รังสีเป็นการวัดพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมา ซึ่งเป็นการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ที่เป็นพื้นฐานและเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะต้องนำสมบัตินี้ไปใช้ในการวัดการแผ่รังสีในหน่วยอื่น ๆ ต่อไป โดยพลังงานการแผ่รังสีมีหน่วยเป็น จูล (Joules, J) และเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ Q [6]

2.1.2.2. กำลังการแผ่รังสี (radiant power) หรือ ฟลักซ์ (radiant flux)

เป็นอัตราส่วนของพลังงานการแผ่รังสีต่อหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นจูลต่อวินาที (J/s) หรือวัตต์ (Watt, W) และเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ Φ ซึ่งสามารถหาค่ากำลังการแผ่รังสีเฉลี่ยได้ ตามสมการที่ (2.3) [6]

$$\Phi = \Delta Q / \Delta t \quad (2.3)$$

โดย

Q คือ พลังงานการแผ่รังสี (J)

t คือ เวลา (s)

Φ คือ กำลังการแผ่รังสี (W)

และสามารถหาค่ากำลังแผ่รังสี ณ เวลาใด ๆ ได้ ตามสมการที่ (2.4)

$$\Phi(t) = dQ/dt \quad (2.4)$$

โดย

Q คือ พลังงานการแผ่รังสี (J)

t คือ เวลา (s)

$\Phi(t)$ คือ กำลังการแผ่รังสี ณ เวลา t (W)

2.1.2.3. ปริมาณกำลังแผ่รังสีที่ตกลงบนพื้นที่ (irradiance) และปริมาณกำลังรังสีที่แผ่ออกจากพื้นที่ (exitance)

ปริมาณกำลังแผ่รังสีที่ตกลงบนพื้นที่และปริมาณกำลังรังสีที่แผ่ออกจากพื้นที่ มีความเหมือนกัน คือ เป็นอัตราส่วนของกำลังของรังสีต่อพื้นที่ แต่ที่แตกต่างกัน คือ ปริมาณกำลังแผ่รังสีที่ตกลงบนพื้นที่ หรือ อีร์เรเดียนซ์ (irradiance, E) เป็นค่ากำลังการแผ่รังสีที่ตกลงบนพื้นที่ A (m^2) ซึ่งมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) สามารถหาค่าอีร์เรเดียนซ์ ณ ตำแหน่งใด ๆ ได้ตามสมการที่ (2.5) [6]

$$E = d\Phi/dA \quad (2.5)$$

โดย

Φ คือ กำลังการแผ่รังสี (W)

A คือ พื้นที่ที่รังสีตกกระทบ (m^2)

E คือ อีร์เวเดียนซ์ (W/m^2)

แต่ค่าปริมาณรังสีที่แผ่ออกมาจากพื้นที่ หรือ เอ็กซิเทนซ์ (exitance, M) เป็นอัตราส่วนของค่ากำลังการแผ่รังสี ซึ่งแผ่ออกจากพื้นที่ที่สามารถเปล่งรังสีออกมาเองได้กับพื้นที่ A (m^2) ซึ่งมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) สามารถหาค่าเอ็กซิเทนซ์ ณ พื้นที่ใด ๆ ได้ตามสมการที่ (2.6)

$$M = d\Phi/dA \quad (2.6)$$

โดย

Φ คือ กำลังการแผ่รังสี (W)

A คือ พื้นที่ที่รังสีตกกระทบ (m^2)

M คือ เอ็กซิเทนซ์ (W/m^2)

2.1.2.4. ความเข้มของกำลังการแผ่รังสี (radiant intensity)

เมื่อพิจารณารังสีที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีขนาดเล็กมากจนมีขนาดเป็นจุด (point light source) โดยแหล่งกำเนิดแสงนี้จะเปล่งรังสีออกไปรอบทิศทางอย่างเท่า ๆ กัน จนเกิดเป็น

รูปทรงกลมหนึ่งหน่วย ผิวของทรงกลมนี้จะถือว่า เกิดจากการประกอบกันของพื้นที่เล็ก ๆ ที่กระจายตัวอยู่ เมื่อลากเส้นซึ่งมีทิศทาง ($d\omega$) จากจุดศูนย์กลางของทรงกลมซึ่งคือ แหล่งกำเนิดแสงไปฉายที่ผิวของทรงกลมหนึ่งหน่วยจะเกิดจุดเล็ก ๆ ขึ้นมา และเซตของจุดเล็ก ๆ เหล่านี้เป็นพื้นที่ผิวของรูปทรงกลมหนึ่งหน่วย ซึ่งผลรวมของจุดเหล่านี้มีพื้นที่ 4π ดังนั้น ถ้าแหล่งกำเนิดแสงมีการแผ่รังสีออกรอบทิศทาง ได้ผลรวมของทิศทางการแผ่รังสีซึ่งเรียกว่า มุมตัน (solid angle) ที่ทำให้เกิดผิวของทรงกลมหนึ่งหน่วย โดยมุมตันของทรงกลมหนึ่งหน่วยมีค่า 4π สเตอเรเดียน (steradians) ซึ่งสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.7) [7]

$$\int d\omega = \omega = 4\pi \quad (2.7)$$

ความเข้มของกำลังการแผ่รังสี (radiant intensity, I) คือ อัตราส่วนของค่ากำลังการแผ่รังสีต่อมุมตัน มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อสเตอเรเดียน (W/sr) สามารถเขียนสมการได้ตามสมการที่ (2.8)

$$I = d\Phi/d\omega \quad (2.8)$$

โดย

I คือ ความเข้มของกำลังการแผ่รังสี (W/sr)

Φ คือ กำลังการแผ่รังสี (W)

ω คือ มุมตัน (sr)

และมุมตันสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ (2.9)

$$\omega = S/r^2 \quad (2.9)$$

โดย

ω คือ มุมตัน (sr)

S คือ พื้นที่ผิวของรูปทรงกลม (m^2)

r คือ รัศมีของรังสีที่แผ่ออกไป (m)

2.1.2.5. การแผ่รังสี (radiance)

การแผ่รังสี คือ ค่าความเข้มของกำลังการแผ่รังสีที่ฉายลงบนพื้นที่ผิวของวัตถุ (incident radiance) หรือค่าความเข้มของกำลังการแผ่รังสีที่แผ่ออกจากพื้นที่ผิวของวัตถุ หรือแผ่ออกจากพื้นที่ผิวของแหล่งกำเนิดแสง (exitant radiance) โดยสามารถเขียนสมการได้ตามสมการที่ (2.10) [7]

$$L = I/A \quad (2.10)$$

เมื่อแทน I ด้วยสมการที่ (2.8) จะได้สมการที่ (2.11) ซึ่งเป็นสมการค่าการแผ่รังสีที่อยู่ในพจน์ของค่ากำลังการแผ่รังสี มุมตัน และพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับรังสี ณ ตำแหน่งใด ๆ

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega \cdot dA^\perp} \quad (2.11)$$

ในกรณีที่แนวทิศทางของรังสีไม่ตั้งฉากกับพื้นที่ผิวสามารถเขียนสมการที่ (2.11) ได้ดังสมการที่ (2.12)

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega \cdot dA \cdot \cos\theta} \quad (2.12)$$

โดย

L	คือ ค่าการแผ่รังสี ($\text{W}/\text{sr}/\text{m}^2$)
I	คือ ค่าความเข้มของกำลังการแผ่รังสี (W/sr)
Φ	คือ ค่ากำลังการแผ่รังสี (W)
ω	คือ มุมตัน (sr)
A^\perp	คือ พื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับแนวทิศทางของรังสี (m^2)
A	คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับแนวเส้นปรกติ (m^2)
θ	คือ มุมระหว่างรังสีกับเส้นปรกติ (rad)

เนื่องจากค่าการแผ่รังสี หรือเรียกทับศัพท์ว่า เรเดียนซ์ มีทั้งการแผ่รังสีออกจากพื้นที่และการแผ่รังสีฉายลงบนพื้นที่ เพื่อให้ง่ายต่อการเขียนฟังก์ชันและต่อการเข้าใจทิศทางของแนวรังสี จึงมีการกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ระบุตำแหน่งและทิศทางของรังสีขึ้นมา ซึ่งมีสัญลักษณ์ ดังนี้ [6]

θ	คือ มุมเงยของรังสีที่ทำกับเส้นปรกติ (elevation angle)
ϕ	คือ มุมกวาดของรังสีที่ทำกับเส้นปรกติ (azimuth angle)
x	คือ ตำแหน่งของพื้นที่ผิวในแนวแกน x
y	คือ ตำแหน่งของพื้นที่ผิวในแนวแกน y

สามารถเขียน $(\theta, \phi) = \Theta$ เพื่อใช้ระบุทิศทางของรังสี $(x, y) = \mathbf{X}$ เพื่อใช้ระบุตำแหน่ง จากสัญลักษณ์ข้างต้นที่กล่าวมาทำให้สามารถเขียนฟังก์ชันของเรเดียนซ์ได้ตามสมการที่(2.13)[6]

$$L(\mathbf{X}, \Theta) = L(x, y, \theta, \phi) \quad (2.13)$$

สมการที่ (2.13) มีความหมายว่า เป็นเรเดียนซ์ของพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง x, y ซึ่งมีทิศทาง θ, ϕ แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่า เป็นรังสีที่แผ่ออกจากพื้นที่ผิว หรือเป็นรังสีที่ฉายตกลงบนพื้นที่ผิวดังนั้น จึงมีการเพิ่มสัญลักษณ์ " \rightarrow " เพื่อแสดงถึงการแผ่รังสีออกจากพื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง \mathbf{X} ในทิศทาง Θ โดยเขียนสัญลักษณ์ของฟังก์ชันได้ ดังนี้ $L(\mathbf{X} \rightarrow \Theta)$ และสัญลักษณ์ " \leftarrow " เพื่อแสดงถึงการแผ่รังสีเข้าสู่พื้นที่ผิวที่ตำแหน่ง \mathbf{X} ด้วยทิศทาง Θ โดยเขียนสัญลักษณ์ของฟังก์ชันได้ดังนี้ $L(\mathbf{X} \leftarrow \Theta)$ [6]

2.1.2. การวัดแสง (photometry)

เป็นการวัดการแผ่รังสีของแสงที่สัมพันธ์กับการมองเห็นและการรับรู้ของมนุษย์ต่อแสงที่เข้าสู่ตา โดยมีการกำหนดฟังก์ชันประสิทธิภาพความสว่าง (luminance efficiency function, $V(\lambda)$) สำหรับการมองเห็นในเวลากลางวัน (photopic vision) และการมองเห็นในเวลากลางคืน (scotopic vision) ขึ้นมา เพื่อใช้คำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังนี้ พลังงานการส่องสว่าง (luminous energy, Q_v) กำลังการส่องสว่าง (luminous flux, F) ความเข้มแสง (luminous intensity, I_v) ความสว่าง (illuminance, E_v) และ ความส่องสว่าง (luminance, L_v) โดยค่าต่าง ๆ ข้างต้นนี้มีความสัมพันธ์คู่ขนานไปกับค่าต่าง ๆ ในการวัดการแผ่รังสีซึ่งแสดงตาม ตารางที่ (2.1) [5]

ตารางที่ 2.1 การวัดการแผ่รังสีและการวัดแสง [5]

การวัดการแผ่รังสี		การวัดแสง	
ชื่อ	หน่วย	ชื่อ	หน่วย
พลังงานการแผ่รังสี (radiance energy)	Joule (J)	พลังงานการส่องสว่าง (luminous energy)	Lm s
กำลังการแผ่รังสี (radiant flux)	Watt (W)	กำลังการส่องสว่าง (luminous flux)	lumen (lm)
ความเข้มการแผ่รังสี (radiant intensity)	W/sr	ความเข้มการส่องสว่าง (luminous intensity)	lm/sr หรือ candela (cd)
อิริเรเดียนซ์ (irradiance)	W/m ²	ความสว่าง (illuminance)	lm/m ² หรือ lux (lx)
การวัดการแผ่รังสี (radiance)	W/sr/m ²	ความส่องสว่าง (luminance)	lm/sr/m ²

ค่ากำลังส่องสว่างสามารถคำนวณได้จากการนำค่ากำลังการแผ่รังสี คูณกับฟังก์ชันประสิทธิภาพความสว่าง สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.14) และมีหน่วยทางจิตวิทยาฟิสิกส์ (psychophysical unit) คือ ลูเมน (lumen, lm) [5]

$$F = K_m \int \phi(\lambda) \cdot V(\lambda) d(\lambda) \quad (2.14)$$

โดย

F คือ ค่ากำลังการส่องสว่าง (lm)

ϕ คือ ค่ากำลังการแผ่รังสี (W)

V คือ ฟังก์ชันประสิทธิภาพความสว่าง

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

K_m คือ ผลการส่องสว่าง (luminous efficacy) ของการแผ่รังสี ซึ่งมีค่าเท่ากับ 683 lm/W

ค่าพลังงานการส่องสว่างคือปริมาณแสงที่แหล่งกำเนิดแสงฉายออกมา โดยสามารถหาได้ตามสมการที่ (2.15)

$$Q_v = dF \cdot dt \quad (2.15)$$

โดย

Q_v คือ ค่าพลังงานการส่องสว่าง (lm s)

F คือ ค่ากำลังการส่องสว่าง (lm)

t คือ เวลา (s)

ค่าความเข้มแสง คือ ปริมาณกำลังการส่องสว่างที่แผ่ออกต่อมุมตัน มีหน่วยเป็นแรงเทียน (Candela) ซึ่งสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.16) [7]

$$I_v = dF/d\omega \quad (2.16)$$

โดย

I_v คือ ค่าความเข้มแสง (lm/sr หรือ cd)

F คือ ค่ากำลังการส่องสว่าง (lm)

ω คือ มุมตัน (sr)

ค่าความสว่าง คือ ปริมาณกำลังการส่องสว่างที่ตกลงบนพื้นที่มีหน่วยเป็นลักซ์ (lux) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ตามสมการที่ (2.17) [3]

$$E_v = dF/dA \quad (2.17)$$

โดย

E_v คือ ค่าความสว่าง (lx)

F คือ ค่ากำลังการส่องสว่าง (lm)

A คือ พื้นที่ที่ถูกฉายแสง (m^2)

ค่าความส่องสว่าง คือ ปริมาณความเข้มแสงที่ฉายลงบนพื้นที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกัน สามารถหาค่าได้ตามสมการที่ (2.18) [3]

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos(\theta)} \quad (2.18)$$

โดย

L_v คือ ค่าความส่องสว่าง ($lm/sr/m^2$ หรือ cd/m^2)

I_v คือ ค่าความเข้มแสง (cd)

A คือ พื้นที่ที่แสงตกกระทบ (m^2)

θ คือ มุมที่แสงตกกระทบ

2.1.3. บิอาร์ดีเอฟ (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)

บิอาร์ดีเอฟ คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงที่สะท้อนออกมาจากผิววัตถุในทิศทางต่าง ๆ ซึ่งค่าการสะท้อนแสงของผิววัตถุคือ อัตราส่วนของแสงสะท้อนต่อแสงตกกระทบที่ผิววัตถุ ณ ตำแหน่งหนึ่ง ดังนั้น จึงสามารถเขียนสมการของฟังก์ชันบิอาร์ดีเอฟได้ตามสมการ (2.18) [6]

$$f_r(\lambda, \mathbf{X}, \theta_i \rightarrow \theta_r) = dL_r(\lambda, X \rightarrow \theta_r) / L_i(\lambda, X \leftarrow \theta_i) \cos\theta_i d\omega_i \quad (2.18)$$

โดย

f_r คือ ฟังก์ชันบิอาร์ดีเอฟ

L_r คือ เรเดียนซ์ของแสงสะท้อน

L_i คือ เรเดียนซ์ของแสงตกกระทบ

\mathbf{X} คือ ตำแหน่งบนผิววัตถุ

θ_i คือ มุมตกกระทบ

θ_r คือ มุมสะท้อน

ปัจจัยที่มีผลต่อฟังก์ชันบิอาร์ดีเอฟ ได้แก่ ความยาวคลื่นของแสง ทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง และทิศทางของตัวรับภาพ ในปัจจุบันมีการนำฟังก์ชันบิอาร์ดีเอฟไปใช้ในการผลิตแสงสะท้อนของภาพ 3 มิติ ในคอมพิวเตอร์กราฟิก แบบจำลองที่พบบ่อย ได้แก่ แบบจำลองการสะท้อนแสงของแลมเบิร์ต (Lambert reflectance model) [6] แบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (Phong reflectance model) [8] แบบจำลองการสะท้อนแสงของทอร์เรนซ์และสแปร์โรว์ (Torrance-Sparrow reflectance model) [9] แบบจำลองการสะท้อนแสงของบลินน์ (Blinn reflectance

model) [10] แบบจำลองการสะท้อนแสงของโอเรน-นayar (Oren-Nayar reflectance model) [11] แบบจำลองการสะท้อนแสงของวอร์ด (Ward reflectance model) [12] และแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอสซิกมิน-เชอร์ลีย์ (Ashikhmin-Shirley reflectance model) [13] แบบจำลองการสะท้อนแสงเหล่านี้เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจากทฤษฎีโดยไม่ได้มีการทดลองวัดค่าการสะท้อนแสงจากผิววัตถุจริง ต่อมาในปี ค.ศ. 1992 วอร์ดได้วัดค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิวแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic surface) จากเครื่องโกนีโอโฟโตมิเตอร์ (goniophotometer) ที่วอร์ดได้สร้างขึ้นมา และนำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์เพื่อสร้างแบบจำลองการสะท้อนแสงของพื้นผิววัตถุแบบแอนไอโซโทรปิก

แบบจำลองการสะท้อนแสงสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรก คือ แบบจำลองการสะท้อนแสงที่จำลองแสงสะท้อนแบบกล้ำ ได้แก่ แบบจำลองการสะท้อนแสงของทอร์เรนซ์-สเปร์โรว์ และแบบจำลองการสะท้อนแสงของบลินน์ กลุ่มที่สอง คือ แบบจำลองการสะท้อนแสงที่จำลองแสงสะท้อนแบบฟุ้ง ได้แก่ แบบจำลองการสะท้อนแสงของแลมเบิร์ต และแบบจำลองการสะท้อนแสงของโอเรน-นayar และกลุ่มสุดท้าย คือ แบบจำลองการสะท้อนแสงที่จำลองแสงสะท้อนที่ผสมกันระหว่างแสงฟุ้งกับแสงกล้ำ ได้แก่ แบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง แบบจำลองการสะท้อนแสงของวอร์ด และแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอสซิกมิน-เชอร์ลีย์

2.1.3.1. แบบจำลองการสะท้อนแสงของแสงแบบฟุ้ง

แบบจำลองการสะท้อนแสงของแลมเบิร์ต เป็นแบบจำลองการสะท้อนแสงที่จำลองการสะท้อนแสงของวัตถุที่มีผิวแบบแลมเบิร์ต คือ เมื่อแสงตกกระทบแล้ว แสงสะท้อนตามกฎของแลมเบิร์ตโคไซน์ (Lambert's cosine law) ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงออกรอบทิศทางอย่างเท่ากัน ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงแบบฟุ้งในอุดมคติ มีสมการตาม สมการที่ (2.19) [6]

$$f_r(\theta_i \rightarrow \theta_r) = I(\theta_i \rightarrow \theta_r) \cos(\theta_r) \quad (2.19)$$

โดย

f_r คือ ฟังก์ชันปีอาร์ดีเอฟ

I คือ ความเข้มแสงกำลังการแผ่รังสี

θ_i คือ มุมของแสงตกกระทบ

θ_r คือ มุมรับภาพ

แบบจำลองการสะท้อนแสงของไอเรน-นaylor เป็นแบบจำลองการสะท้อนแสงที่ให้แสงสะท้อนแบบพุ่งที่ไม่เป็นอุดมคติ และเกิดการกระเจิงแสงที่ผิววัตถุ โดยแนวคิดในการสร้างแบบจำลองนี้อยู่บนพื้นฐานของวัตถุที่มีผิวขรุขระและมีบริเวณของพื้นที่เล็ก ๆ ที่เรียกว่า ไมโครฟาเซต (microfacet) กระจายตัวแบบเกาส์เซียน (gaussian distribution) อยู่บนผิววัตถุ ซึ่งคล้ายกับแบบจำลองการสะท้อนแสงของทอร์เรนซ์-สเปร์โรว์ แต่แตกต่างกันที่ไมโครฟาเซตของแบบจำลองนี้สะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตในทุก ๆ พื้นที่ที่สามารถเขียนได้ตาม สมการที่ (2.20) [6]

$$f_r(\theta_i \rightarrow \theta_r) = \frac{\rho}{\pi} (A + B \max[0, \cos(\phi_r - \phi_i)]) \sin(\max[\theta_r, \theta_i]) \tan(\min[\theta_r, \theta_i]) \quad (2.20)$$

โดย

$$A = 1.0 - 0.5 \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + 0.33}$$

$$B = 0.45 \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + 0.09}$$

f_r คือ ฟังก์ชันป็อดีเอฟ

Θ_i คือ มุมของแสงตกกระทบ

Θ_r คือ มุมรับภาพ

θ_r คือ มุมรับภาพในแนวมุมเงย

θ_i คือ มุมตกกระทบในแนวมุมเงย

ϕ_r คือ มุมรับภาพในแนวมุมกวาด

ϕ_i คือ มุมตกกระทบในแนวมุมกวาด

α คือ ค่าความชันของการกระจายตัวของไมโครฟาเซต

ρ คือ ค่าการสะท้อนแสงของไมโครฟาเซตแต่ละพื้นที่

2.1.3.2. แบบจำลองการสะท้อนแสงของแสงแบบกล้า

แบบจำลองการสะท้อนแสงของทอร์เรนซ์-สเปร์โรว์เป็นแบบจำลองการสะท้อนแสงที่ให้แสงกล้าที่ไม่เป็นอุดมคติ คือ เป็นแสงกล้าที่มุมตกกระทบไม่เท่ากับมุมสะท้อน เนื่องมาจากพื้นผิววัตถุมีการกระจายตัวของไมโครฟาเซต โดยสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.21) [6]

$$f_r(\Theta_i \rightarrow \Theta_r) = \frac{F(\theta_h)D(\theta_h)G(\theta_i,\theta_r)}{\pi \cos\theta_i \cos\theta_r} \quad (2.21)$$

โดย

f_r คือ ฟังก์ชันปีอาร์ดีเอฟ

Θ_i คือ มุมของแสงตกกระทบ

Θ_r คือ มุมของรับภาพ

θ_r คือ มุมรับภาพในแนวมุมเงย

θ_i คือ มุมตกกระทบในแนวมุมเงย

θ_h คือ มุมของเวกเตอร์ครึ่งทาง (half way vector)

F คือ ฟังก์ชันของเฟรชเนล (Fresnel function)

D คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของไมโครฟาเซต

G คือ ฟังก์ชันเรขาคณิต (geometric function)

2.1.3.3. แบบจำลองการสะท้อนแสงของแสงแบบผสม

แบบจำลองของฟองเป็นแบบจำลองการสะท้อนแสงที่ให้แสงสะท้อนมีลักษณะที่ผสมกันระหว่างแสงฟุ้งกับแสงกล้า ซึ่งแนวความคิดการสร้างแบบจำลองนี้คือ ผิวดินส่วนใหญ่เกิดการสะท้อนที่ผสมกันระหว่างแสงฟุ้งกับแสงกล้า ดังนั้น แบบจำลองนี้จึงนำฟังก์ชันบีอาร์ดีเอฟที่ให้แสงฟุ้งมารวมกับฟังก์ชันแบบอาร์ดีเอฟที่ให้แสงกล้า สุดท้ายจะได้แบบจำลองตามสมการที่(2.22)-(2.24) [6]

$$f_r(\Theta_i \rightarrow \Theta_r) = f_d(\Theta_i \rightarrow \Theta_r) + f_s(\Theta_i \rightarrow \Theta_r) \quad (2.22)$$

$$f_d(\Theta_i \rightarrow \Theta_r) = C(\lambda)[\cos\theta_i(1 - d) + d] \quad (2.23)$$

$$f_s(\Theta_i \rightarrow \Theta_r) = W(\theta_i)\cos^p\theta_s \quad (2.24)$$

โดย

f_r คือ ฟังก์ชันบีอาร์ดีเอฟรวม

f_d คือ ฟังก์ชันบีอาร์ดีเอฟแบบแสงฟุ้ง

f_s คือ ฟังก์ชันบีอาร์ดีเอฟแบบแสงกล้า

C คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

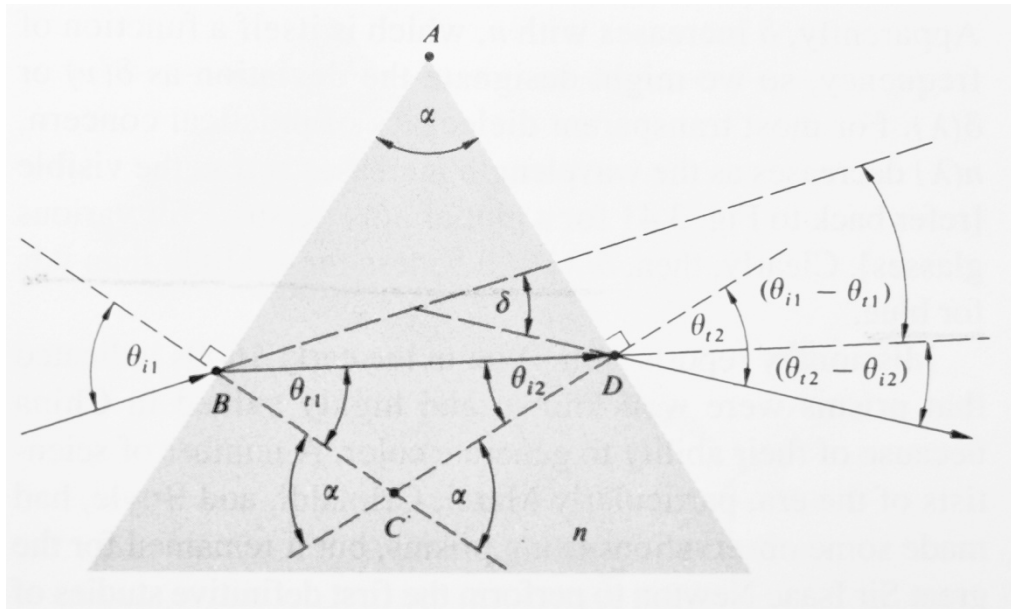
W คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกล้า

d คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงฟุ้ง

p คือ ตัวแปรเสริมควบคุมความมันวาวของวัตถุ

2.1.3.4. สมบัติเชิงแสงของปริซึม

ปริซึมทำจากวัสดุโปร่งแสงโดยมีฐานเป็นรูปหลายเหลี่ยมและมักพบปริซึมฐานสามเหลี่ยมเป็นส่วนใหญ่ โดยสมบัติเชิงแสงของปริซึมขึ้นกับ รูปร่างและขนาดมุมของฐานปริซึม ซึ่งปริซึมมีสมบัติเชิงแสง 2 แบบ ได้แก่ สมบัติการกระจายแสง (dispersing prism) และ สมบัติการสะท้อนแสง (reflecting prism) ซึ่งแสดงทิศทางเดินของแสงไว้ตาม ภาพที่ (2.2) และ ภาพที่ (2.3) ตามลำดับ [14]



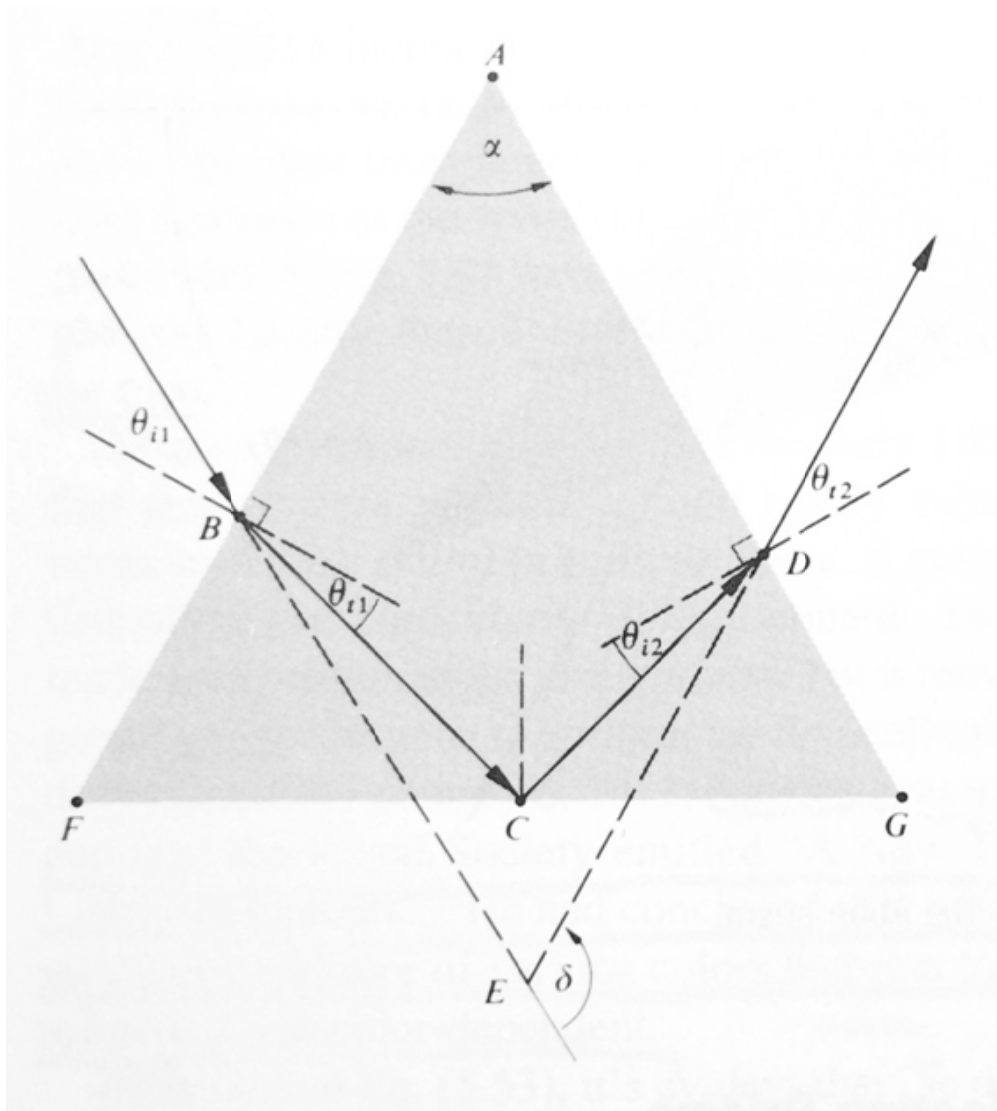
ภาพที่ 2.2 ปริซึมฐานสามเหลี่ยมที่เกิดการกระจายแสง

จากภาพที่ (2.2) สามารถคำนวณทิศทางแสงของปริซึมฐานสามเหลี่ยมที่เกิดการกระจายแสงได้ ตามสมการที่ (2.25)

$$n = \frac{\sin[(\delta + \alpha)/2]}{\sin \alpha/2} \quad (2.25)$$

โดย

n คือ ดัชนีหักเหแสงของปริซึม



ภาพที่ 2.3 ปริซึมฐานสามเหลี่ยมที่เกิดการสะท้อนแสง

จากภาพที่ (2.3) สามารถคำนวณทิศทางแสงของปริซึมฐานสามเหลี่ยมที่เกิดการสะท้อนแสงได้ ตามสมการที่ (2.26)

$$\delta = 2\theta_{i1} + \alpha \quad (2.26)$$

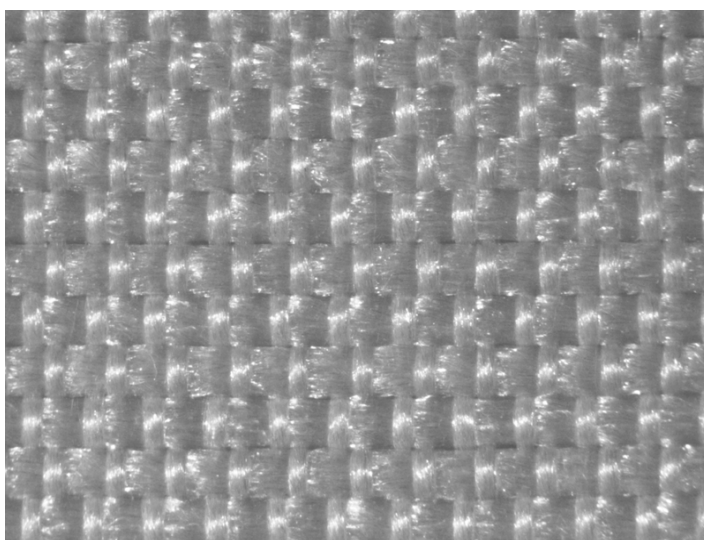
2.2. วารสารปริทรรศน์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับการสะท้อนแสงของผิววัตถุนั้น พัฒนามาจากการศึกษาสมบัติของผิววัตถุที่เรียบและมีความมันซึ่งเป็นการสะท้อนแสงแบบกล้ำที่เป็นอุดมคติ นั่นคือการสะท้อนแบบกระจก [14] จึงเริ่มศึกษาผิววัตถุที่มีการกระเจิงแสงซึ่งได้แก่ การสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ต ต่อมา ฟอง [8] ได้นำสมบัติการสะท้อนแสงทั้งสองแบบมารวมกันในแบบจำลองเพื่อสามารถอธิบายถึงการสะท้อนแสงของผิววัตถุทั่วไปที่มีการสะท้อนแสงแบบผสมได้ ต่อมา โทเรนซ์ และ สเปร์โรว์ [9] ได้เสนอแนวคิดที่ว่า ที่ผิววัตถุมีไมโครฟาเซตกระจายตัวในลักษณะที่แตกต่างกันจึงทำให้ผิววัตถุมีการสะท้อนที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเกิดเป็นแบบจำลองการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของไมโครฟาเซตขึ้นมา แต่แบบจำลองของโทเรนซ์ และสเปร์โรว์ ใช้อธิบายได้สำหรับผิววัตถุที่สะท้อนแสงแบบแสงกล้ำที่ไม่เป็นอุดมคติเท่านั้น ต่อมา โอเรนซ์และนaylor [11] ได้เสนอแบบจำลองที่มีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของไมโครฟาเซตขึ้นมา ซึ่งคล้ายกับแบบจำลองการสะท้อนแสงของโทเรนซ์และสเปร์โรว์ แต่มีความแตกต่าง คือ แต่ละไมโครฟาเซตของโอเรนซ์และนaylor นั้นจะสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ต และสุดท้ายอดาบาลา [15] ได้เสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงสำหรับสิ่งทอ โดยนำทฤษฎีไมโครฟาเซตของโทแลนซ์และสเปร์โรว์มาใช้ แต่ยังไม่มีการเสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงที่เฉพาะเจาะจงสำหรับผ้าไหม

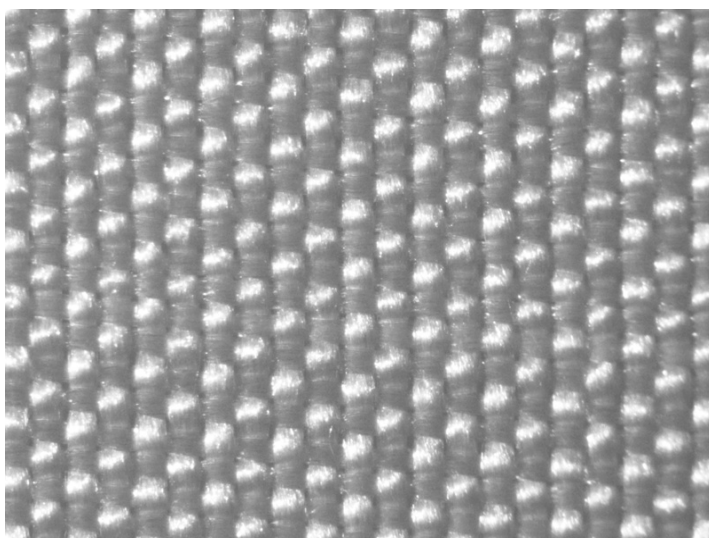
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

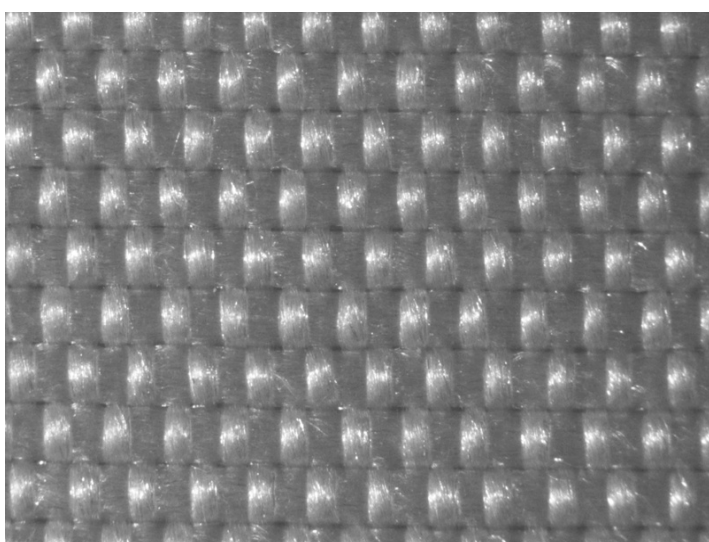
การวิจัยนี้ใช้ผ้าไหมสีขาวที่ทอด้วยลายขัด 3 แบบด้วยกัน ผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ใช้เส้นไหม 2 เส้นในการทอซึ่งซื้อจากร้านไหมไทยคอลเล็คชั่น ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 ใช้เส้นไหม 2 และ 4 เส้น ในการทอ จากร้าน จิม ทอปมสัน มีลักษณะผิวผ้าตามภาพที่ (3.1) ถึง ภาพที่ (3.3) ตามลำดับ



ภาพที่ 3.1 ภาพผิวผ้าไหมตัวอย่างที่ 1



ภาพที่ 3.2 ภาพผิวผ้าไหมตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 3.3 ภาพผิวผ้าไหมตัวอย่างที่ 3

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน

การทดลองตอนที่ 1 เป็นการวัดค่าปีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง ด้วยเครื่องโกนอิสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ มูราคามิ รุ่น จีเอสพี-2 เอส ประเทศญี่ปุ่น) ซึ่งได้วัดค่าที่ศูนย์วิจัยพรอนเทียร์เมดิคัลเอนจิเนียริง (Research Center for Frontier Medical Engineering) แห่ง

มหาวิทยาลัยชิบะ ประเทศญี่ปุ่น ใช้มุมของแหล่งกำเนิดแสงในแนวมุมเงย ที่ 0, -15, -30, -45, -60 และ -75 องศา และใช้มุมรับภาพในแนวมุมเงย ที่ -75, -60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา ตามลำดับ นำค่าปีอาร์ตีเอฟที่วัดได้มาเขียนกราฟเชิงขั้ว เพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม พร้อมทั้งสามารถหาลักษณะเฉพาะตัวของการสะท้อนแสงของผ้าไหมได้ จากนั้นทำการทดลองโดยให้ผู้สังเกตมองเปรียบเทียบผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยใช้มุมมองและมุมที่แสงตกกระทบแตกต่างกัน เพื่อใช้ยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างกราฟปีอาร์ตีเอฟกับการรับรู้ของมนุษย์

การทดลองตอนที่ 2 เป็นการนำเสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม โดยได้ปรับปรุงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (Phong reflectance model) และทดสอบแบบจำลองด้วยการหาค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดจากการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ กับค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม หาความผิดพลาดจากการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่ใช้อยู่โดยทั่วไปกับค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม แบบจำลองการสะท้อนแสงที่ใช้อยู่ทั่วไปนั้น ได้แก่ แบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (Phong reflectance model) แบบจำลองการสะท้อนแสงของโอเรน-นayar (Oren-Nayar reflectance model) แบบจำลองการสะท้อนแสงของวอร์ด (Ward reflectance model) และแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอสคิหมินและเชอร์ลีย์ (Ashikhmin-Shirley reflectance model) การวิจัยจึงตั้งสมมุติฐานว่า แบบจำลองทั้ง 4 แบบให้ค่าปีอาร์ตีเอฟมีลักษณะใกล้เคียงกับค่าปีอาร์ตีเอฟที่วัดได้จากผ้าไหม จึงนำแบบจำลองทั้ง 4 แบบมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ผู้วิจัยนำเสนอเพื่อทดสอบว่า แบบจำลองใดให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด การคำนวณในการทดลองตอนที่ 2 นี้ ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้หน่วยประมวลผลกลาง (CPU : central processing unit) ยี่ห้ออินเทล (Intel) รุ่นคอร์ทูดูโอ (Core 2 duo) ความเร็ว 3.00 จิกะเฮิร์ต มีหน่วยความจำชั่วคราว (RAM : random access memory) ความจุ 3.25 จิกะไบต์ ระบบปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์เอ็กซ์พี (Microsoft Window XP operating system) และเครื่องคอมพิวเตอร์ยี่ห้อแมคอินทอช (Macintosh) รุ่น พาวเวอร์บุ๊กจี 4 (Power book G4) ระบบปฏิบัติการแมคอินทอช 10.4 (Macintosh operating system 10.4) และ

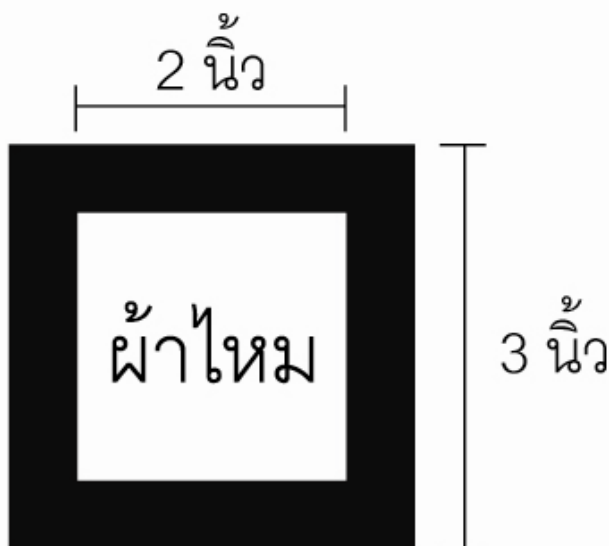
ผู้วิจัยได้เขียนรหัสต้นฉบับ (source code) สำหรับการคำนวณต่าง ๆ ในการทดลองตอนที่ 2 นี้ เพื่อดำเนินการในซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์แมตแลป (Matlab) รุ่น R2006a

วิธีการทดลองตอนที่ 2 ผู้วิจัยหาค่าคงตัวในแบบจำลองแบบต่าง ๆ ใช้วิธีการหาความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด (least-square errors) วิธีการนี้สามารถหาค่าคงตัวต่าง ๆ ของแต่ละแบบจำลองได้ ค่าคงตัวเหล่านี้ทำให้แบบจำลองแต่ละแบบคำนวณค่าบีอาร์ดีเอฟ ได้ค่าความสัมพันธ์กับค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมมากที่สุด หลังจากได้ค่าคงตัวต่าง ๆ ของแบบจำลองแต่ละแบบแล้ว จึงทดสอบแบบจำลองโดยคำนวณหาค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงแต่ละแบบ แล้วนำค่าที่คำนวณได้จากจำลองแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกับค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม หาความผิดพลาดจากค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (root-mean-square errors) และหาแบบจำลองที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด แบบจำลองที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดนี้ เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการจำลองค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมมากที่สุดจากแบบจำลองที่นำมาทดสอบ 5 แบบ

3.1. วิธีการทดลองตอนที่ 1 การวัดค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

วัดค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง ด้วยเครื่องโกนิโอสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ มูราคามิ รุ่น จีเอสพี-2 เอส) ใช้มุมของแหล่งกำเนิดแสงในแนวมุมเงย ที่ 0, -15, -30, -45, -60 และ -75 องศา และใช้มุมรับภาพในแนวมุมเงย ที่ -75, -60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา ตามลำดับ ก่อนวัดตัวอย่างผ้าไหม ต้องเทียบเคียง (calibrate) เครื่องมือด้วยแผ่นเซรามิกสีขาวอ้างอิง (white ceramic calibration) ก่อน แล้วจึงวัดค่าของผิวผ้าไหมตัวอย่าง เครื่องมือนี้วัดค่าออกเป็นค่าสเปกตรัมและค่าสี CIE $L^*a^*b^*$ แต่งานวิจัยนี้ต้องการค่าการสะท้อนแสงของผิววัตถุ ดังนั้นจึงเลือกใช้ ค่า L^* สำหรับการทดลอง เพราะค่า L^* เป็นค่าที่บอกความสว่างของวัตถุที่ผู้สังเกตรับรู้ นำค่า L^* ที่วัดได้มาปรับภาวะ (normalization) นำค่าที่ปรับภาวะแล้วของผ้าไหมแต่ละตัวอย่างมาเขียนกราฟให้อยู่ในระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate system) เพื่อสะดวกต่อการวิเคราะห์และหาลักษณะเฉพาะของการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

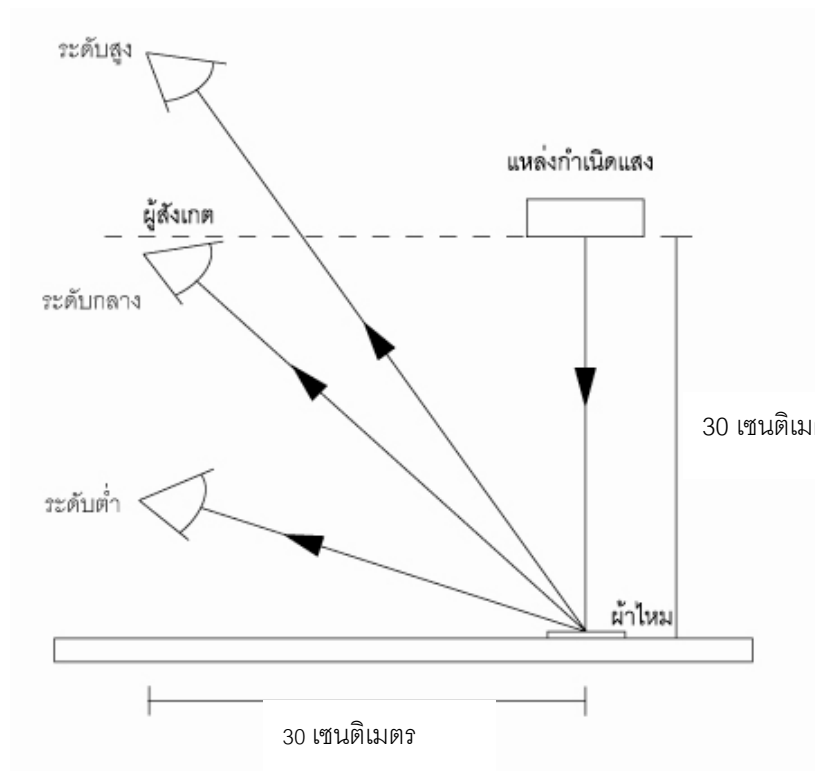
จากนั้นทำการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง ซึ่งการทดลองนี้เป็นการนำตัวอย่างผ้าไหมมาให้ผู้สังเกตจำนวน 5 คน เปรียบเทียบและบันทึกผลลักษณะการสะท้อนแสงที่ผู้สังเกตรับรู้ โดย ตัดกระดาษแข็งสีดำเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 3×3 นิ้ว จำนวน 3 แผ่น แล้วเจาะช่องตรงกลางให้มีขนาด 2×2 นิ้ว จากนั้นตัดผ้าไหมแต่ละตัวอย่างให้มีขนาด 3×3 นิ้ว แล้วติดที่ด้านหลังของกระดาษดำที่เจาะรูโดยสังเกตแนวของเส้นพุ่งและเส้นยืน แล้วทำสัญลักษณ์เพื่อระบุทิศทางก่อนการติดกระดาษและผ้าไหมเข้าด้วยกัน สุดท้ายจะได้ผ้าไหมตัวอย่างที่พร้อมใช้ทำการทดลองดังแสดงตัวอย่างตามภาพที่ (3.4)



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างแผ่นกระดาษที่ใช้ติดกับผ้าไหมเพื่อใช้ในการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

จากนั้นนำแผ่นทดสอบทั้ง 3 แผ่น ไปวางเปรียบเทียบกันโดยให้สังเกตเฉพาะในแนวของเส้นพุ่ง โดยในการจัดวางแต่ละครั้งให้สลับแผ่นตัวอย่าง อย่างเป็นอิสระซึ่งไม่ให้ผู้สังเกตทราบถึงชนิดของผ้าไหม และในผู้สังเกตแต่ละคนทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงฟลูออเรสเซนต์ที่มีอุณหภูมิสี 6500 K (D65) โดยการทดลองขั้นตอนนี้มีวิธีการจัดวางอุปกรณ์แตกต่างกัน 4 แบบด้วยกัน วิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 1 มีลักษณะดังนี้ คือ ให้วางแผ่นตัวอย่างใต้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความสูง 30 เซนติเมตร และให้ผู้สังเกตอยู่ห่างจากผ้าไหมประมาณ 30

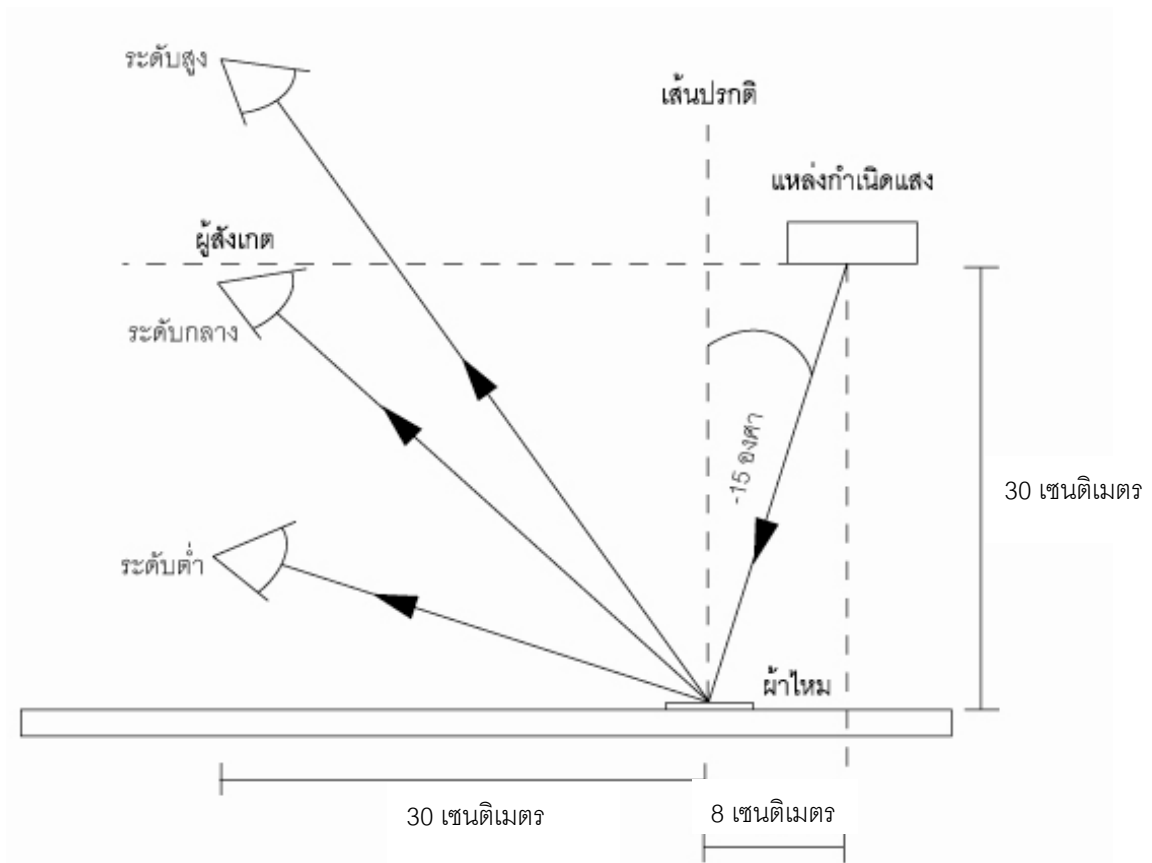
เซนติเมตร โดยผู้สังเกตสามารถขยับความสูงของระดับการมองเห็น ขึ้น-ลง ได้ ซึ่งแสดงตามภาพที่ (3.5) จากนั้นให้ผู้สังเกตบันทึกลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมตามระดับของแนวการมองของผู้สังเกต โดยระดับกลางเป็นระดับที่ผู้สังเกตอยู่ระนาบเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเสมือนใช้มุมมอง 45 องศา ระดับสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสง เสมือนใช้มุมมองช่วง 30 – 15 องศา และระดับต่ำกว่าแหล่งกำเนิดแสง เสมือนใช้มุมมองช่วง 60 – 75 องศา แล้วบันทึกผลโดยเรียงลำดับผ้าไหมตัวอย่างที่มีความสว่างจากมากไปน้อย ในแต่ละมุมมอง



ภาพที่ 3.5 แผนภูมิการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 1 สำหรับการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

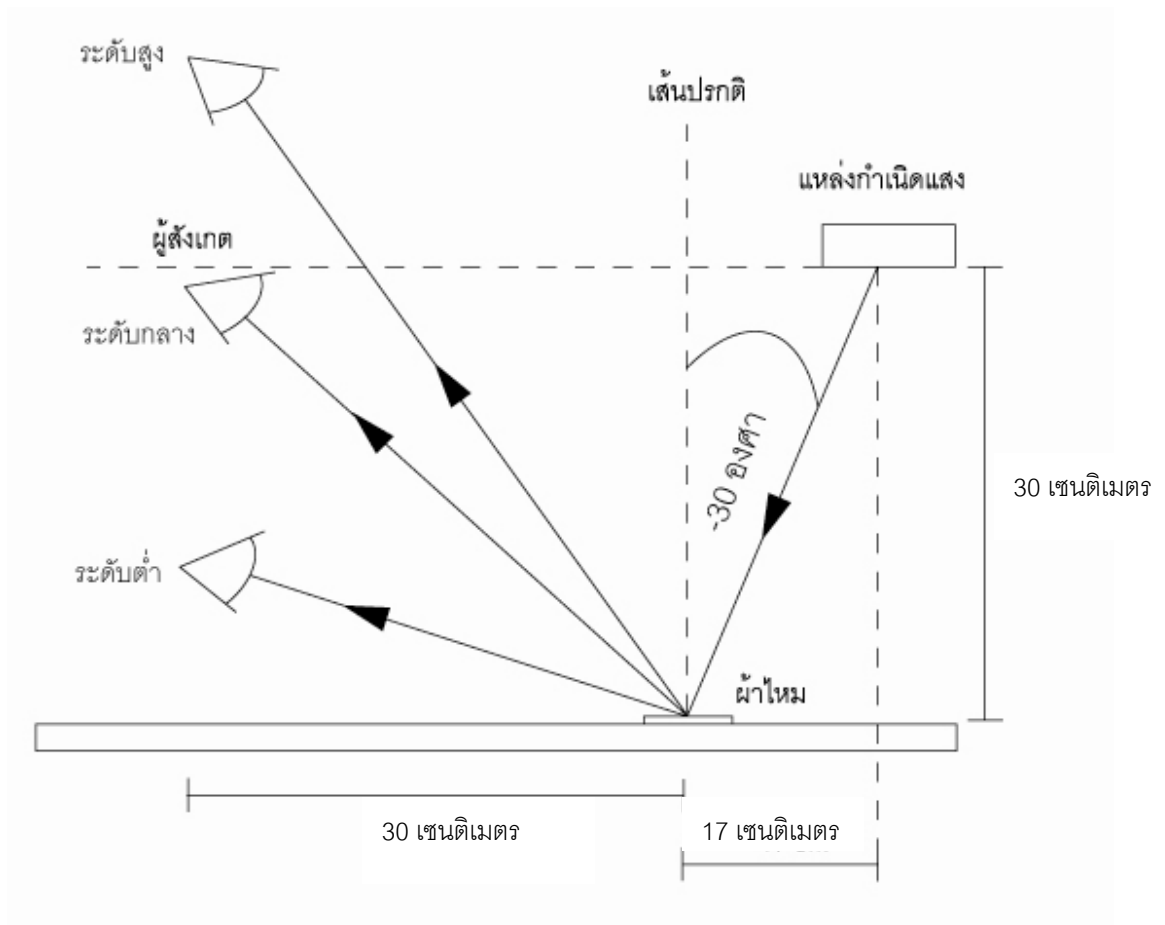
วิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 2 มีลักษณะดังนี้ คือ ให้วางแผ่นตัวอย่างห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 8 เซนติเมตร ที่มีความสูง 30 เซนติเมตร และให้ผู้สังเกตอยู่ห่างจากผ้าไหมประมาณ 30 เซนติเมตร โดยผู้สังเกตสามารถขยับความสูงของระดับการมองเห็น ขึ้น-ลง ได้ ซึ่งแสดงตามภาพที่ (3.6) จากนั้นให้ผู้สังเกตบันทึกลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมตามระดับของแนวการมองของผู้สังเกต โดยระดับกลางเป็นระดับที่ผู้สังเกตอยู่ระนาบเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงแล้วบันทึกผล

โดยเรียงลำดับผ้าไหมตัวอย่างที่มีความสว่างจากมากไปน้อย ในแต่ละมุมมอง ซึ่งวิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 2 นี้เทียบเท่ากับการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มุมตกกระทบ -15 องศา



ภาพที่ 3.6 แผนภูมิการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 2 สำหรับการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

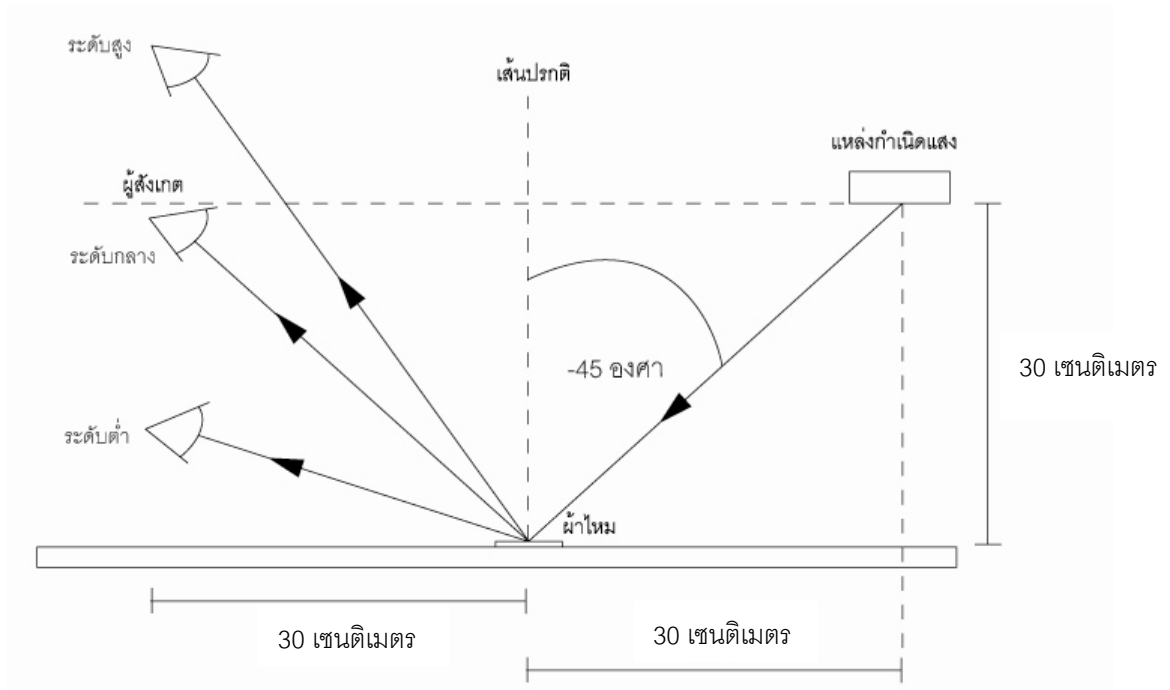
วิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 3 มีลักษณะดังนี้ คือ ให้วางแผ่นตัวอย่างห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 17 เซนติเมตร ที่มีความสูง 30 เซนติเมตร และให้ผู้สังเกตอยู่ห่างจากผ้าไหมประมาณ 30 เซนติเมตร โดยผู้สังเกตสามารถขยับความสูงของระดับการมองเห็น ขึ้น-ลง ได้ ซึ่งแสดงตามภาพที่ (3.7) จากนั้นให้ผู้สังเกตบันทึกลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมตามระดับของแนวการมองของผู้สังเกต โดยระดับกลางเป็นระดับที่ผู้สังเกตอยู่ระนาบเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงแล้วบันทึกผล โดยเรียงลำดับผ้าไหมตัวอย่างที่มีความสว่างจากมากไปน้อย ในแต่ละมุมมอง ซึ่งวิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 3 นี้เทียบเท่ากับการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มุมตกกระทบ -30 องศา



ภาพที่ 3.7 แผนภูมิการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 3 สำหรับการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

วิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 4 มีลักษณะดังนี้ คือ ให้อ่างแผ่นตัวอย่างห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 30 เซนติเมตร ที่มีความสูง 30 เซนติเมตร และให้ผู้สังเกตอยู่ห่างจากผ้าไหมประมาณ 30 เซนติเมตร โดยผู้สังเกตสามารถขยับความสูงของระดับการมองเห็น ขึ้น-ลง ได้ ซึ่งแสดงตามภาพที่ (3.8) จากนั้นให้ผู้สังเกตบันทึกลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมตามระดับของแนวการมองของผู้สังเกต โดยระดับกลางเป็นระดับที่ผู้สังเกตอยู่ระนาบเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงแล้วบันทึกผลโดยเรียงลำดับผ้าไหมตัวอย่างที่มีความสว่างจากมากไปน้อย ในแต่ละมุมมอง ซึ่งวิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 4 นี้เทียบเท่ากับการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มุมตกกระทบ -45 องศา

เนื่องจากในการทดลองนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางจึงทำให้ไม่สามารถทดลองใช้มุมตกกระทบ 60 และ 75 องศา เพราะที่สองมุมนี้ต้องใช้ระยะทาง 52 และ 112 เซนติเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 3.8 แผนภูมิการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 4 สำหรับการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

โดยสามารถคำนวณหามุมรับภาพในแนวมุมเงยของผู้สังเกตได้ตามสมการที่ (3.1)

$$\theta_r = 90 - \tan^{-1}\left(\frac{h}{s}\right) \quad (3.1)$$

โดย

θ_r คือ มุมรับภาพในแนวมุมเงย

h คือ ความสูงของผู้สังเกต

s คือ ระยะทางระหว่างผู้สังเกตถึงผ้าไหม

3.2. วิธีการทดลองตอนที่ 2 การเสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงและทดสอบแบบจำลอง

การทดลองตอนที่ 2 นี้ เป็นการเสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม ดังที่กล่าวมาแล้ว ผู้วิจัยเลือกหาแบบจำลองการสะท้อนแสงที่มีอยู่ในปัจจุบันซึ่งเป็นแบบจำลองที่ผู้วิจัยพิจารณาว่า มีความสัมพันธ์กับลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม นำแบบจำลองการสะท้อนแสงเหล่านั้นมาศึกษาเพิ่มเติม เพื่อศึกษาลักษณะของปัจจัยที่มีผลต่อการให้ค่าการสะท้อนแสงของแบบจำลองแต่ละแบบ นำปัจจัยเหล่านั้นมาปรับปรุงให้มีความสัมพันธ์กับลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม แล้วนำปัจจัยเหล่านั้นมาสร้างแบบจำลองการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

หลังจากสร้างแบบจำลองการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมขึ้นมาแล้ว ผู้วิจัยทดสอบแบบจำลองการสะท้อนแสง โดยหาค่าคงตัวต่าง ๆ ในแบบจำลองการสะท้อนแสง 4 แบบ ที่กล่าวมาแล้วมาทดสอบ เพื่อได้ค่าการสะท้อนแสงและเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมมากที่สุด หาค่าคงตัวต่าง ๆ เหล่านั้นด้วยวิธีการหาความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด (least-square error) เพื่อให้ได้ค่าคงตัวในแบบจำลองการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมมากที่สุด โดยหาความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุดดังสมการที่ (3.2) [16]

$$E_i = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 \quad (3.2)$$

โดย

E_i คือ ค่าความผิดพลาด (error) ณ มุมรับภาพ i

y_i คือ ค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม ณ มุมรับภาพ i

$f(x_i)$ คือ ค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองการสะท้อนแสง

n คือ จำนวนของค่าการสะท้อนแสงทั้งหมด ณ มุมตกกระทบหนึ่ง ๆ

3.2.1. วิธีการคำนวณหาค่าคงตัวในแบบจำลองการสะท้อนแสงโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-square error method)

ตัวอย่างที่ 3.1 ถ้าต้องการหาค่าคงตัวในแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ (3.3)

$$\rho(\Theta_i \rightarrow \Theta_r) = k_d \cos \theta_i + k_s \cos^p \theta_s \quad (3.3)$$

แบบจำลองการสะท้อนแสงของฟองมีค่าคงตัว 3 ค่าที่ต้องคำนวณ ได้แก่ ค่า k_d , k_s และ p ผู้วิจัยหาค่าคงตัวทั้ง 3 นี้ โดยเปลี่ยนแปลงค่าเหล่านี้ไปเรื่อย ๆ แล้วคำนวณหาค่า $\rho(\Theta_i \rightarrow \Theta_r)$ ที่มุมตกกระทบหนึ่ง ๆ ซึ่งในแต่ละครั้งที่เปลี่ยนค่าทั้ง 3 นั้น ค่า $\rho(\Theta_i \rightarrow \Theta_r)$ คือ ค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณในแต่ละครั้ง จากนั้นนำ $\rho(\Theta_i \rightarrow \Theta_r)$ ไปแทนค่าใน $f(x_i)$ ตามสมการที่ (3.2) และแทนค่า y_i ด้วยค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผิวผ้าไหม สูดท้ายจึงคำนวณหาค่าความผิดพลาด (error) แล้วนำค่าคงตัวที่ให้ค่าเบี่ยงเบนน้อยที่สุดมาใช้ เพราะเป็นค่าคงตัวที่ทำให้แบบจำลองนี้ให้ค่าการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมมากที่สุด

เมื่อคำนวณหาค่าคงตัวต่าง ๆ ในแบบจำลองแต่ละแบบของการสะท้อนแสงเสร็จแล้ว จึงคำนวณหาค่าการสะท้อนแสงของแต่ละแบบจำลอง ใช้ค่าของมุมของแหล่งกำเนิดแสงในแนวมุมเงย ที่ 0, -15, -30, -45, -60 และ -75 องศา ตามลำดับสำหรับแต่ละมุมของแหล่งกำเนิดแสง และใช้ค่าของมุมรับภาพในแนวมุมเงย ที่ -75, -60, -45, -30, -15, 0, 15, 30, 45, 60 และ 75 องศา การคำนวณแบบจำลองแต่ละแบบต้องแปลงมุมให้เป็นมุมในหน่วยเรเดียน (radian) ก่อนแล้ว จึงสามารถคำนวณหาค่าการสะท้อนแสงได้ นำค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณไปเปรียบเทียบกับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม เพื่อหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยหาค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย

(RMS : root-mean-square error) ดังสมการที่ (3.4) [17] และหาแบบจำลองการสะท้อนแสงที่
ให้ค่าการสะท้อนแสงมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

$$E_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2} \quad (3.4)$$

โดย

E_i คือ ค่าความผิดพลาด ณ มุมรับภาพ i

y_i คือ ค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม ณ มุมรับภาพ i

$f(x_i)$ คือ ค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองการสะท้อนแสง

n คือ จำนวนของค่าการสะท้อนแสงทั้งหมด ณ มุมตกกระทบหนึ่ง ๆ

3.2.2. วิธีการคำนวณหาความผิดพลาดโดยใช้ root-mean-square errors

จากตัวอย่างที่ 3.1 สามารถหาค่าคงตัวต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของผิว
ผ้าไหมในแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟองได้แล้ว เมื่อคำนวณค่าการสะท้อนแสงแล้ว นำค่าที่
คำนวณมาแทนค่า $f(x)$ นำค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผิวผ้าไหมมาแทนค่า y ในสมการที่ (3.4)
แล้วคำนวณหาความผิดพลาด (E_i)

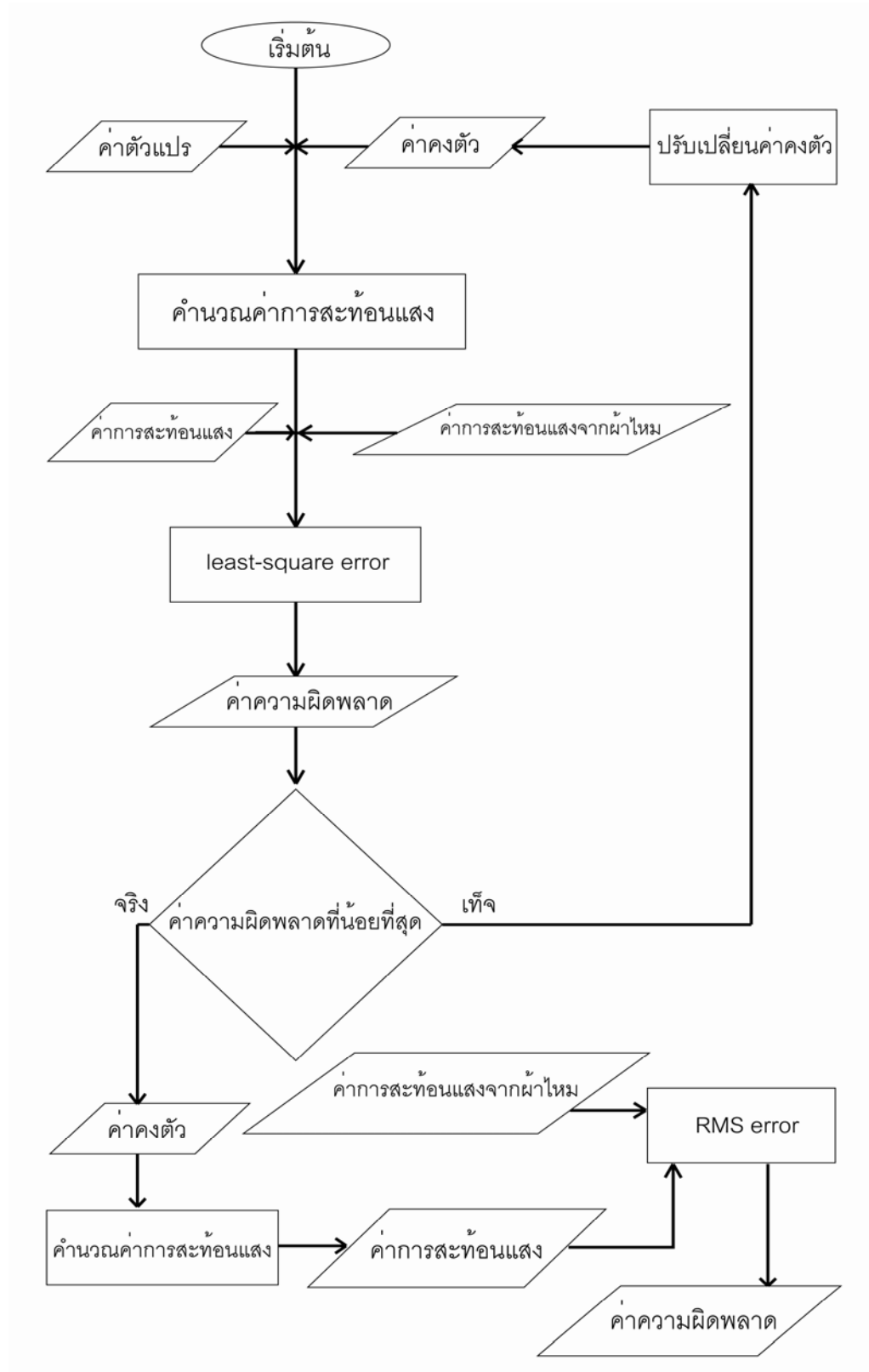
3.2.3. รายละเอียดของชุดคำสั่งที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้วิจัยได้เขียนชุดคำสั่งเพื่อใช้ดำเนินการในซอฟต์แวร์แมตแลป รุ่น R2006a ซึ่งในชุดคำสั่งนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ทำหน้าที่ ดังนี้

1. ชุดคำสั่งที่เกี่ยวกับสมการของแบบจำลองการสะท้อนแสง
2. ชุดคำสั่งที่เกี่ยวกับการคำนวณหาค่าคงตัวในแบบจำลองการสะท้อนแสง
3. ชุดคำสั่งที่เกี่ยวกับการทดสอบแบบจำลองการสะท้อนแสง

ในชุดคำสั่งส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่บรรจุสมการของแบบจำลองการสะท้อนแสงต่าง ๆ ตามที่กล่าวไว้ในข้างต้น และเป็นส่วนที่คำนวณค่าการสะท้อนแสงของแบบจำลองแต่ละแบบ แล้วส่งค่าการสะท้อนแสงเหล่านี้มาที่ชุดคำสั่งส่วนที่สองเพื่อหาค่าคงตัวที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของแบบจำลองแต่ละแบบของการสะท้อนแสงโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด แล้วชุดคำสั่งนี้จะส่งค่าคงตัวที่นำมาใช้คำนวณในแบบจำลองการสะท้อนแสงแล้ว ให้ค่าการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผิวผ้าไหมมากที่สุดกลับไปชุดคำสั่งแรก เพื่อใช้เป็นค่าคงตัวสำหรับใช้คำนวณค่าการสะท้อนแสงต่อไป สุดท้ายนี้ชุดคำสั่งชุดแรกจะคำนวณค่าการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผิวผ้าไหมมากที่สุดไปยังชุดคำสั่งสุดท้าย เพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการหาค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย และแสดงผลค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นออกมา

3.2.4. แผนการทำงานของชุดคำสั่งในงานวิจัย



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1. การทดลองตอนที่ 1: ลักษณะการสะท้อนแสง

เมื่อพิจารณาผ้าไหมสีขาว 3 ตัวอย่าง ซึ่งทอด้วยลายขัด 3 แบบด้วยกัน โดยผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ใช้เส้นไหม 2 เส้นในการทอซึ่งซื้อจากร้านไหมไทยคอลเล็คชั่น ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 ใช้เส้นไหม 2 และ 4 เส้น ในการทอ จากร้าน จิม ทอปัมสัน

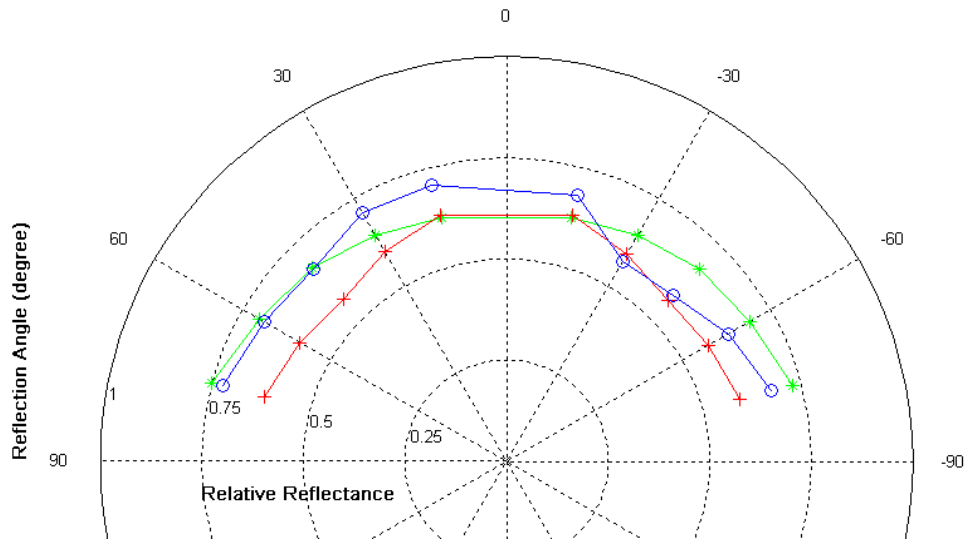
ผลการทดลองตอนที่ 1 เป็นกราฟการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง เขียนในพิกัดเชิงขั้ว ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนแสงที่วัดโดยเครื่องโกนินิโอสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดูรายละเอียดของกราฟผลการทดลองทั้งหมดได้ที่ ภาคผนวก ก.

การอภิปรายและวิจารณ์ผลนี้ จะนำผลการทดลองของผ้าไหมแต่ละตัวอย่างมาเปรียบเทียบกัน และแปรผลจากกราฟเป็นลักษณะการสะท้อนแสงที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1. ผลของกราฟที่ 4.1

เมื่อพิจารณากราฟที่ (4.1) ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้งสามตัวอย่าง เมื่อมีแสงตกกระทบบนผิวที่มุม 0 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างมีการสะท้อนแสงเกือบเท่ากันรอบผิวผ้าไหมที่แสงตกกระทบบนผิว ซึ่งเป็นลักษณะการสะท้อนแสงแบบฟุ้งที่ไม่เป็นอุดมคติ โดยผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีการสะท้อนแสงที่มากที่สุด เพราะมีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุด รองลงมาเป็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ตามลำดับ จากกราฟที่ (4.1) สามารถบอกลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่ตามนุษย์รับรู้ได้ว่า เมื่อแสงตกกระทบบนผิวผ้าไหมที่

มุม 0 องศา ผู้สังเกตมองไม่เห็นความมันวาวของผ้าไหมในทุกมุมมอง เพราะกราฟผ้าไหมไม่มีการสะท้อนแสงแบบกล้อออกมาเลย แต่ผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความสว่างมากที่สุด

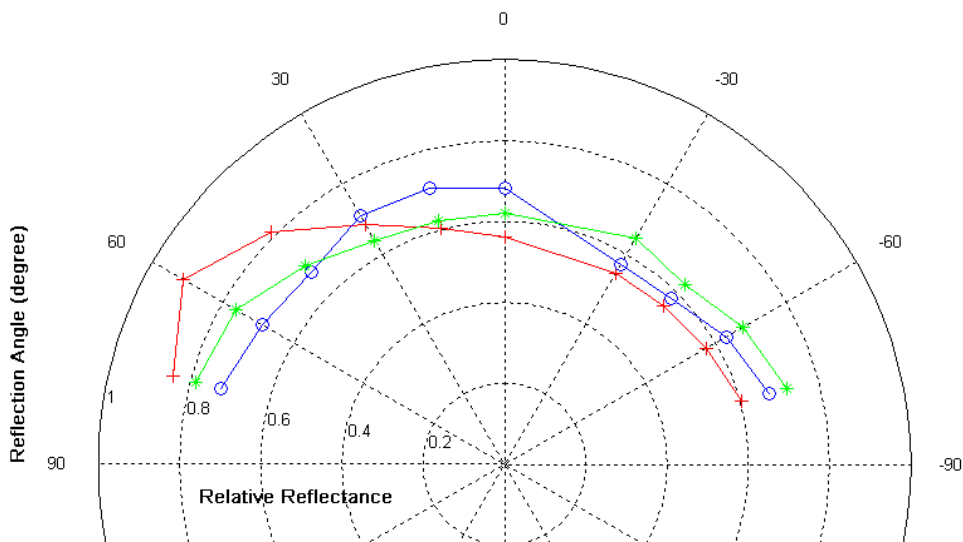


กราฟที่ 4.1 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม 0 องศา

4.1.2. ผลของกราฟที่ 4.2

เมื่อพิจารณากราฟที่ (4.2) ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างเมื่อแสงตกกระทบบที่มุม -15 องศา กราฟแสดงให้เห็นว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีค่าการสะท้อนแสงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.9134 ที่มุม 60 องศา ซึ่งแสดงว่า เกิดอพลสเปกคูลาร์ขึ้น 45 องศา ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ยังไม่เห็นส่วนที่เป็นอพลสเปกคูลาร์ชัดเจน และผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เห็นได้ว่า มีค่าสะท้อนแสงมากที่มุมประมาณ 15 องศา ถึง 30 องศา ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสง 0.7060 และ 0.7087 ตามลำดับ แสดงว่า ยังไม่เกิดอพลสเปกคูลาร์ หรือเกิดเพียงเล็กน้อย กราฟที่ (4.2) สามารถบอกลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่ตามนุษย์รับรู้ได้ว่า ถ้าแสงตกกระทบบลงบนผิวผ้าไหมที่มุม -15 องศา และผู้สังเกตมองผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างที่มุมมอง 60 องศา ผู้สังเกตจะเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีความสว่าง หรือมีความมันวาวมากที่สุด แต่ถ้าผู้สังเกตเปลี่ยนมุมมองที่มุมมอง 15 องศา จะเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความสว่าง หรือมีความมันวาวมากที่สุด ที่เป็น

เช่นนี้ในทั้งสองกรณี เพราะกราฟแสดงส่วนที่เป็นออฟสเปกคูลาร์ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีค่าการสะท้อนแสงสูงสุด 0.9134 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงเท่ากับ 0.7060 สะท้อนออกที่มุม 60 องศา และ 15 องศา ตามลำดับ

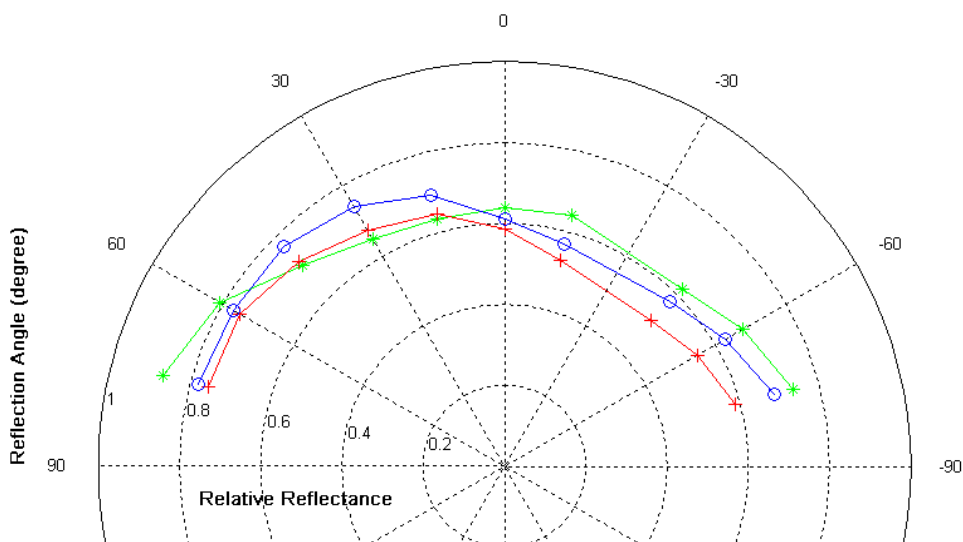


กราฟที่ 4.2 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -15 องศา

4.1.3. ผลของกราฟที่ 4.3

เมื่อพิจารณากราฟที่ (4.3) เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างเมื่อมีแสงตกกระทบที่มุม -30 องศา กราฟแสดงให้เห็นว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีแนวโน้มการสะท้อนแสงค่อนข้างไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ มีการสะท้อนแสงออกไปมากที่มุมช่วง 15 องศา ถึง 60 องศา แต่ผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 สะท้อนแสงได้มากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีแนวโน้มการสะท้อนแสงที่แตกต่างจากผ้าไหมทั้งสองตัวอย่าง (ตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2) คือ การสะท้อนแสงค่อนข้างเท่ากันรอบผิวผ้าไหม กราฟที่ (4.3) สามารถบอกลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่มนุษย์รับรู้ได้ว่า ถ้าแสงตกกระทบลงผิวผ้าไหมที่มุม -30 องศา ผู้สังเกตมองผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างที่มุมมองช่วง 15 องศา ถึง 60 องศา เห็นได้ว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความมันวาวและความสว่างมากที่สุด ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงที่

มุมมอง 45 องศา เท่ากับ 0.7690 รองลงมาเป็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงที่มุมมอง 45 องศา เท่ากับ 0.7164 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงที่มุมมอง 45 องศา 0.7009 ตามลำดับ แต่ถ้าเปลี่ยนมุมมองมาที่มุม 0 องศา สังเกตเห็นได้ว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีการสะท้อนแสงสว่างที่สุดซึ่งมีค่าการสะท้อนแสง 0.6401

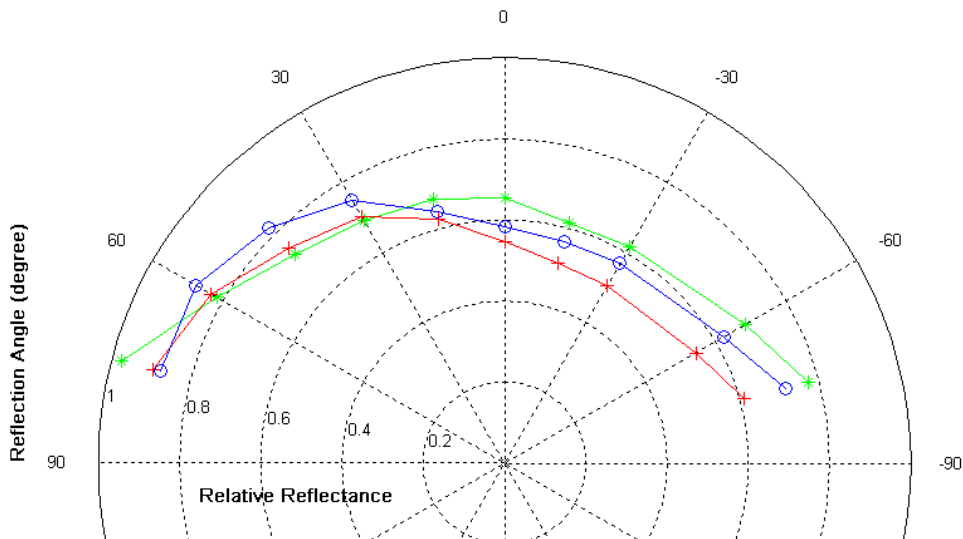


กราฟที่ 4.3 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม -30 องศา

4.1.4. ผลของกราฟที่ 4.4

กราฟที่ (4.4) เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างเมื่อแสงตกกระทบบที่มุม -45 องศา ซึ่งให้เห็นว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีแนวโน้มการสะท้อนแสงค่อนข้างไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ มีการสะท้อนแสงออกไปมากที่มุมช่วง 30 องศา ถึง 60 องศา แต่ผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 สะท้อนแสงได้มากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีแนวโน้มการสะท้อนแสงที่แตกต่างจากทั้งสองตัวอย่าง (ผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 3) คือ การสะท้อนแสงมีค่ามากที่มุมช่วง 0 องศา ถึง 30 องศา ซึ่งมีค่าการสะท้อน

แสงอยู่ในช่วง 0.6534 ถึง 0.6923 กราฟที่ (4.4) สามารถบอกลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่มนุษย์รับรู้ได้ว่า เมื่อแสงตกกระทบลงผิวผ้าไหมที่มุม -45 องศา ผู้สังเกตมองผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างที่มุมมองช่วง 30 องศา ถึง 60 องศา สังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความมันวาวและความสว่างมากที่สุด ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.7499 ถึง 0.8780 รองลงมาเป็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.7042 ถึง 0.8344 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.6923 ถึง 0.8174 ตามลำดับ แต่ถ้าเปลี่ยนมุมมองมาที่มุม 0 องศา สังเกตเห็นได้ว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีการสะท้อนแสงสว่างมากที่สุด ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสง 0.7739

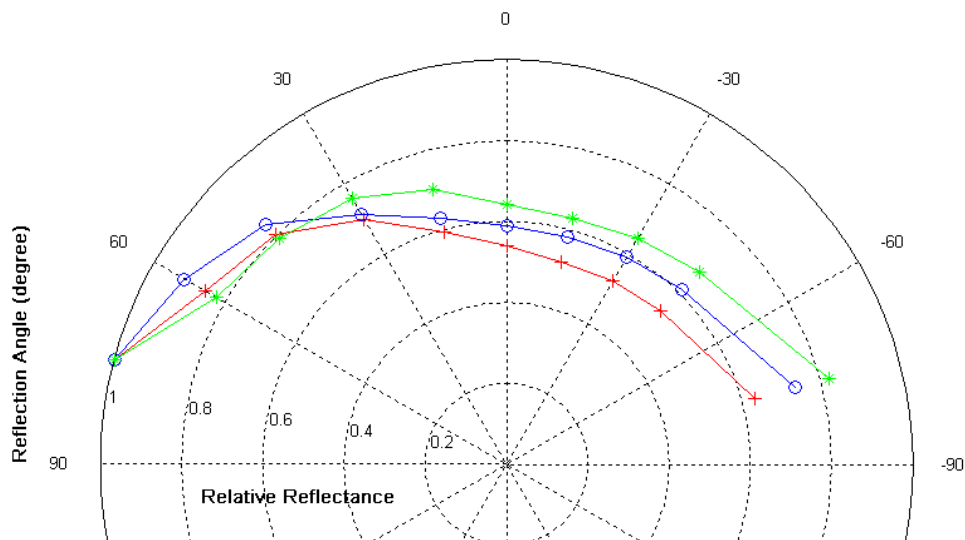


กราฟที่ 4.4 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -45 องศา

4.1.5. ผลของกราฟที่ 4.5

กราฟที่ (4.5) เป็นกราฟเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้งสามตัวอย่าง เมื่อแสงตกกระทบที่มุม -60 องศา กราฟแสดงให้เห็นว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีแนวโน้มการสะท้อนแสงค่อนข้างไปในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือ มีการสะท้อนแสงมากที่มุมช่วง 45 องศา ถึง 75 องศา แต่ผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 สะท้อนแสงได้มากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และผ้า

ไหมตัวอย่างที่ 2 มีแนวโน้มการสะท้อนแสงที่แตกต่างจากทั้งสองตัวอย่าง คือ มีการสะท้อนแสงมากที่สุดช่วง 15 องศา ถึง 45 องศา ซึ่งม้ค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.6422 ถึง 0.7919 กราฟที่ (4.5) สามารถบอกลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่มนุษย์รับรู้ได้ว่า เมื่อแสงตกกระทบบนผิวผ้าไหมที่มุม -60 องศา ผู้สังเกตมองผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างที่มุมมองช่วง 45 องศา ถึง 75 องศา เห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความมันวาวและความสว่างมากที่สุด ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.8389 ถึง 1.0000 รองลงมาจะเป็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.8025 ถึง 1.000 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.8025 ถึง 1.0000 ตามลำดับ แต่ถ้าเปลี่ยนมุมมองมาที่มุม 0 องศา สังเกตเห็นว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีการสะท้อนแสงสว่างมากที่สุด ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสง 0.8219



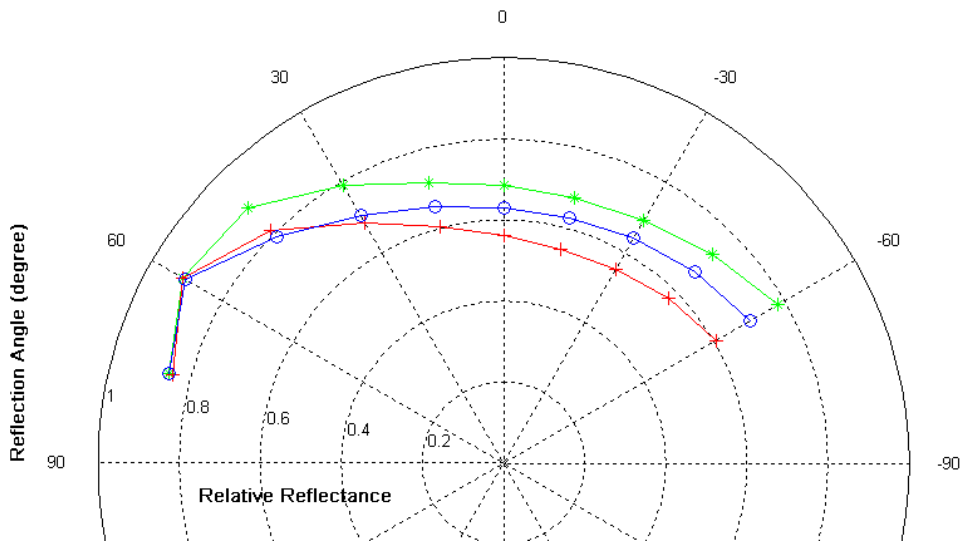
กราฟที่ 4.5 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบนที่มุม -60 องศา

4.1.6. ผลของกราฟที่ 4.6

เมื่อพิจารณากราฟที่ (4.6) ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างเมื่อแสงตกกระทบบนที่มุม -75 องศา กราฟแสดงให้เห็นว่า ผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างมี

แนวโน้มการสะท้อนแสงค่อนข้างไปในแนวทางเดียวกัน คือมีการสะท้อนแสงออกไปมากที่มุมช่วง 45 องศา ถึง 75 องศา แต่ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 จะสะท้อนแสงได้มากที่สุดซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.8891 ถึง 0.8549 รองลงมาเป็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.7900 ถึง 0.8553 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.8105 ถึง 0.8453 ตามลำดับ

จากกราฟที่ (4.6) สามารถบอกถึงลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่มนุษย์รับรู้ได้ว่า ถ้าแสงตกกระทบลงผิวผ้าไหมที่มุม -75 องศา แล้วผู้สังเกตมองผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างที่มุมมองช่วง 45 องศา ถึง 75 องศา จะสังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีความมันวาวและความสว่างมากที่สุดซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.8891 ถึง 0.8549 รองลงมาจะเป็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.8105 ถึง 0.8453 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.7900 ถึง 0.8553 ตามลำดับ แต่ผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.8105 ถึง 0.8453 และตัวอย่างที่ 3 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.7900 ถึง 0.8553 จะเห็นการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกันมาก และถ้าเปลี่ยนมุมมองมาที่มุม 0 องศา จะสังเกตเห็นว่า ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีการสะท้อนแสงสว่างที่สุด ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสง 0.6890 รองลงมาเป็นตัวอย่างที่ 3 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสง 0.6295 และตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสง 0.5609 ตามลำดับ



กราฟที่ 4.6 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้แสงตกกระทบบที่มุม -75 องศา

4.1.7. ผลของการใช้ผู้สังเกตเปรียบเทียบลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหม

จากผลการทดลองการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงที่แสดงดังกราฟที่ (4.1) – (4.6) ยืนยันว่า สามารถแปรผลจากกราฟเพื่อบอกลักษณะการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผ้าไหม ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองเพิ่มเติมเพื่อใช้ยืนยันว่า กราฟผลการทดลองตอนที่ 1 มีความสอดคล้องกับการรับรู้ของมนุษย์ การทดลองนี้ได้ใช้ผู้สังเกตจำนวน 5 คน มาสังเกตผ้าไหมทั้งสามตัวอย่าง โดยใช้มุมมองและมุมที่แสงตกกระทบบต่าง ๆ ตามการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

จากวิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 1 ดังภาพที่ (3.5) เสมือนใช้แหล่งกำเนิดแสงมุมตกกระทบบ 0 องศา ซึ่งได้ผลทดลองดังนี้ ผู้สังเกตมองเห็นผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างไม่มีความมั่นใจ มีลักษณะด้านในทุกระดับการมอง และมีความสว่างที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลการทดลองนี้มีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับกราฟที่ (4.1)

จากวิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 2 ดังภาพที่ (3.6) เสมือนใช้แหล่งกำเนิดแสงมุมตกกระทบ -15 องศา ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้ ที่มุมมองระดับสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย ช่วง 15 ถึง 30 องศา) จะสังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความสว่างสูงสุดรองลงมาเป็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ ที่มุมมองระดับเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย 45 องศา) จะสังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีความสว่างสูงสุด รองลงมาเป็นตัวอย่างที่ 3 และตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ สุดท้ายที่มุมมองระดับต่ำกว่าแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย ช่วง 60 ถึง 75 องศา) จะสังเกตเห็นว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีความสว่างสูงสุด รองลงมาเป็นตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับกราฟที่ (4.2)

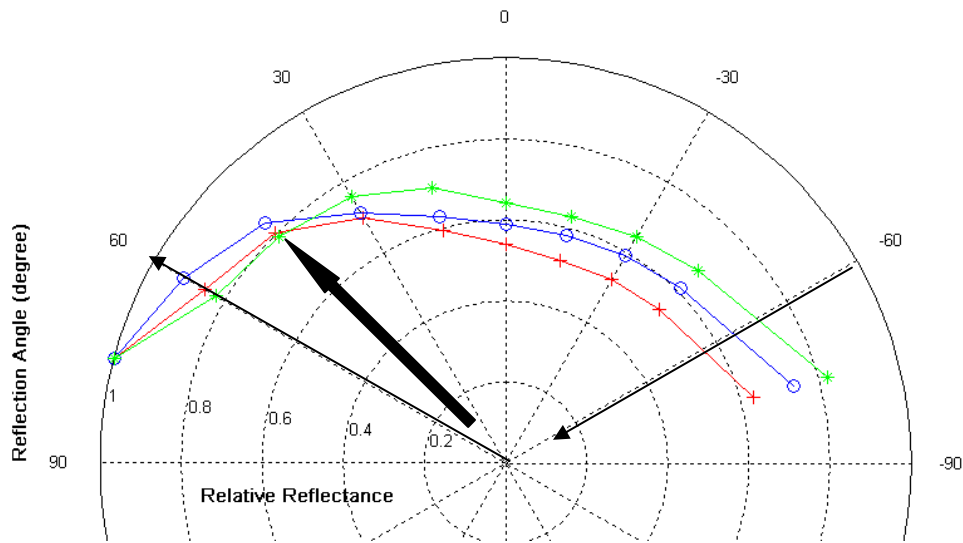
จากวิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 3 ดังภาพที่ (3.7) เสมือนใช้แหล่งกำเนิดแสงมุมตกกระทบ -30 องศา ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้ ที่มุมมองระดับสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย ช่วง 15 ถึง 30 องศา) จะสังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความสว่างสูงสุด รองลงมาเป็น ตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ ถัดมาที่มุมมองระดับเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย 45 องศา) จะสังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความสว่างสูงสุด รองลงมาเป็นตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 ตามลำดับ สุดท้ายที่มุมมองระดับต่ำกว่าแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย ช่วง 60 ถึง 75 องศา) จะสังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 กับ ตัวอย่างที่ 2 มีความสว่างใกล้เคียงกัน ซึ่งมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับกราฟที่ (4.3)

จากวิธีการจัดวางอุปกรณ์แบบที่ 4 ดังภาพที่ (3.8) เสมือนใช้แหล่งกำเนิดแสงมุมตกกระทบ -45 องศา ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้ ที่มุมมองระดับสูงกว่าแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย ช่วง 15 ถึง 30 องศา) จะสังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีความสว่างสูงสุด รองลงมาเป็นตัวอย่างที่ 3 และตัวอย่างที่ 1 ตามลำดับ ถัดมาที่มุมมองระดับเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย 45 องศา) จะสังเกตเห็นผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความสว่างสูงสุด แต่ผ้าไหมตัวอย่างที่เหลือมีความสว่างใกล้เคียงกัน สุดท้ายที่มุมมองระดับต่ำกว่าแหล่งกำเนิดแสง (มุมมองในแนวมุมเงย ช่วง 60 ถึง 75 องศา) จะสังเกตเห็นผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างมีความสว่างใกล้เคียงกัน ซึ่งมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับกราฟที่ (4.4)

4.2. วิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1 : ลักษณะการสะท้อนแสง

ผลการทดลองตอนที่ 1 กราฟค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมในพิกัดเชิงซั่วแสดงให้เห็นลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมแต่ละตัวอย่าง ผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างนี้มีลักษณะการสะท้อนแสงที่เหมือนกันคือ ค่าการสะท้อนแสงมีการกระจายตัวออกรอบทิศทางและมีการเบี่ยงไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง ค่าการสะท้อนแสงมีความเข้มมากในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นลักษณะการสะท้อนแสงที่เกิดจากการผสมกันระหว่างการสะท้อนแสงแบบพุ่งกับการสะท้อนแสงแบบกล้ำ ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างนี้เกิดการสะท้อนแสงแบบผสม แต่การสะท้อนแสงในส่วนของลักษณะการสะท้อนแสงแบบกล้ำของผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างนั้น เกิดการเหลื่อมของมุมสะท้อน โดยปรกติ มุมสะท้อนควรเท่ากับมุมตกกระทบ ซึ่งแสดงว่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมเกิดลักษณะออฟสเปกคูลาร์ (off-specular) ขึ้นมา เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเกิดออฟสเปกคูลาร์ของผิวผ้าไหม จึงขอยกตัวอย่าง กราฟที่ (4.7) ซึ่งเป็นกราฟการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมในพิกัดเชิงซั่วของผ้าไหมทั้งสามตัวอย่างเมื่อใช้มุมตกกระทบ -60 องศา

เมื่อพิจารณาลูกศรที่มีขนาดเล็กในกราฟที่ (4.7) แสดงทางเดินของแสงที่ตกกระทบลงบนผิวของผ้าไหมแล้วสะท้อนแสงออก โดยปรกติ การสะท้อนแสงแบบกล้ำนั้น เมื่อมีแสงตกกระทบลงบนผิววัตถุที่มุม -60 องศา แล้ว ต้องมีการสะท้อนแสงไปที่มุม 60 องศา แต่จากผลการทดลองเห็นได้ว่า ทิศทางที่แสงสะท้อนออกที่มีความเข้มสูงนั้น เป็นไปตามทิศทางของลูกศรขนาดใหญ่ซึ่งเป็นมุมที่เบี่ยงเบนจากมุมสะท้อนปรกติ ดังนั้น จึงแสดงให้เห็นว่า การสะท้อนของผิวผ้าไหมนั้นเกิดลักษณะออฟสเปกคูลาร์



กราฟที่ 4.7 การกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวน้ำใหม่ตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้มุมตกกระทบ - 60 องศา

การเกิดออฟเพกคูลาร์ของการสะท้อนแสงจากผิวน้ำใหม่นั้น อาจเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ได้แก่ ลักษณะของลายทอ ความขรุขระของผิวน้ำใหม่ ชนิดของเส้นไหม ความหนาบางของผ้า และช่องว่างระหว่างเส้นไหมที่เกิดจากการทอ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะต้องศึกษาลึกลงไปในโครงสร้างระดับไมโคร จึงจะสามารถอธิบายผลที่ได้ แต่ในงานวิจัยนี้ มีข้อจำกัดเรื่องเครื่องมือวัดที่ยังไม่สามารถศึกษาลึกลงไปในโครงสร้างระดับไมโคร งานวิจัยนี้สามารถวัดค่าการสะท้อนแสงได้ในระดับมาโครเท่านั้น ถึงอย่างไรก็ตาม ค่าการสะท้อนแสงในระดับนี้ยังเป็นค่าการสะท้อนแสงที่มีความสำคัญ เพราะเป็นค่าการสะท้อนแสงสุดท้ายหลังจากที่แสงเกิดการหักเห เกิดการดูดกลืนแสง เกิดการส่องผ่าน และเกิดการกระเจิง ภายในโครงสร้างของผ้าใหม่และเส้นไหมที่มีขนาดระดับไมโคร แสงเหล่านี้จึงสะท้อนออกจากผิวน้ำใหม่เข้าสู่ตามนุษย์ หรืออุปกรณ์รับสัญญาณต่าง ๆ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ค่าการสะท้อนแสงในระดับนี้เป็นค่าการสะท้อนแสงที่ทำให้มนุษย์สามารถรับรู้ถึงความสว่างและความมันเงาของผิวน้ำใหม่ [15]

อย่างไรก็ตาม การศึกษาลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมในโครงสร้างระดับนี้ ยังไม่สามารถตอบปัญหาในเรื่องของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออฟสเปกคูลาร์ แต่ทำได้เพียงบ่งบอกลักษณะการสะท้อนแสงโดยรวมของผิวผ้าไหมเท่านั้น

ทอร์เรนซ์และสเปร์โรว์ (Torrance and Sparrow) ได้อธิบายการเกิดออฟสเปกคูลาร์ไว้ว่า ผิววัตถุที่แสงสะท้อนเกิดออฟสเปกคูลาร์นั้น เกิดจากความขรุขระของผิวหน้า ซึ่งมีพื้นที่บริเวณส่วนเล็ก ๆ กระจายตัวและทำมุมในทิศทางต่าง ๆ กับเส้นปรกติอย่างอิสระ ซึ่งเรียกบริเวณผิวเล็ก ๆ ที่มีหลายแง่ หรือ หลายมุม นี้ว่า ไมโครฟาเซต (micro facet) โดยผิวหน้าของแง่มุมแต่ละบริเวณนั้น สะท้อนแสงแบบกล้ำซึ่งเป็นอูดมคติ การที่ผิววัตถุมีการกระจายตัวของไมโครฟาเซต และไมโครฟาเซตมีความสูงต่ำที่แตกต่างกัน จึงทำให้เกิดผลกระทบสามแบบด้วยกัน ได้แก่ [9]

1. เกิดการบดบังระหว่างไมโครฟาเซต (masking)
2. เกิดเงา หรือ ความมืดระหว่างไมโครฟาเซต (shadowing)
3. เกิดการสะท้อนภายในของเส้นใยระหว่างไมโครฟาเซต (inter reflection)

การเกิดการบดบังระหว่างไมโครฟาเซต คือ แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบลงบนผิวไมโครฟาเซต ณ ตำแหน่งหนึ่ง ได้แสงสะท้อนที่ออกจากผิวของไมโครฟาเซต ณ ตำแหน่งนี้ ถูกไมโครฟาเซต ณ ตำแหน่งอื่นบดบัง จึงทำให้แสงไม่สามารถเดินทางไปสู่สายตาของผู้สังเกต

การเกิดเงา หรือ ความมืดระหว่างไมโครฟาเซต คือ แสงจากแหล่งกำเนิดแสงไม่สามารถตกกระทบลงบนผิวของไมโครฟาเซต ณ ตำแหน่งที่ผู้สังเกตกำลังสังเกตอยู่ เนื่องมาจากผิวไมโครฟาเซต ณ ตำแหน่งนี้อยู่ภายใต้เงาของไมโครฟาเซต ณ ตำแหน่งอื่น ซึ่งบดบังแสงจากแหล่งกำเนิดแสง จึงทำให้แสงไม่สามารถตกกระทบลงสู่ผิวไมโครฟาเซต ณ ตำแหน่งนี้เพื่อสะท้อนเข้าสู่สายตาของผู้สังเกต

การเกิดการสะท้อนภายในของเส้นใยระหว่างไมโครฟาเซต คือ แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบลงบนผิวไมโครฟาเซต ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแล้ว เกิดการสะท้อนกลับไปกลับมา

ระหว่างผิวไมโครฟาเซตที่ตำแหน่งนี้ กับ ผิวไมโครฟาเซตที่ตำแหน่งอื่น ๆ จนแสงสะท้อนออกจากผิววัตถุเข้าสู่รูขนตาของผู้สังเกต

คำอธิบายเกี่ยวกับการเกิดออฟสเปกคูลาร์ของทอร์เรนซ์และสแปรร์โรว์ แสดงให้เห็นถึงปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดออฟสเปกคูลาร์ ได้แก่

1. ตำแหน่งและทิศทางของแสงตกกระทบ
2. ตำแหน่งและทิศทางของผู้สังเกต
3. ตำแหน่งและทิศทางของผิวไมโครฟาเซต
4. ลักษณะการกระจายตัวของไมโครฟาเซต

จากปัจจัยการเกิดออฟสเปกคูลาร์ที่กล่าวมาข้างต้นทั้ง 4 ข้อ สามารถอธิบายการเกิดออฟสเปกคูลาร์ของแสงสะท้อนจากผิวของผ้าไหมได้ดังนี้คือ เส้นใยของไหมแต่ละเส้นนั้น มีรูปร่างเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม จึงทำให้เส้นใยไหมนี้มีพื้นที่ผิวสามด้าน ซึ่งแตกต่างจากเส้นด้ายที่ทำจากเส้นใยชนิดอื่นซึ่งเส้นใยมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก จากเส้นใยไหมที่เป็นรูปทรงสามเหลี่ยมนี้ จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ ผ้าไหมมีการสะท้อนแสงแตกต่างจากผ้าชนิดอื่น ๆ

ความขรุขระของเส้นใยเกิดจากการกระจายตัวของไมโครฟาเซตบนผิวเส้นใย ซึ่งเส้นใยโดยทั่วไปที่มีรูปร่างเป็นรูปทรงกระบอกนั้น มีการกระจายตัวของไมโครฟาเซตแบบปกติ (normal distribution) หรือกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) แต่เส้นใยไหมมีความแตกต่างจากเส้นใยชนิดอื่น ๆ เพราะรูปร่างของเส้นใยไหมมีรูปร่างสามเหลี่ยม จึงทำให้การกระจายตัวของไมโครฟาเซตแตกต่างจากเส้นใยอื่น ซึ่งก็คือสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผ้าไหมมีลักษณะการสะท้อนแสงแตกต่างจากผ้าชนิดอื่น ๆ

หากพิจารณาว่า เส้นใยมีลักษณะไม่ทึบแสงโดยสมบูรณ์ (perfect opaque) ดังนั้น เมื่อแสงตกกระทบบนผิวเส้นใยแล้วแสง จะเกิดการทะลุเข้าไปในเนื้อเส้นใย โดยรูบิน (Rubin) [18] ได้อธิบายถึงเส้นทางเดินของแสงที่มีปฏิสัมพันธ์ต่อเส้นใยไว้ดังนี้

1. เมื่อแสงตกกระทบบนผิวเส้นใยแล้วแสงจะสะท้อนออกหมด
2. เมื่อแสงตกกระทบบนผิวเส้นใยแล้ว เกิดการหักเหเข้าไปในเนื้อเส้นใย แสงไปตกกระทบบนผิวเส้นใยอีกด้านหนึ่งแล้วหักเหทะลุออก
3. เมื่อแสงตกกระทบบนผิวเส้นใยแล้ว เกิดการหักเหเข้าไปในเนื้อเส้นใย แสงเกิดการกระเจิงแสงภายในเนื้อเส้นใย

ทฤษฎีของทอร์เรนซ์ [9] และสแปรโรว์ และรูบิน [18] แสดงให้เห็นว่า รูปทรงของเส้นใยนั้นมีผลต่อสมบัติเชิงแสง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเส้นใยไหม เพราะเส้นใยไหมมีรูปทรงสามเหลี่ยมและเป็นเส้นใยยาว (filament fiber)

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงขอเสนอว่า ผ้าไหมมีการสะท้อนแสงที่มีความมันวาวมากกว่าผ้าชนิดอื่น ๆ เพราะเส้นใยไหมมีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยม จึงทำให้เส้นใยไหมมีสมบัติการหักเหและการสะท้อนแสงคล้ายปริซึมสามเหลี่ยม ปริซึมสามเหลี่ยมนี้มีสมบัติที่สามารถหักเหแสงให้ไปรวมตัวกันแล้ว ทะลุออกที่ผิวหน้าด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งทำให้ผิวหน้าด้านนั้นดูมีความสว่างมาก [14] โดย ได้อธิบายสมบัติเชิงแสงของปริซึมไว้ในบทที่ 2

เมื่อพิจารณากรรมวิธีการผลิตเส้นไหม จะเห็นได้ว่า เส้นไหมผลิตโดยการนำเส้นใยไหมมาตีเกลียวเข้าด้วยกัน ขนาดของเส้นไหมนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนเกลียว เส้นใยไหมนั้นเป็นเส้นใยยาว (filament fiber) ซึ่งแตกต่างจากเส้นด้ายที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นเส้นใยสั้น (staple fiber) การที่เส้นใยไหมเป็นเส้นใยยาวนั้นมีความสำคัญต่อสมบัติเชิงแสงของผ้าไหม เพราะเส้นด้ายที่ผลิตจากเส้นใยยาว การกระจายตัวของเส้นใยเป็นระเบียบมากกว่าเส้นด้ายที่ผลิตจากเส้นใยสั้น จึงทำให้เส้นด้ายที่ผลิตจากเส้นใยยาวมีการกระเจิงแสงระหว่างเส้นใยน้อยกว่า จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ผ้าไหมมีความมันวาวมากกว่าผ้าจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาที่เนื้อผ้าไหม เนื้อผ้านั้นเกิดจากการนำเส้นด้ายหลาย ๆ เส้นมารวมกัน โดยปรกติสามารถแบ่งทิศทางของเส้นด้ายเป็น 2 ทิศทาง คือ ด้ายแนวขวาง หรือแนวพุ่ง

(weft direction) และด้ายแนวยืน หรือเส้นยืน (warp direction) มาถักทอรวมกัน แล้วจึงเกิดเป็นลายทอของผ้าขึ้นมา ลายผ้านี้มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการซ้อนทับกันของด้ายเส้นพุ่งและด้ายเส้นยืน

เนื่องจากเนื้อผ้าเกิดจากการซ้อนทับกันของด้ายเส้นพุ่งและด้ายเส้นยืน ดังนั้น จึงสามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างของเนื้อผ้าได้เป็นสามแบบ คือ

1. โครงสร้างบริเวณส่วนที่เป็นด้ายเดี่ยว
2. โครงสร้างบริเวณส่วนที่ซ้อนทับกันระหว่างด้ายเส้นพุ่งกับด้ายเส้นยืน
3. โครงสร้างบริเวณส่วนที่เป็นช่องว่าง

จากปัจจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ลายทอของผ้ามีผลต่อการสะท้อนแสง ถ้าลายทอนั้นมีพื้นที่ของช่องว่างมาก ทำให้แสงส่องผ่านผืนผ้าได้มาก ค่าการสะท้อนแสงจึงน้อย ถ้าลายทอมีส่วนที่เป็นเส้นด้ายมาก จะทำให้เนื้อผ้าทึบแสง ผ้าจะสะท้อนแสงได้ดีหรือไม่นั้น ต้องพิจารณาชนิดของเส้นใยด้วย ดังได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้ว

อิทธิพลของลายทอต่อการสะท้อนแสงของผ้านั้น เห็นผลได้มากเฉพาะเมื่อสังเกตผ้าในระยะใกล้ (close-up view) เพราะผู้สังเกตเห็นการกระจายตัวของลายทอเป็นแบบไม่ปกติ แต่ถ้าสังเกตผ้าในระยะปกติ (normal view) ลายทอก็มีผลกระทบต่อค่าการสะท้อนแสงน้อย เนื่องจากลายทอมีรูปแบบที่ซ้ำกัน จึงทำให้เมื่อสังเกตผ้าที่ระยะไกลลายทอจะมีการกระจายตัวแบบไซรินดริคัลเกาส์เซียน (cylindrical Gaussians) ดังนั้นการสะท้อนแสงของผ้าเมื่อสังเกตที่ระยะไกลจึงขึ้นอยู่กับ ชนิดของเส้นใยและอัตราส่วนของพื้นที่เส้นด้ายในแนวเส้นพุ่ง และในแนวเส้นเส้นยืน

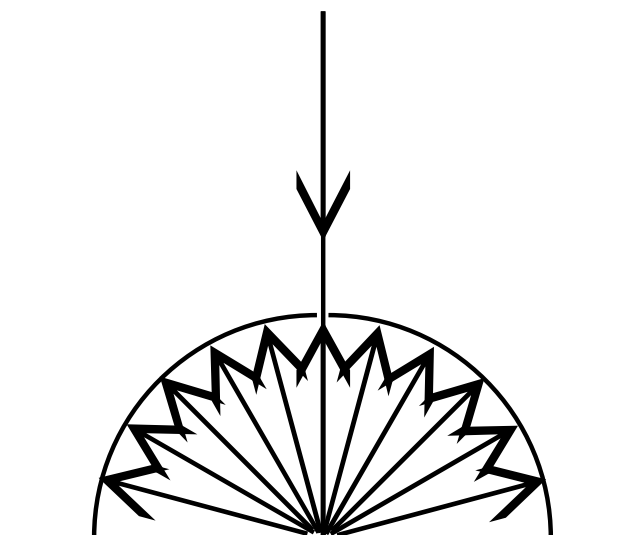
[15]

จากทฤษฎีและเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่า ผู้วิจัยสามารถวัดค่าและพิจารณาค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมในระดับมาโคร เพราะมุมมองและระยะทางปกติของผู้สังเกตเห็น

การสะท้อนแสงของผ้าไหมในระดับมาโคร และสามารถยืนยันผลที่ได้จากการทดลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อการสะท้อนแสงของผ้าไหมในการทดลองตอนที่ 1

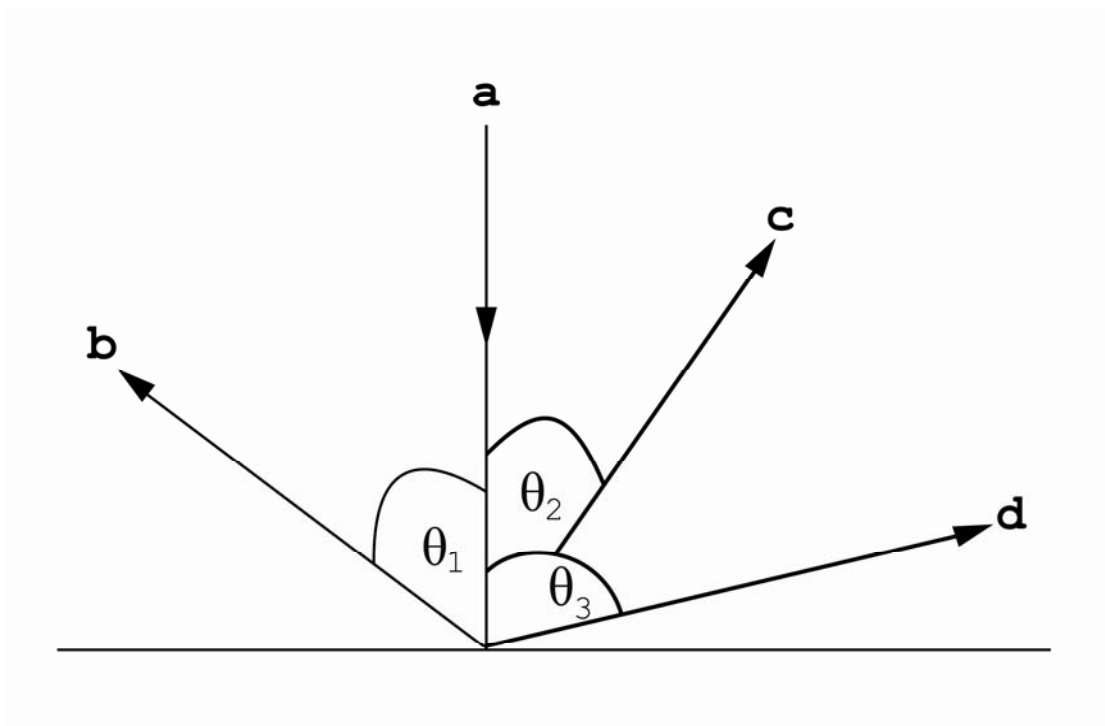
4.3. เสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหม

แบบจำลองการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมที่น่าเสนอนี้ เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจากการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมจากการทดลองตอนที่ 1 จากการสังเกตผลการทดลองในตอนต้นที่ 1 เห็นว่า การสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมเกิดจากการสะท้อนแสงที่ประกอบกันจากสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่สะท้อนแสงออกรอบทิศทาง และส่วนที่แสงสะท้อนไปหนาแน่นที่ทิศทางหนึ่ง ซึ่งเสมือนกับเป็นการสะท้อนแสงแบบก้ำ ดังนั้น จึงขออนุมานว่า การสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมนั้นประกอบขึ้นจากสองส่วนคือ ส่วนที่สะท้อนแสงแบบพุ่งและส่วนที่สะท้อนเสมือนแสงแบบก้ำ ส่วนที่สะท้อนแสงแบบพุ่งนั้น เมื่อแสงตกกระทบลงบนผิวผ้าไหมแล้วเกิดการกระเจิงแสง จึงทำให้แสงสะท้อนออกรอบทิศทางแล้วกลายเป็นการสะท้อนแสงแบบพุ่ง โดยสามารถเขียนทางเดินแสงได้ตามภาพที่ (4.1)



ภาพที่ 4.1 ทางเดินของแสงที่ตกกระทบลงบนผิวผ้าไหมแล้วเกิดการสะท้อนรอบทิศทางแบบแสงพุ่ง

จากทางเดินแสงในภาพที่ (4.1) สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ ดังภาพที่ (4.2)



ภาพที่ 4.2 เวกเตอร์ทางเดินแสง เมื่อเวกเตอร์แสง a ตกกระทบลงที่ผิววัตถุแล้ว สะท้อนแสงไปในทิศทางเวกเตอร์ b , c และ d

ภาพที่ (4.2) เป็นการยกตัวอย่างทางเดินแสงที่ตกกระทบตามทิศทางของเวกเตอร์ a และแสงสะท้อนออกรอบทิศทาง แต่ขอยกตัวอย่างเพียงทิศทางการสะท้อนแสงตามเวกเตอร์ b , c และ d

เวกเตอร์ a , b , c , และ d นี้ เป็นตัวอย่างของรังสีแสงที่สะท้อนรังสีออกจากผิววัตถุ สามารถคำนวณค่าการสะท้อนแสงของแต่ละทิศทางได้ ดังนี้

$$L_b = |a||b|\cos(\theta_1) \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) ขนาดของเวกเตอร์ a มีค่า เท่ากับ 1 เพราะเป็นแสงสว่างเริ่มแรกที่ตกกระทบผิววัตถุแล้วเกิดการสะท้อนออกไปในทิศทางของเวกเตอร์ b ซึ่งทำมุม กับเวกเตอร์ a แต่

ขนาดของเวกเตอร์ b ไม่เท่ากับ 1 เพราะมีการสูญเสียพลังงานจากการที่แสงมีการสะท้อนไปในทิศทางอื่น ๆ

จากสมการที่ (4.1) สามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันการสะท้อนแสงฟุ้งของผิววัตถุได้ดังสมการที่ (4.2)

$$L(\theta_i, \theta_r) = k \cos(\theta_i, \theta_r) \quad (4.2)$$

โดย

L คือ ค่าการสะท้อนแสง

θ_i คือ มุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดแสง

θ_r คือ มุมสะท้อนของแสงที่สะท้อนจากผิววัตถุ

k คือ สัมประสิทธิ์ของความเข้มแสงของแสงที่สะท้อนออกมา

เนื่องจากผ้าไหมไม่ได้สะท้อนแสงแบบฟุ้งเป็นแบบอูคึมคติ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเพิ่มตัวแปรเสริมเพื่อใช้ควบคุมรูปร่างการกระจายของแสงสะท้อน จึงได้สมการที่ (4.3)

$$L(\theta_i, \theta_r) = k \cos^\alpha(\theta_r) \quad (4.3)$$

โดย

L คือ ค่าการสะท้อนแสง

θ_i คือ มุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดแสง

θ_r คือ มุมสะท้อนของแสงที่สะท้อนจากผิววัตถุ

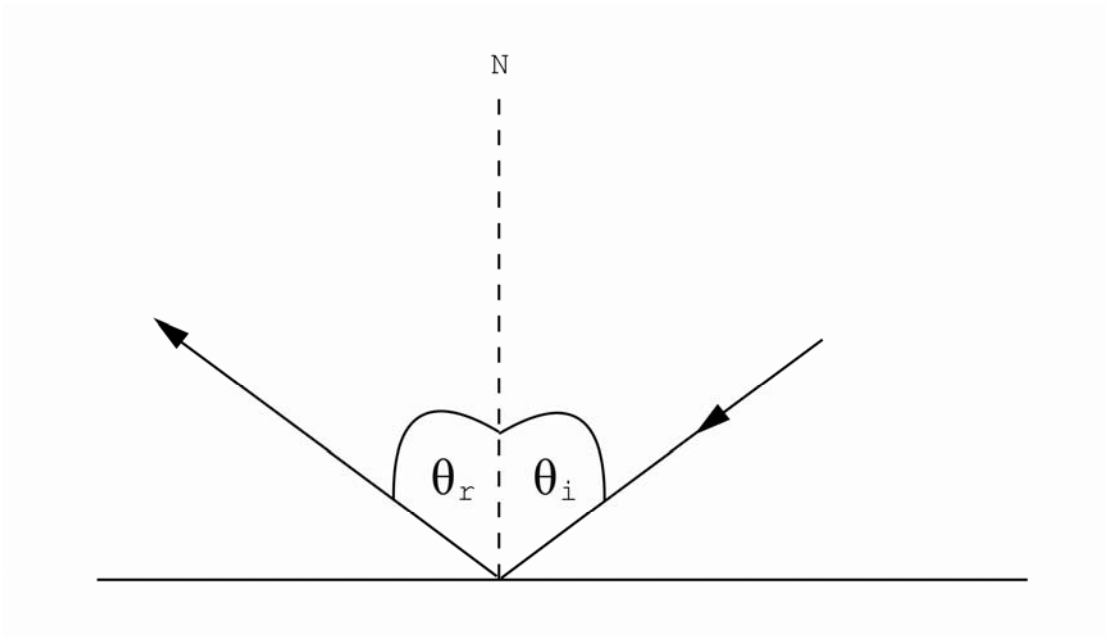
k คือ สัมประสิทธิ์ของความเข้มแสงของแสงที่สะท้อนออกมา

α คือ ตัวแปรเสริมที่ควบคุมความกว้างของกรวยแสง

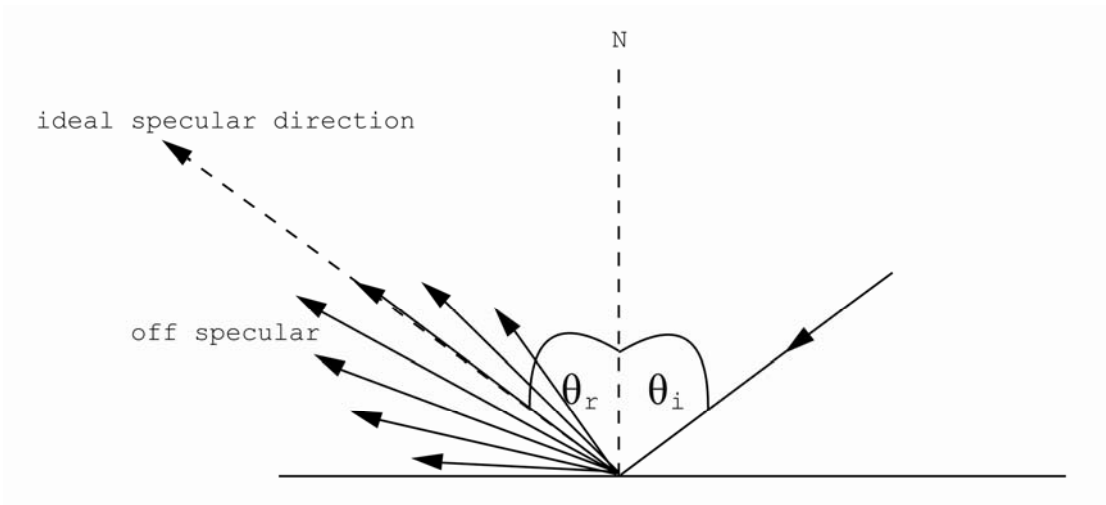
โดยความกว้างของกรวยแสงจะแปรผกผันกับตัวแปรเสริม α

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้วว่า การสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมประกอบขึ้นจากการสะท้อนแสงสองส่วน ขณะนี้จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของการสะท้อนแสงที่เสมือนการสะท้อนแสงแบบกล้ำของผิวผ้าไหม ซึ่งลักษณะการสะท้อนแสงส่วนที่คล้ายแสงกล้ำนี้ เกิดจากแสงตกกระทบบนเส้นไหมแล้ว เกิดการสะท้อนไปรวมตัวที่ทิศทางหนึ่งมากกว่าปรกติ จึงทำให้เสมือนเป็นแสงกล้ำเมื่อผู้สังเกตมองผิวผ้าไหมจากทิศทางนั้น ทำให้เห็นผ้าไหมสว่างมากกว่าทิศทางอื่น

การสะท้อนแสงแบบแสงกล้ำที่เป็นปรกตินั้น ลำแสงเมื่อตกกระทบบนผิววัตถุแล้วจะสะท้อนออกที่มุมตรงข้ามซึ่งเท่ากับมุมสะท้อน รูปร่างเป็นลำแสงพุ่งตรง แต่สำหรับการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมนั้น การสะท้อนของส่วนที่เสมือนแสงกล้ำ มักสะท้อนแสงออกเป็นกรวยแสง และมุมสะท้อนแสงนั้นยังมีการเบี่ยงเบนไปจากมุมสะท้อนปรกติที่ควรจะเป็น ซึ่งเรียกว่ามุมออฟสเปกคูลาร์ ได้ ยกตัวอย่างภาพของการสะท้อนแสงกล้ำที่เป็นปรกติ และการสะท้อนแสงที่เสมือนแสงกล้ำ ตามภาพที่ (4.3) และภาพที่ (4.4) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 การสะท้อนแสงแบบกล้าที่ปกติ



ภาพที่ 4.4 การสะท้อนแสงแบบกล้าที่เกิดออฟสเปกคูลาร์ของผิวผ้าไหม

จากภาพที่ (4.4) แสดงให้เห็นว่า มุมของลำแสงสะท้อนลำแสงสูงสุด เกิดการเบี่ยงเบนไปทิศทางของแสงกล้าที่ปกติ และแสงสะท้อนจากผิวผ้าไหม เกิดการกระเจิงแสงจนเป็นกรวย ซึ่งแตกต่างจากแสงกล้าปกติที่เป็นลำแสงพุ่งสะท้อนออกไปตามภาพที่ (4.3)

ดังนั้น จึงขอเสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงในส่วนเสมือนแสงกล้า ที่เกิดการกระเจิงแสง และเกิดการเบี่ยงเบนของมุมสะท้อนตามสมการที่ (4.4)

$$L(\theta_i, \theta_r) = k \cos^\beta(\theta_r + (\theta_i - \theta_{off})) \quad (4.4)$$

โดย

- L คือ ค่าการสะท้อนแสง
- θ_i คือ มุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดแสง
- θ_r คือ มุมสะท้อนของแสงที่สะท้อนจากผิววัตถุ
- θ_{off} คือ มุมออฟสเปกคูลาร์
- k คือ สัมประสิทธิ์ความเข้มแสงของแสงที่สะท้อนออกมา
- β คือ ตัวแปรเสริมที่ควบคุมความกว้างของกรวยแสง

โดยความกว้างของกรวยแสงจะแปรผกผันกับค่า β

สมการที่ (4.4) สามารถให้ลักษณะการสะท้อนแสงเหมือนลักษณะการสะท้อนแสงที่แสดงไว้ในภาพที่ (4.4) ซึ่งเป็นลักษณะการสะท้อนแสงที่คล้ายกับการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมในส่วนที่เสมือนการสะท้อนแสงแบบกล้า

เมื่อสร้างสมการการสะท้อนแสงในส่วนแสงพุ่งและแสงกล้าเสร็จแล้ว จึงนำสมการทั้งสองส่วนมารวมเข้าด้วยกันเพื่อเป็นสมการแบบจำลองการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม แบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ มีสมการดังต่อไปนี้

$$L(\theta_i, \theta_r) = L_d(\theta_i, \theta_r) + L_s(\theta_i, \theta_r) \quad (4.5)$$

$$L_d(\theta_i, \theta_r) = k_d \cos^{\alpha(\theta_i, \theta_r)}(\theta_r) \quad (4.6)$$

$$L_s(\theta_i, \theta_r) = k_s \cos^{\beta(\theta_i, \theta_r)}(\theta_r + (\theta_i - \theta_{off})) \quad (4.6)$$

$$k_d + k_s = 1 \quad (4.8)$$

โดย

L คือ ค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

L_d คือ ค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมในส่วนแสงพุ่ง (diffuse lobe)

L_s คือ ค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมในส่วนแสงกล้า (specular lobe)

θ_i คือ มุมตกกระทบของแหล่งกำเนิดแสง

θ_r คือ มุมสะท้อนของแสงที่สะท้อนจากผิววัตถุ

θ_{off} คือ มุมออฟสเปกคูลาร์

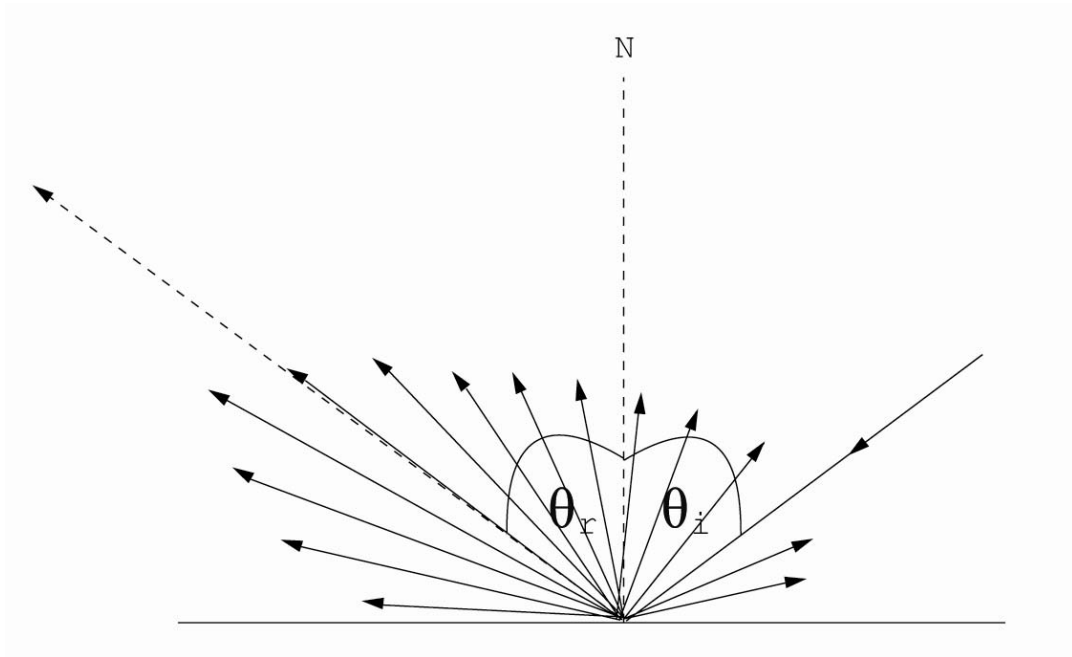
k_d คือ สัมประสิทธิ์ความเข้มแสงของผิวผ้าไหมในส่วนแสงพุ่ง

k_s คือ สัมประสิทธิ์ความเข้มแสงของผิวผ้าไหมในส่วนแสงกล้า

α คือ ฟังก์ชันควบคุมความกว้างของกรวยแสงพุ่ง

β คือ ฟังก์ชันควบคุมความกว้างของกรวยแสงกล้า

จากแบบจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่นำเสนอนี้ สามารถให้ลักษณะการสะท้อนแสงตามภาพที่ (4.5) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม

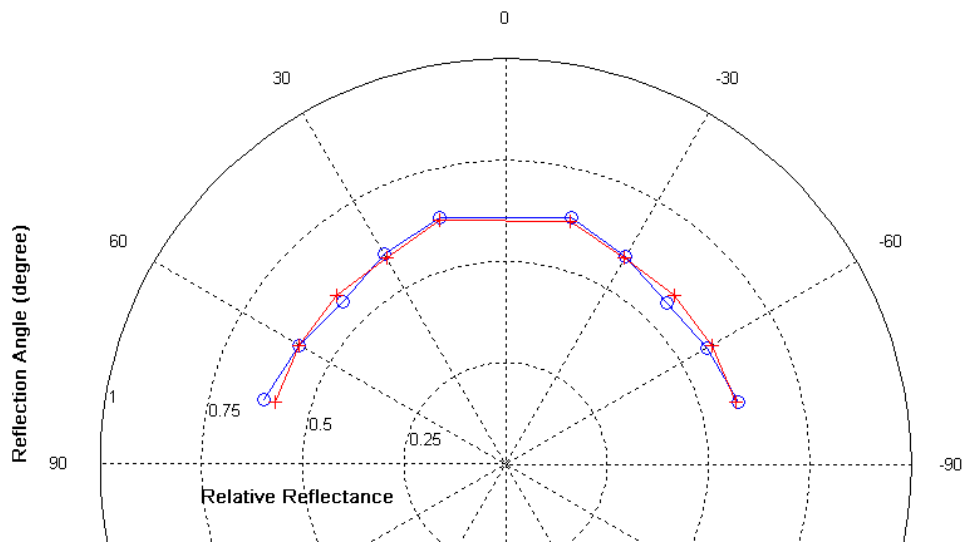


ภาพที่ 4.5 ลักษณะการสะท้อนแสงที่สามารถคำนวณจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ

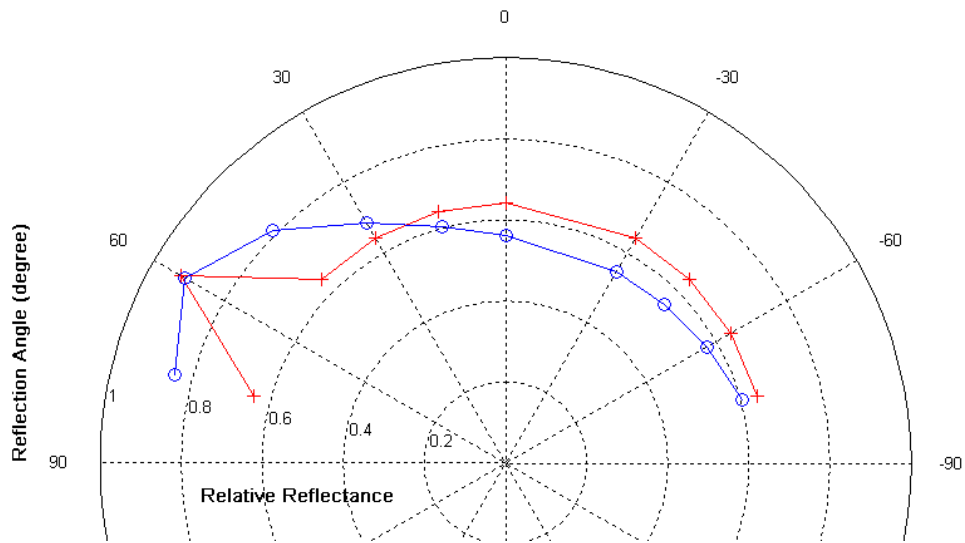
4.4. อภิปรายและวิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 2 : แบบจำลองการสะท้อนแสง

4.4.1. ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ

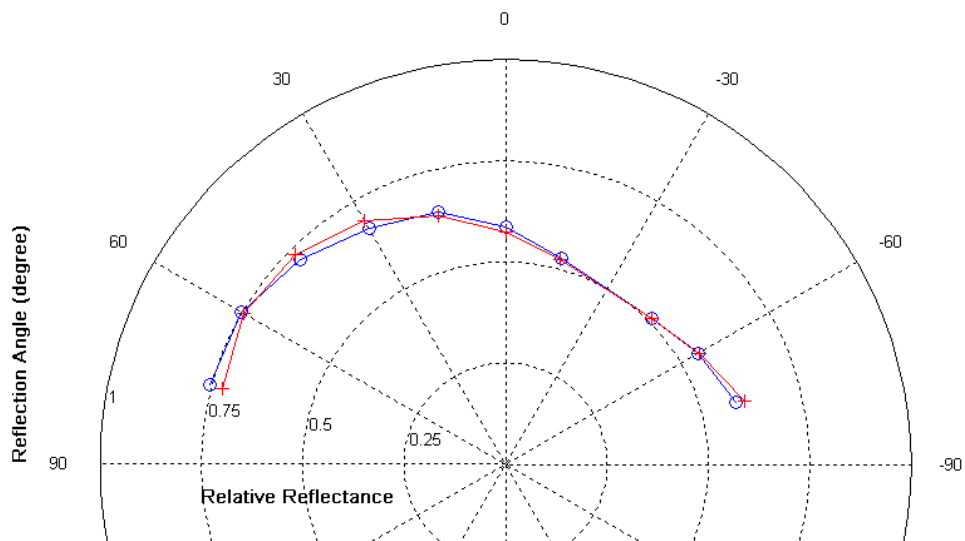
ผลการทดลองตอนที่ 2 เป็นค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณมาจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ เมื่อนำค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม จะมีกราฟดังนี้



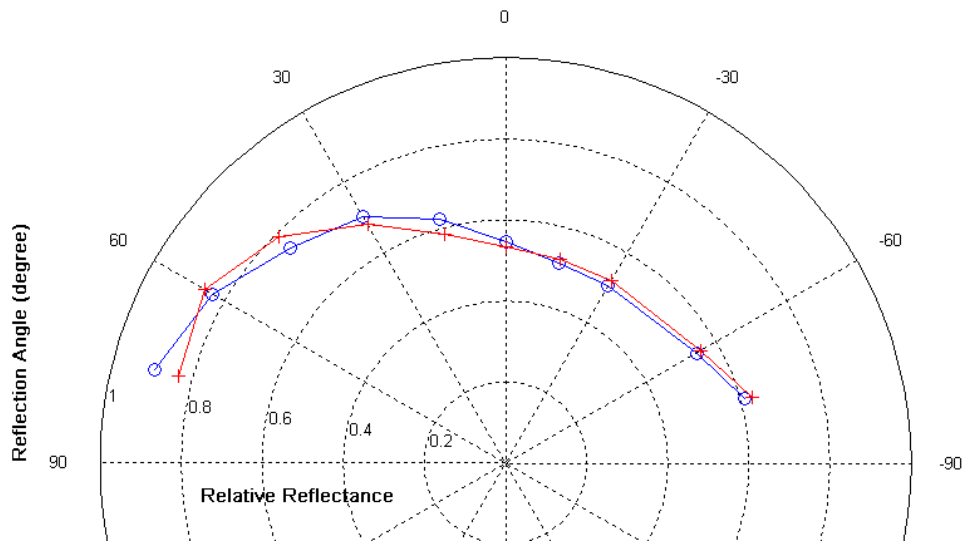
กราฟที่ 4.8 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม 0 องศา



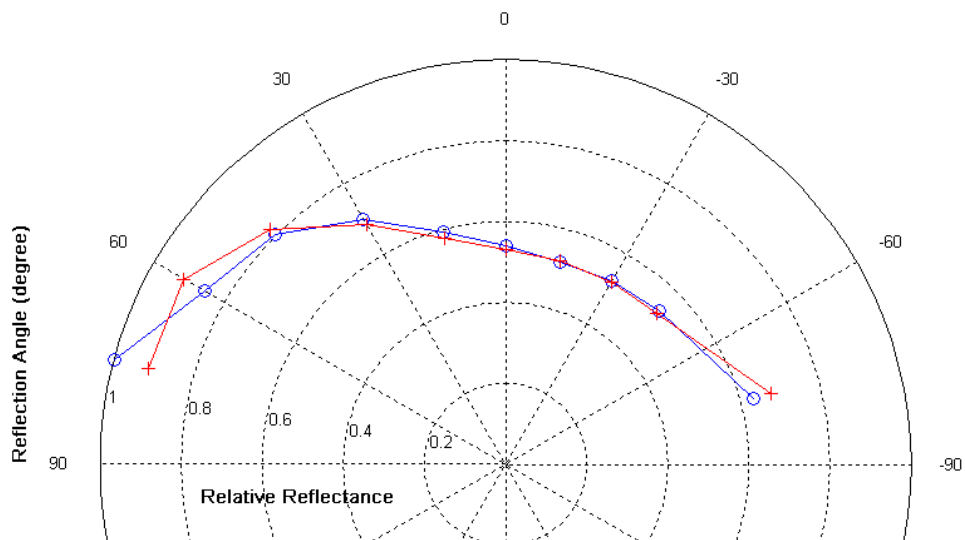
กราฟที่ 4.9 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -15 องศา



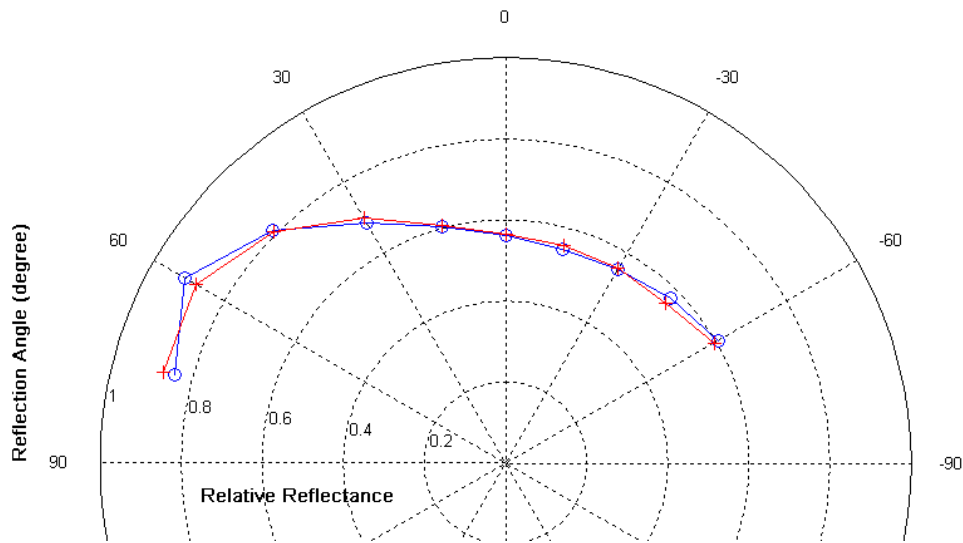
กราฟที่ 4.10 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -30 องศา



กราฟที่ 4.11 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -45 องศา

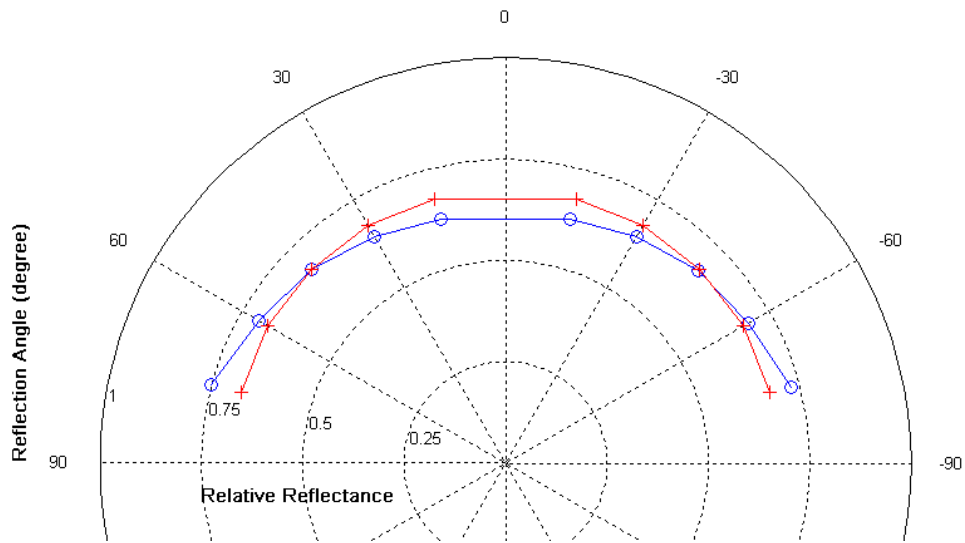


กราฟที่ 4.12 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -60 องศา

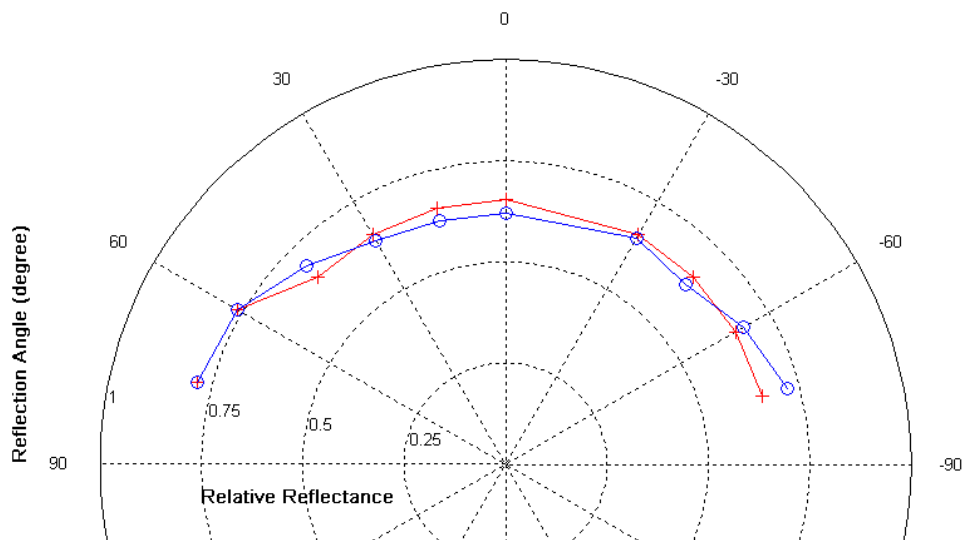


กราฟที่ 4.13 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -75 องศา

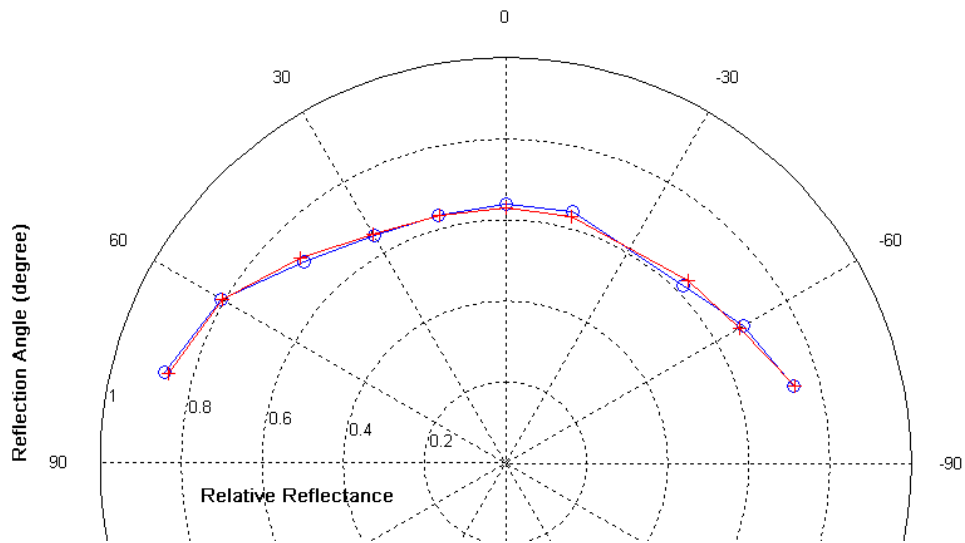
กราฟที่ (4.8) – (4.13) เป็นเส้นโค้งที่เปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลอง เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม 0 , -15 , -30 , -45 , -60 , และ -75 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่นำเสนอมีลักษณะการกระจายที่ใกล้เคียงกับลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม แต่กราฟที่ (4.9) มีลักษณะของเส้นโค้งที่มีความผิดแปลกจากกราฟอื่น ๆ ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดจากการวัดค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหม หรือแบบจำลองที่นำเสนอนี้ไม่สามารถจำลองลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -15 องศา



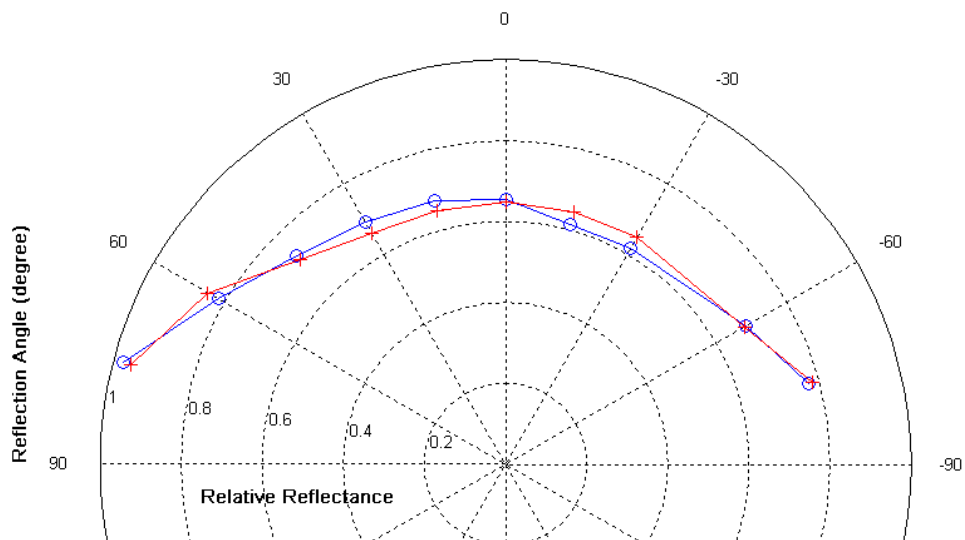
กราฟที่ 4.14 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม 0 องศา



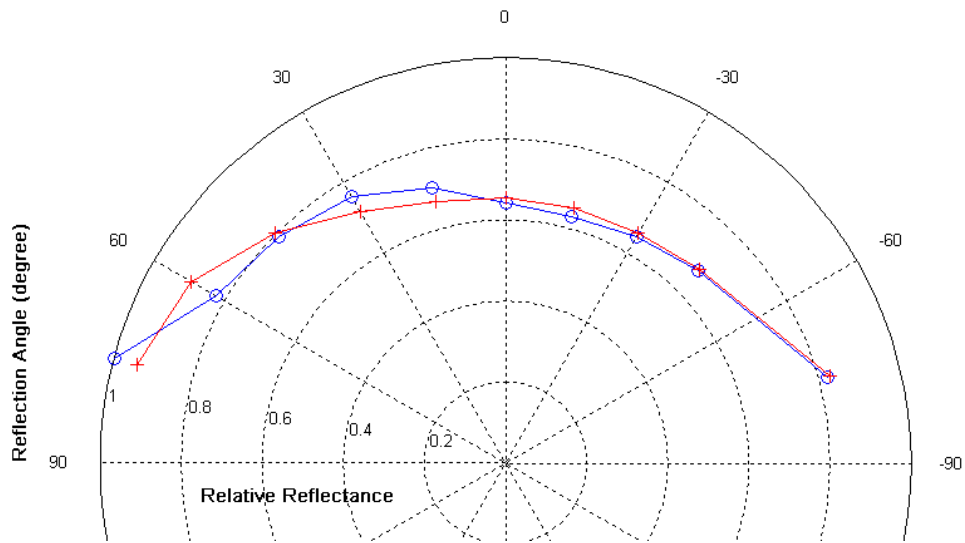
กราฟที่ 4.15 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -15 องศา



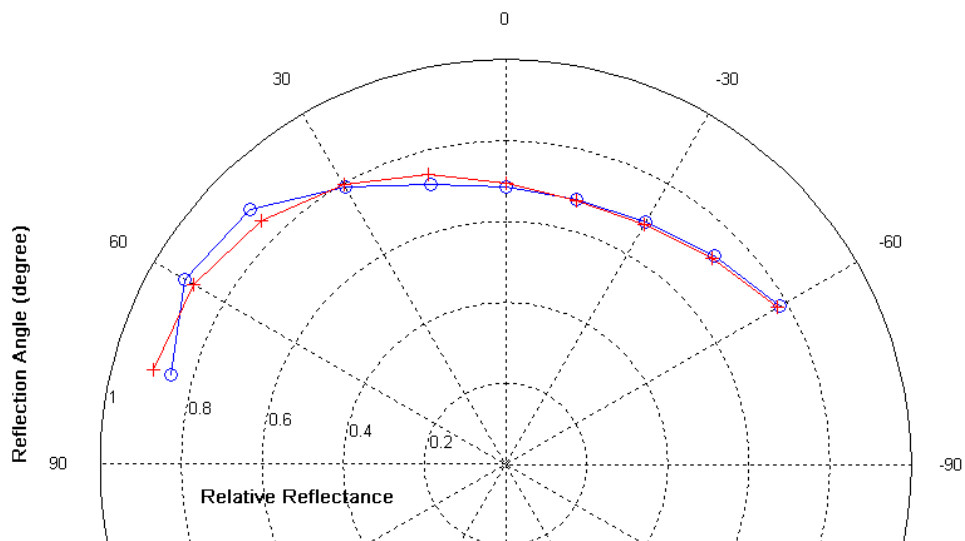
กราฟที่ 4.16 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -30 องศา



กราฟที่ 4.17 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -45 องศา

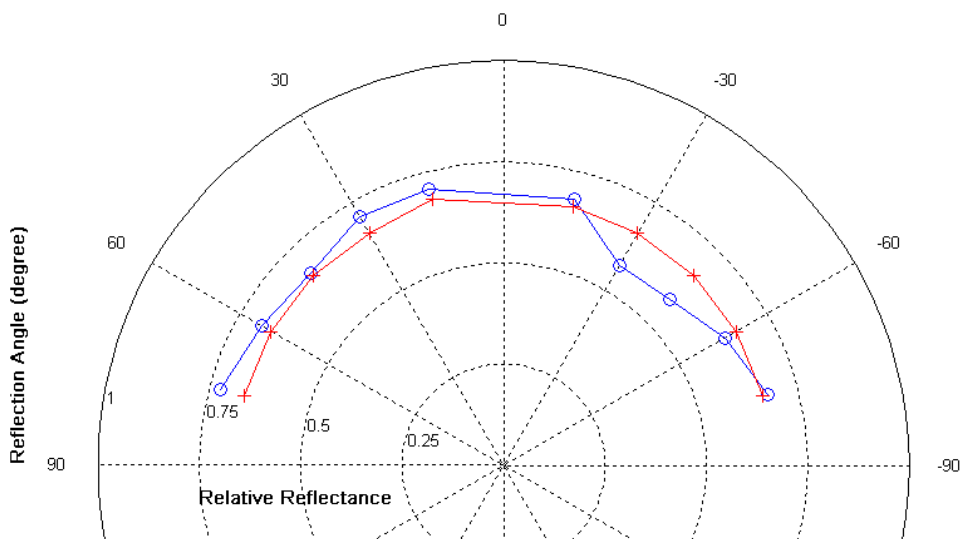


กราฟที่ 4. 18 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -60 องศา

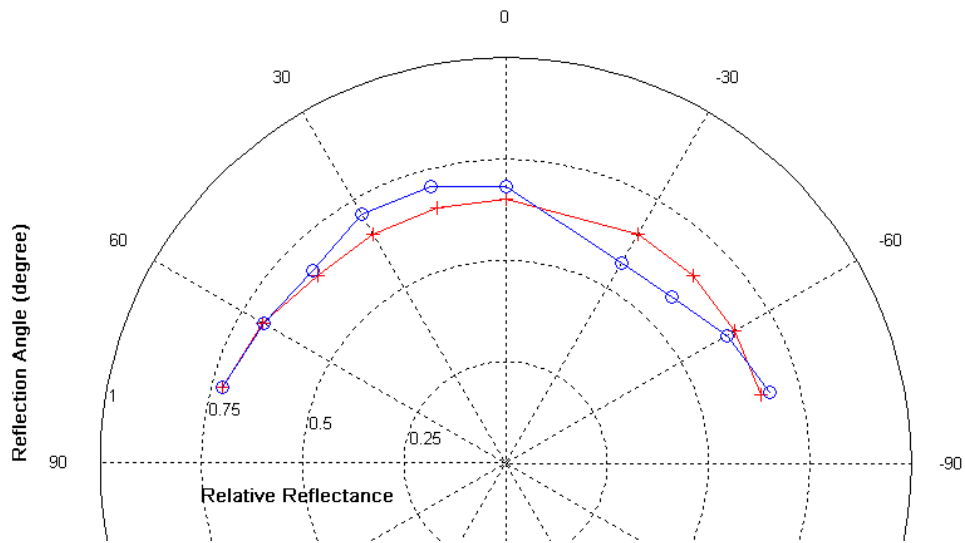


กราฟที่ 4.19 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -60 องศา

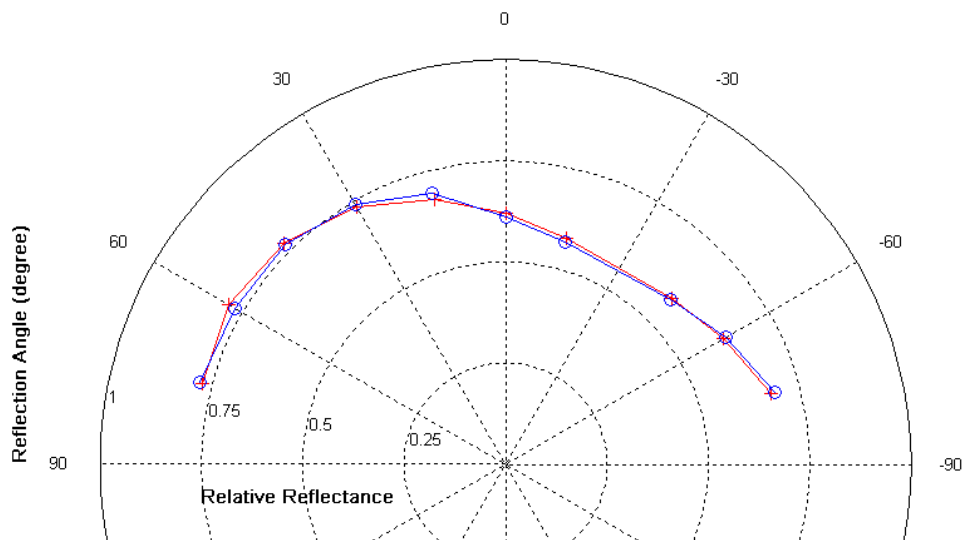
กราฟที่ (4.14) – (4.19) เป็นเส้นโค้งที่เปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหม ตัวอย่างที่ 2 กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลอง เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม 0, -15, -30, -45, -60, และ -75 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่นำเสนอมีลักษณะการกระจายที่ใกล้เคียงกับลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม และเมื่อพิจารณากราฟค่าการสะท้อนแสงที่แสงตกกระทบทำมุม -15 องศา ได้แก่ กราฟที่ (4.15) จะเห็นว่า ลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองและการวัดไปในทิศทางเดียวกันและมีความใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจาก กราฟที่ (4.9)



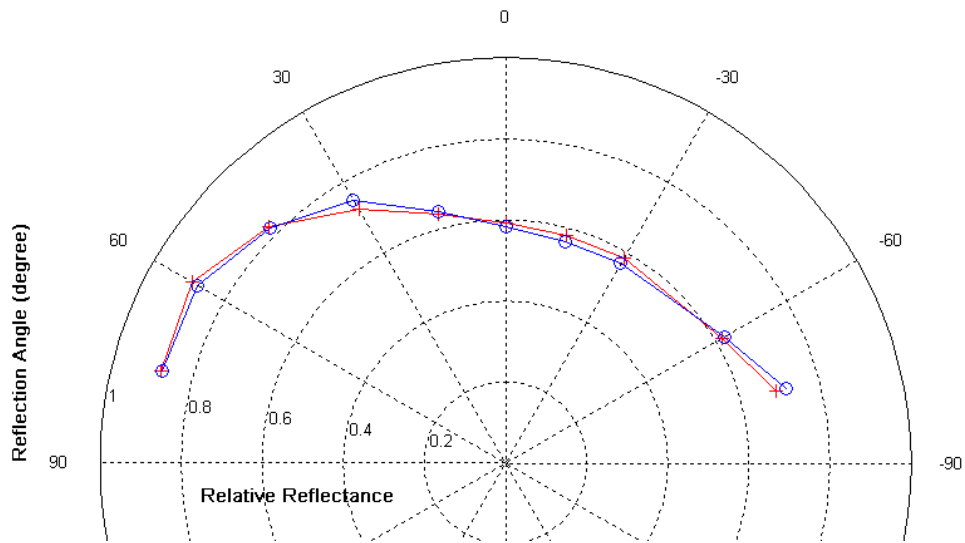
กราฟที่ 4.20 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม 0 องศา



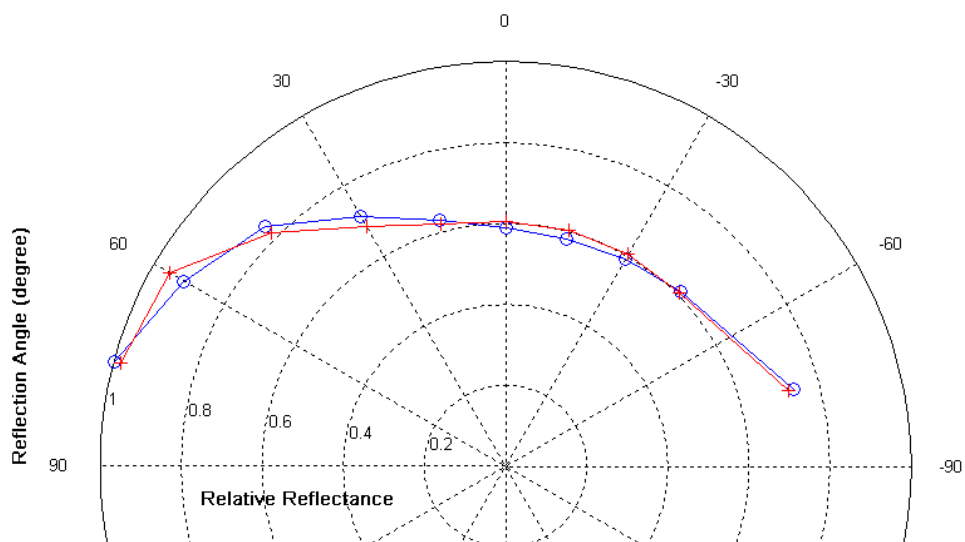
กราฟที่ 4.21 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -15 องศา



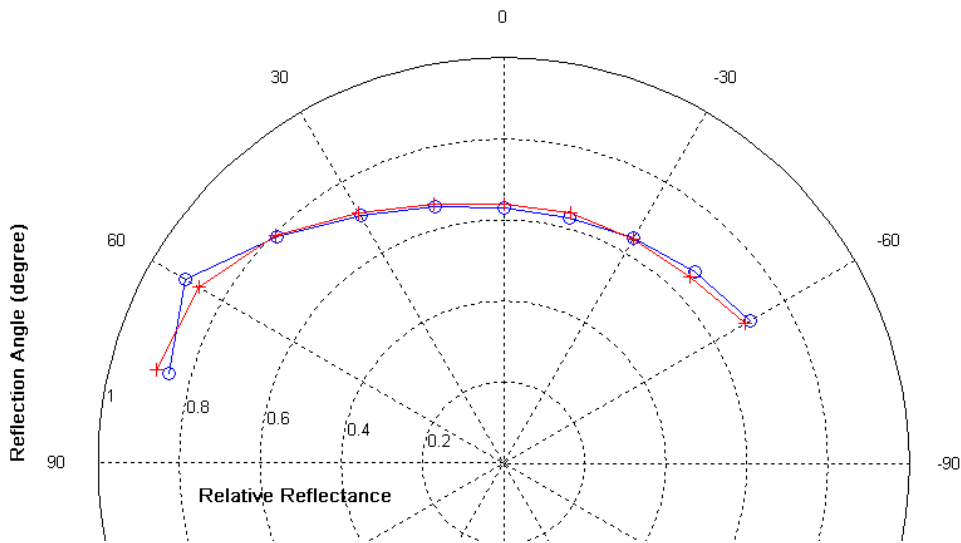
กราฟที่ 4.22 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -30 องศา



กราฟที่ 4.23 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -45 องศา



กราฟที่ 4.24 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -60 องศา



กราฟที่ 4.25 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 (o) กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม -75 องศา

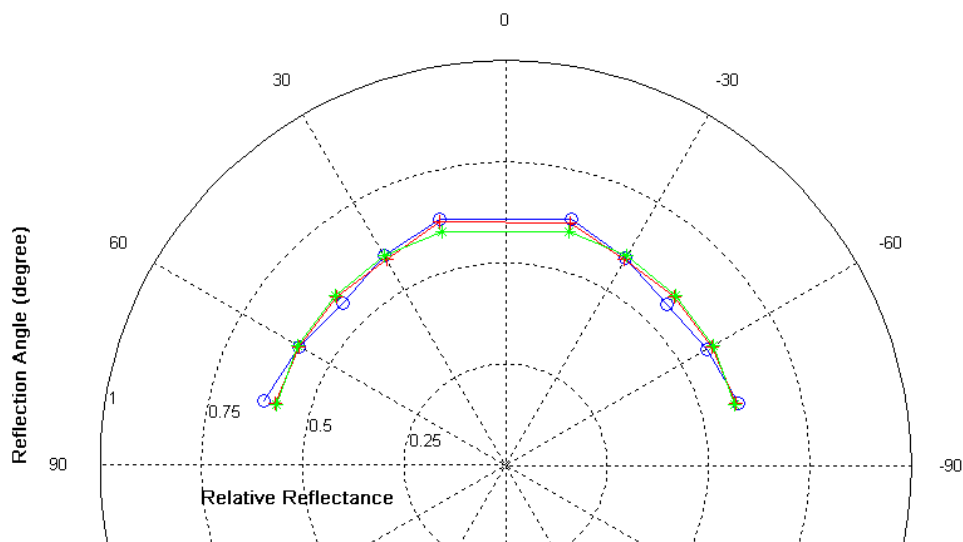
กราฟที่ (4.20) – (4.25) เป็นเส้นโค้งที่เปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 กับค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลอง เมื่อใช้แสงตกกระทบที่มุม 0, -15, -30, -45, -60, และ -75 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่นำเสนอมีลักษณะการกระจายที่ใกล้เคียงกับลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผ้าไหม แต่จากกราฟที่ (4.20) และ (4.21) ซึ่งใช้แสงตกกระทบที่มุม 0 และ -15 องศา ลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้ มีแนวโน้มเดียวกับค่าที่วัดจากผ้าไหมแต่ก็ยังไม่ให้ลักษณะการกระจายตัวที่ยังไม่ค่อยดี

กราฟผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองการสะท้อนแสงที่เสนอนี้สามารถให้ค่าการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม แต่ถ้าใช้แสงตกกระทบที่มุม 0 และ -15 องศา แบบจำลองยังให้ค่าการสะท้อนแสงที่ไม่ค่อยดีนัก แต่ยังคงเป็นแนวโน้มเดียวกันกับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมอยู่ ดังนั้น ในอนาคตควรปรับปรุงแบบจำลองให้สามารถคำนวณค่าการสะท้อนแสงในส่วนนี้ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

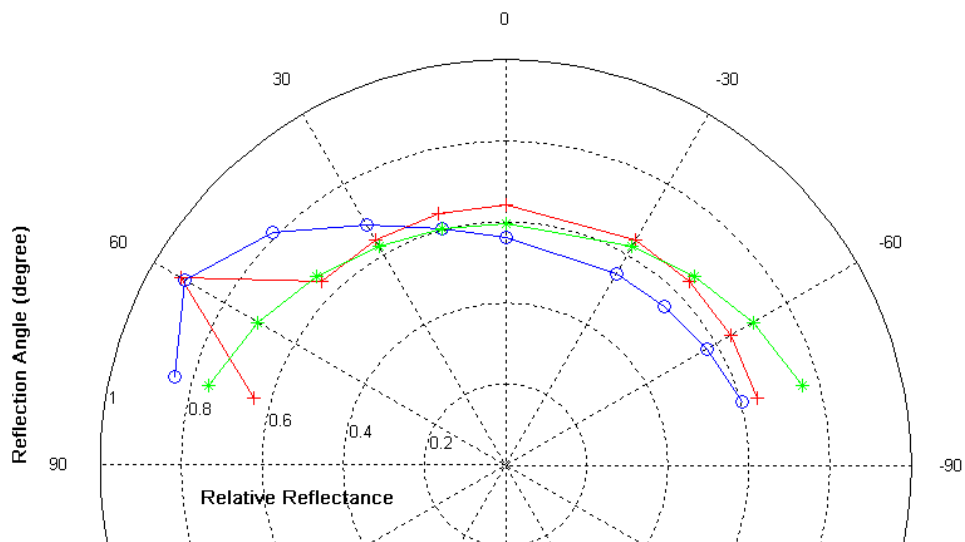
4.4.2. เปรียบเทียบแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่น

การวิเคราะห์ผลและอภิปรายผลในตอนนี้เป็นารเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ ค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณได้จากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่มีอยู่ทั่วไป และค่าการสะท้อนแสงที่วัดได้จากผิวน้ำใหม่ เพื่อดูว่าแบบจำลองใดให้ลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงใกล้เคียงกับลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวน้ำใหม่มากที่สุด

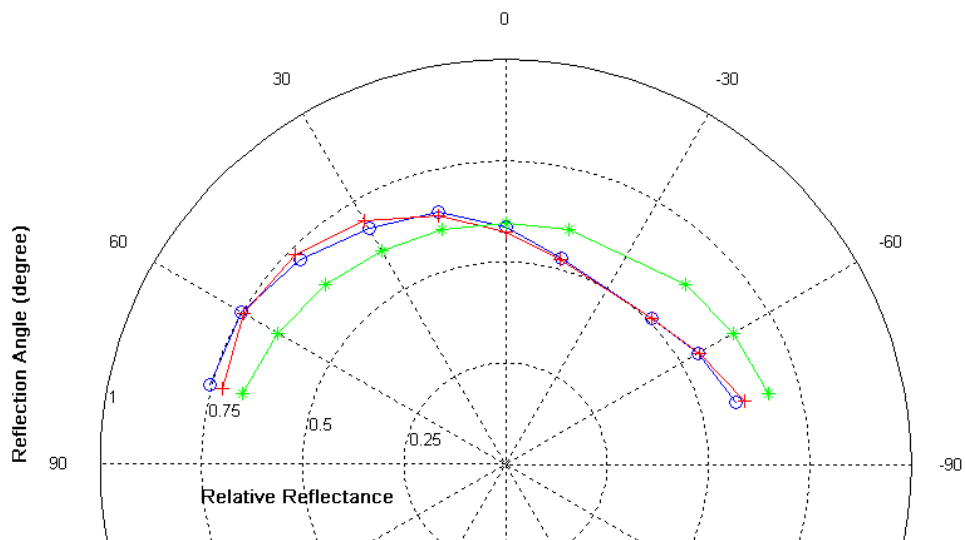
แบบจำลองที่ผู้วิจัยเลือกมาเปรียบเทียบนั้น ผู้วิจัยได้ศึกษาแล้วว่า เป็นแบบจำลองที่มีโอกาสที่จะให้ค่าการสะท้อนแสงออกมาใกล้เคียงกับค่าการสะท้อนแสงของผิวน้ำใหม่ แบบจำลองเหล่านี้ได้แก่ แบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง แบบจำลองการสะท้อนแสงของโอเรนและนaylor แบบจำลองการสะท้อนแสงของวาร์ด และแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ ซึ่งมีกราฟเปรียบเทียบดังต่อไปนี้



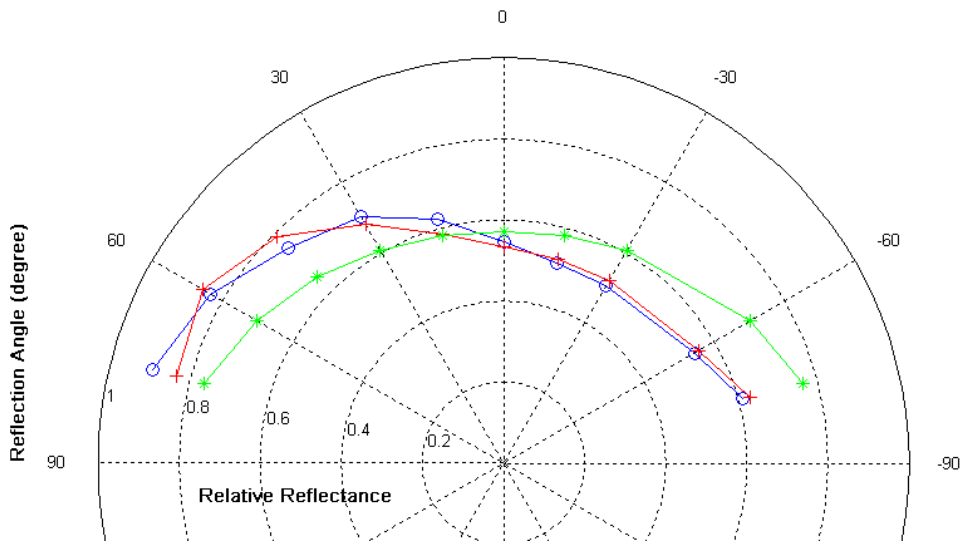
กราฟที่ 4 26 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผิวน้ำใหม่ (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง reflectance model (*) ของผิวน้ำใหม่ตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



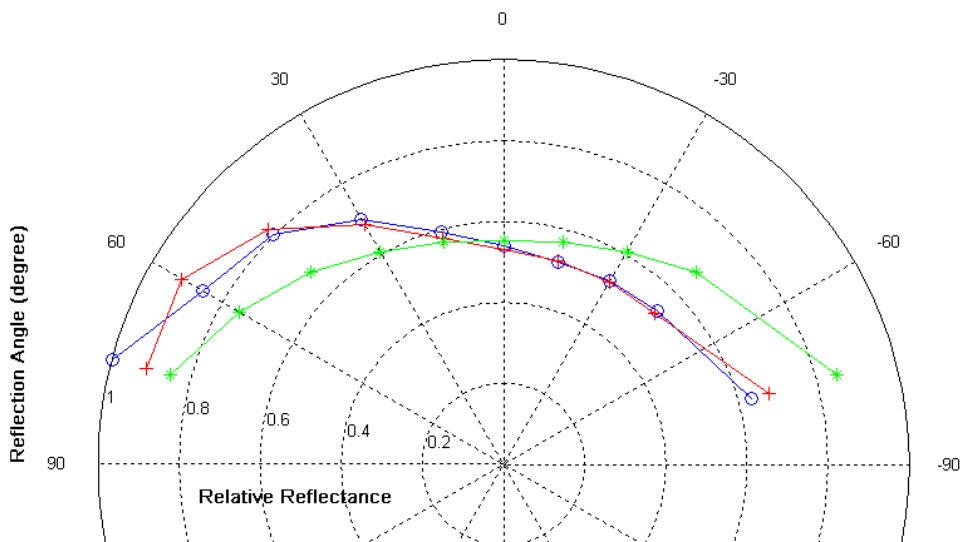
กราฟที่ 4.27 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



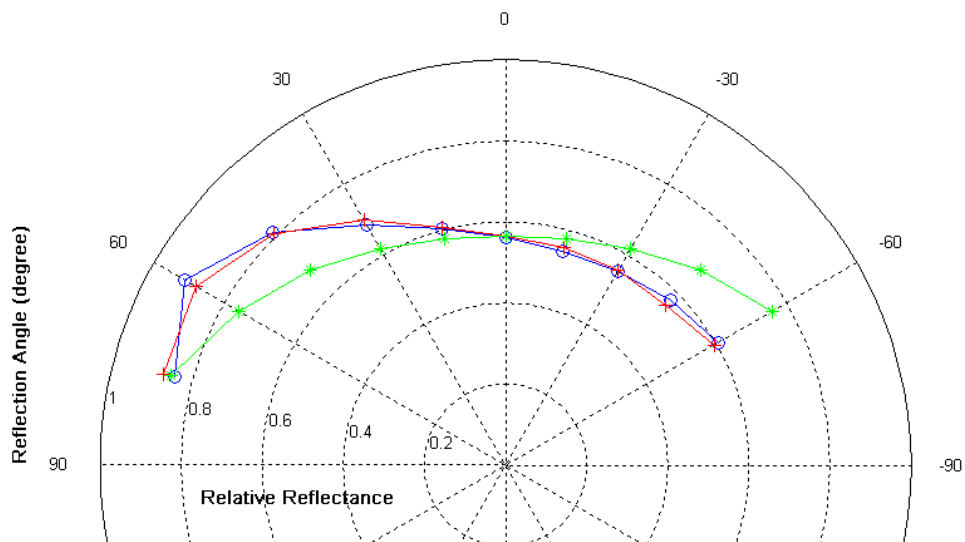
กราฟที่ 4.28 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



กราฟที่ 4.29 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา

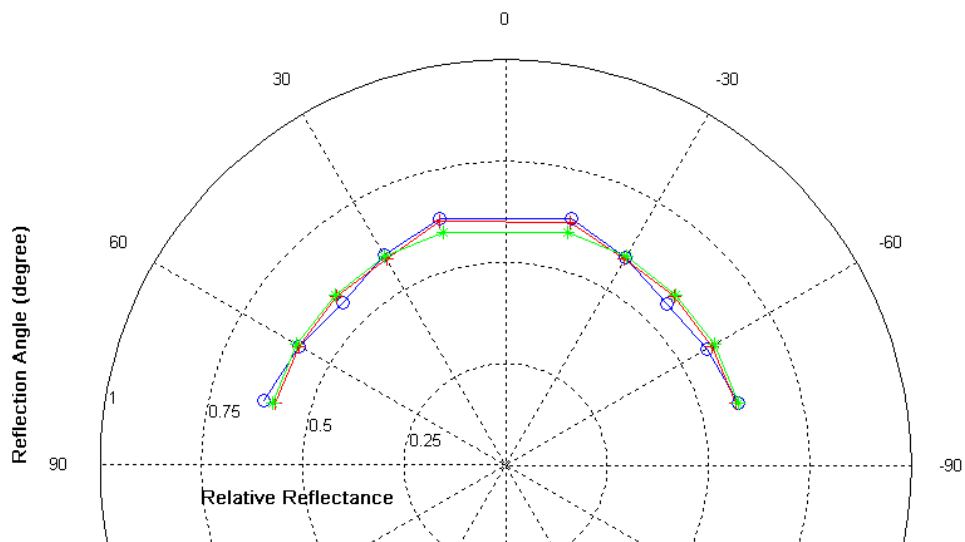


กราฟที่ 4.30 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา

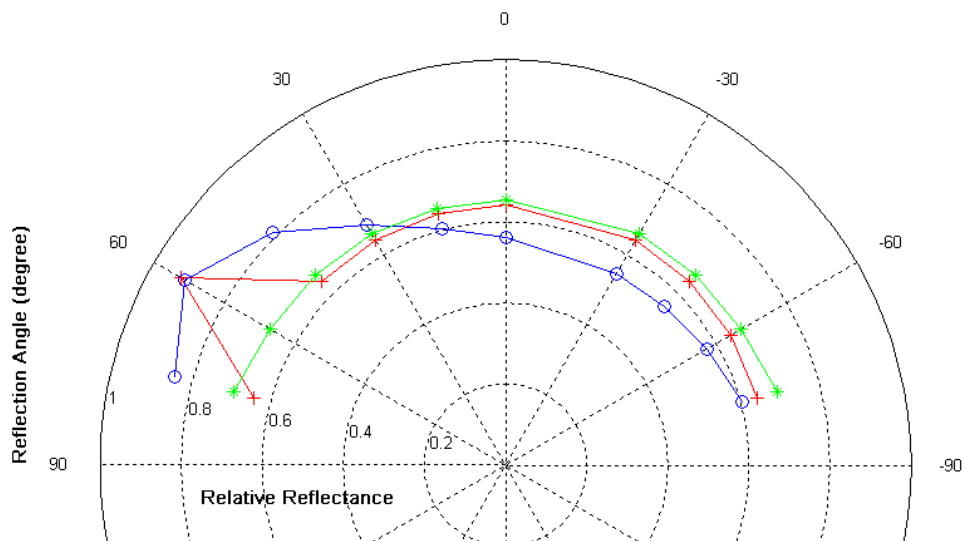


กราฟที่ 4.31 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา

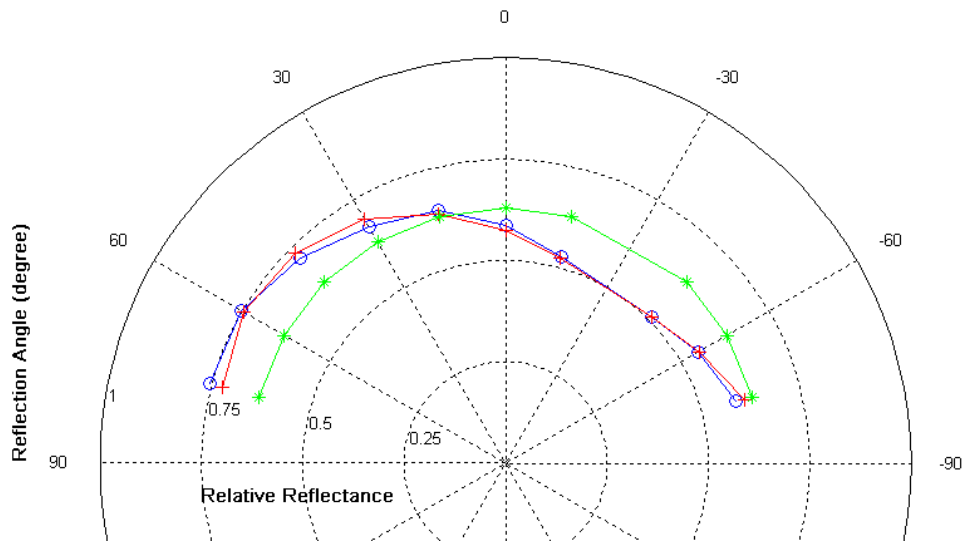
จากกราฟที่ (4.26) – (4.31) แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอให้ค่าการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมได้ดีกว่าค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของฟอง



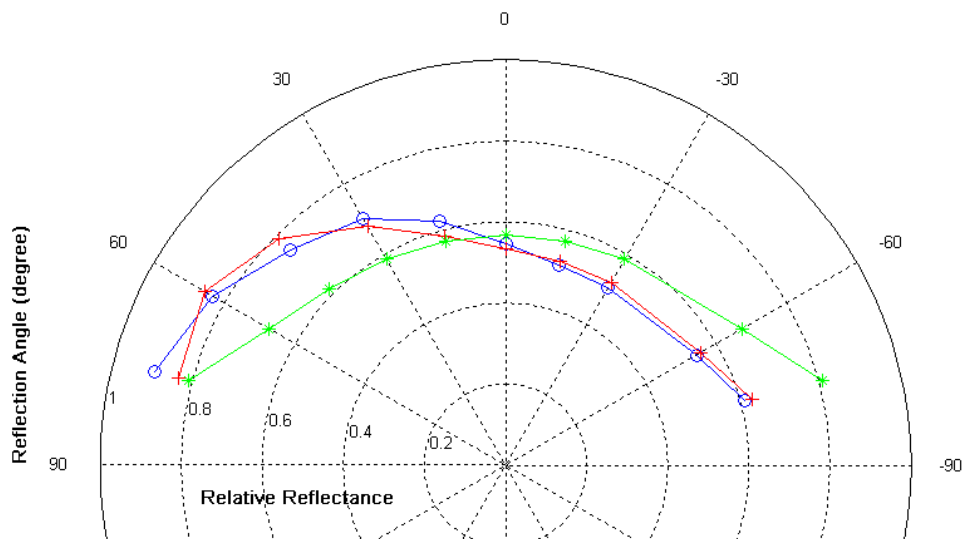
กราฟที่ 4.32 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของวาร์ด (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



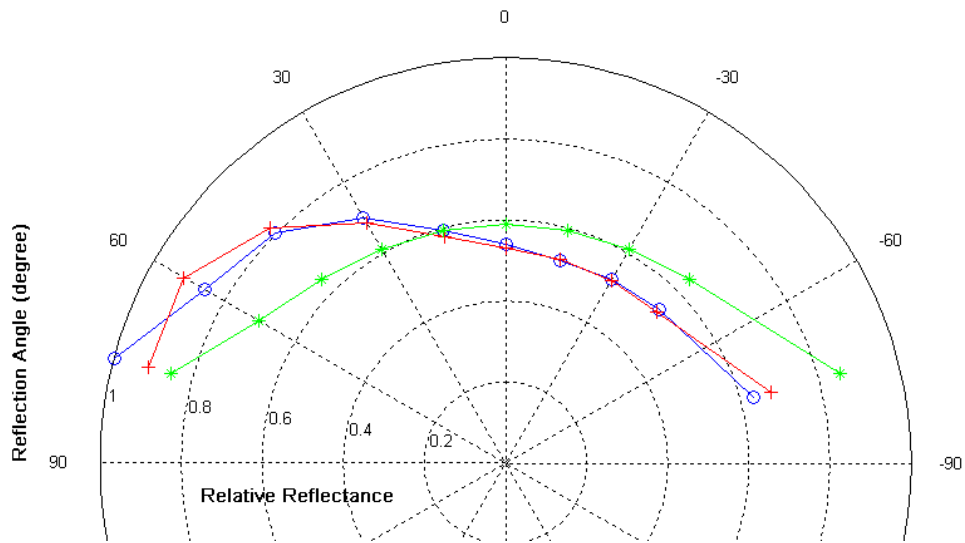
กราฟที่ 4.33 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของวาร์ด (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



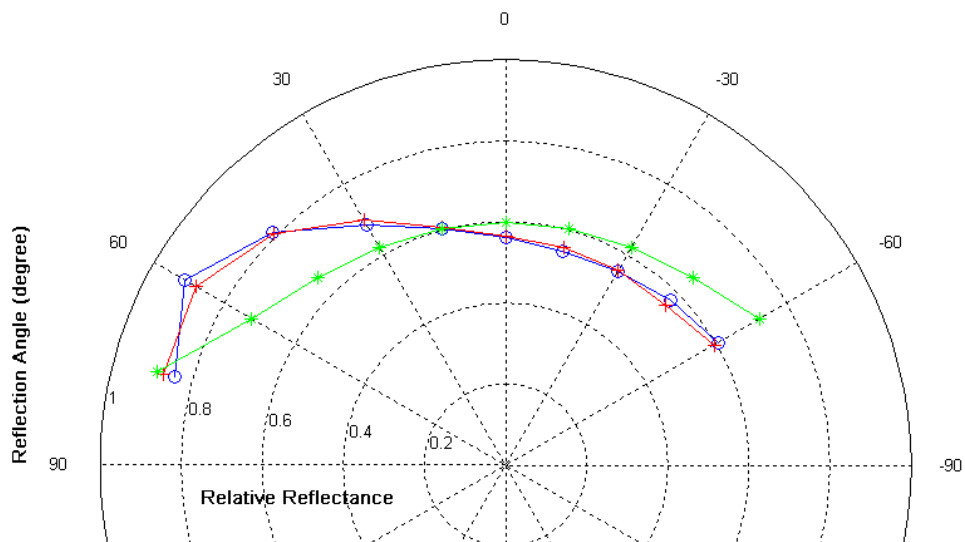
กราฟที่ 4. 34 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของวาร์ด (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



กราฟที่ 4. 35 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของวาร์ด (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา

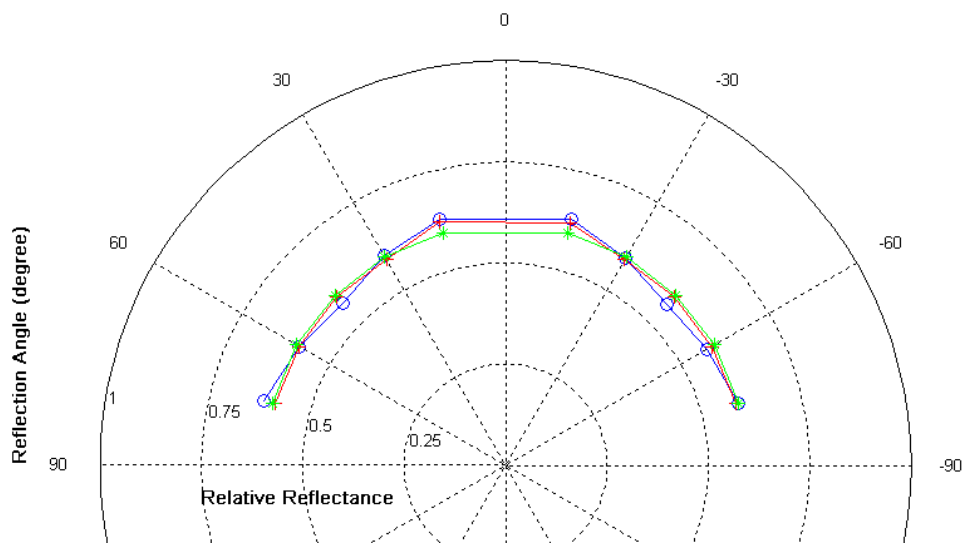


กราฟที่ 4.36 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของวาร์ด (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา

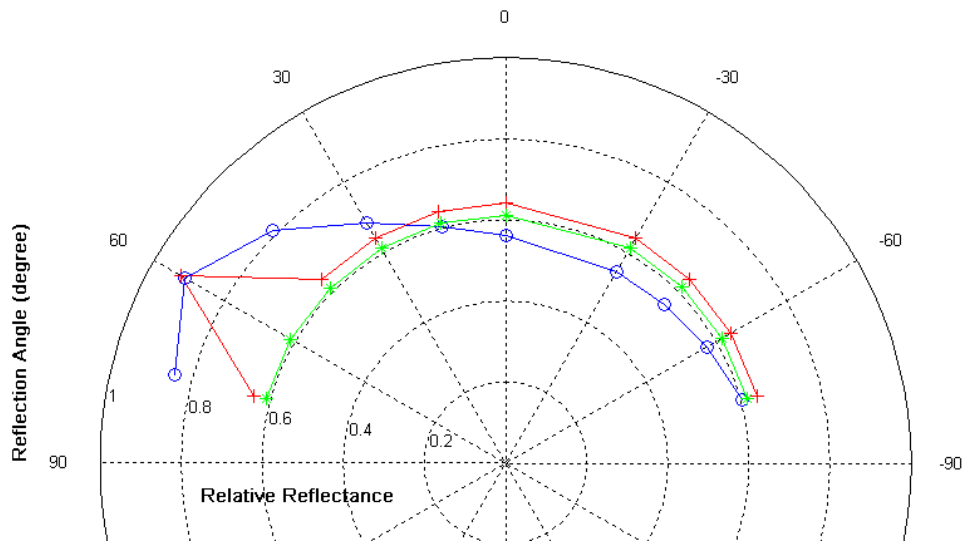


กราฟที่ 4.37 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของวาร์ด (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา

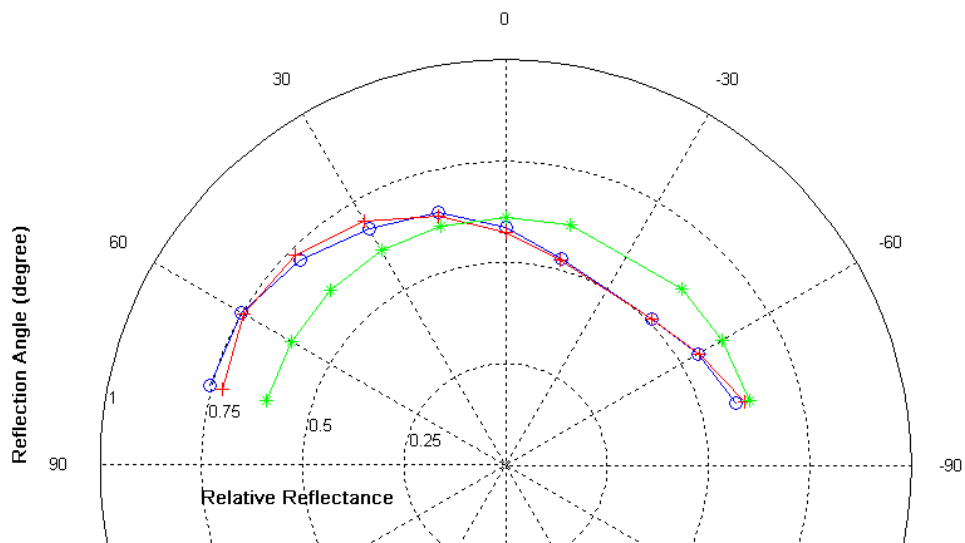
กราฟที่ (4.32) – (4.37) แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอนำให้ค่าการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าใหม่ได้ดีกว่าค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของวาร์ด



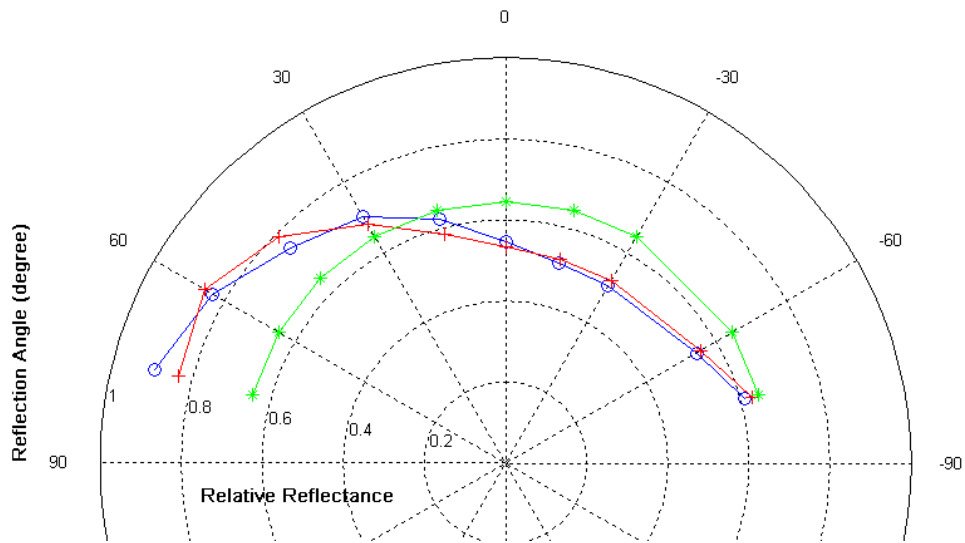
กราฟที่ 4 38 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าใหม่ (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอน (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของไอเรนและนaylor (*) ของผ้าใหม่ตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



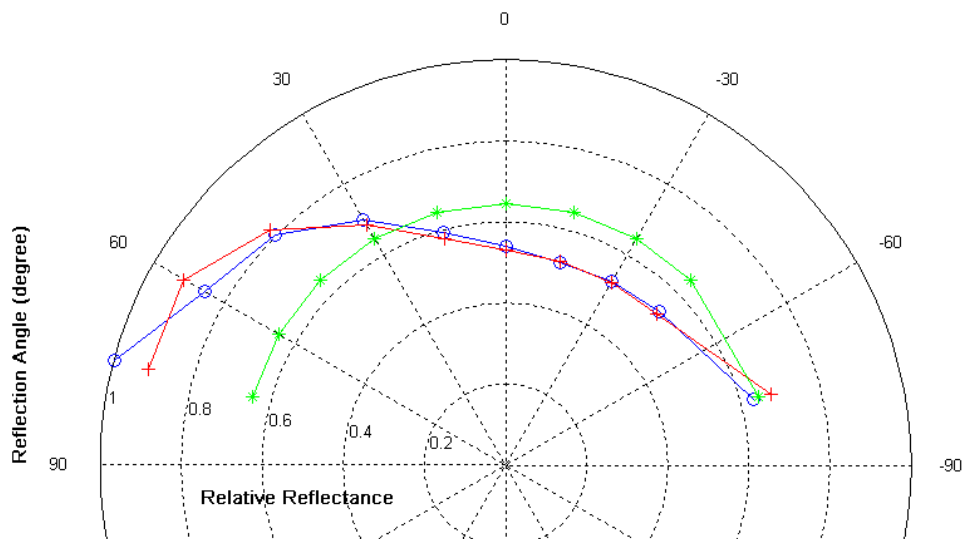
กราฟที่ 4.39 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของไอเรนและนายาร์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



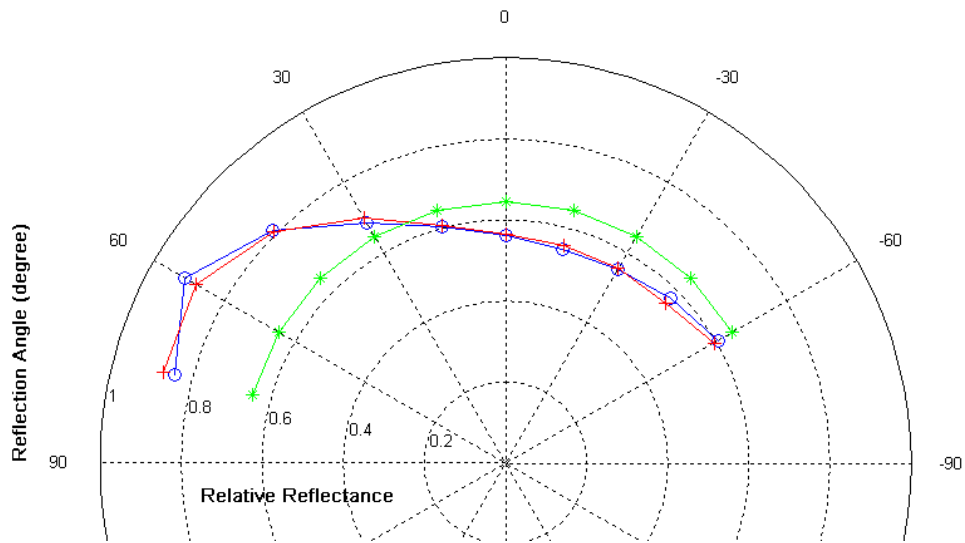
กราฟที่ 4.40 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของไอเรนและนายาร์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



กราฟที่ 4.41 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของโอเรนและนaylor (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา

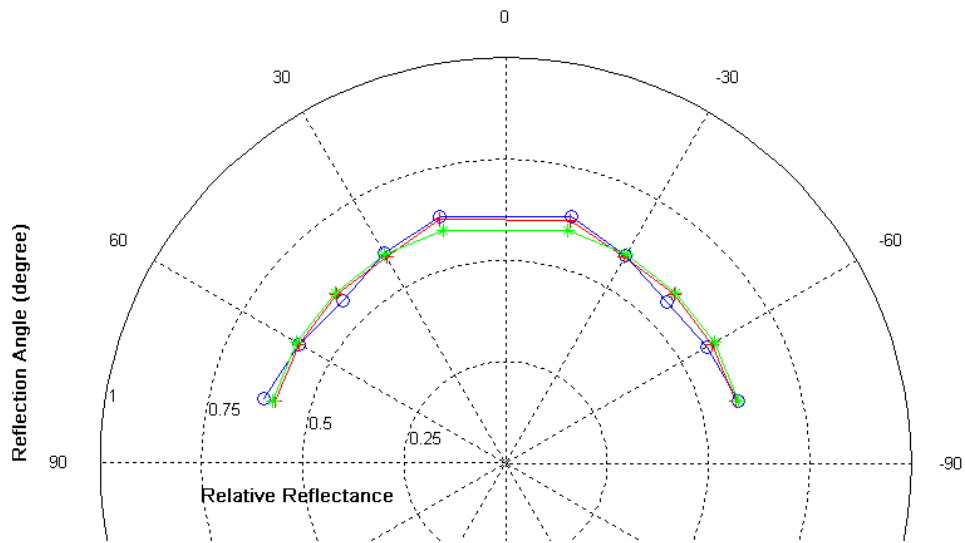


กราฟที่ 4.42 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของโอเรนและนaylor (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา

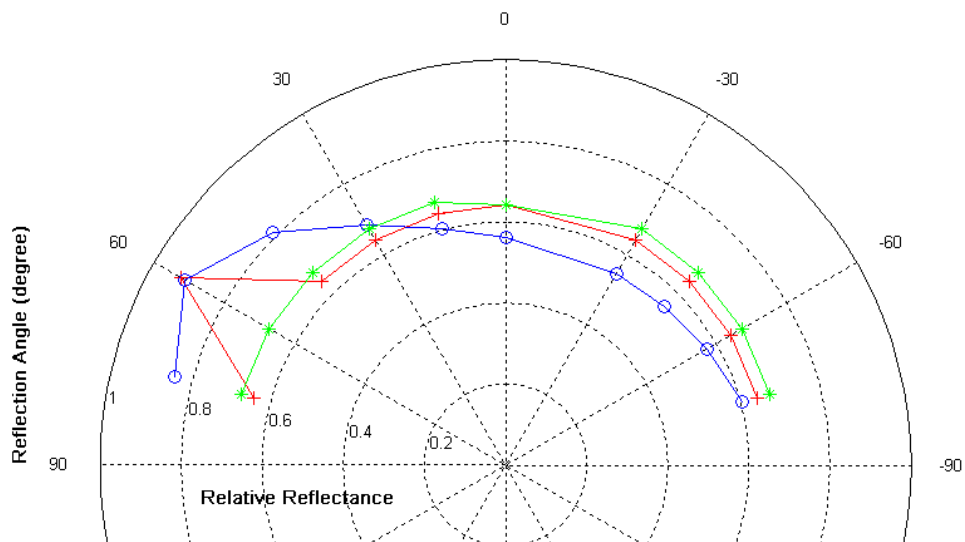


กราฟที่ 4.43 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของไอเรนและนิกเกิล (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา

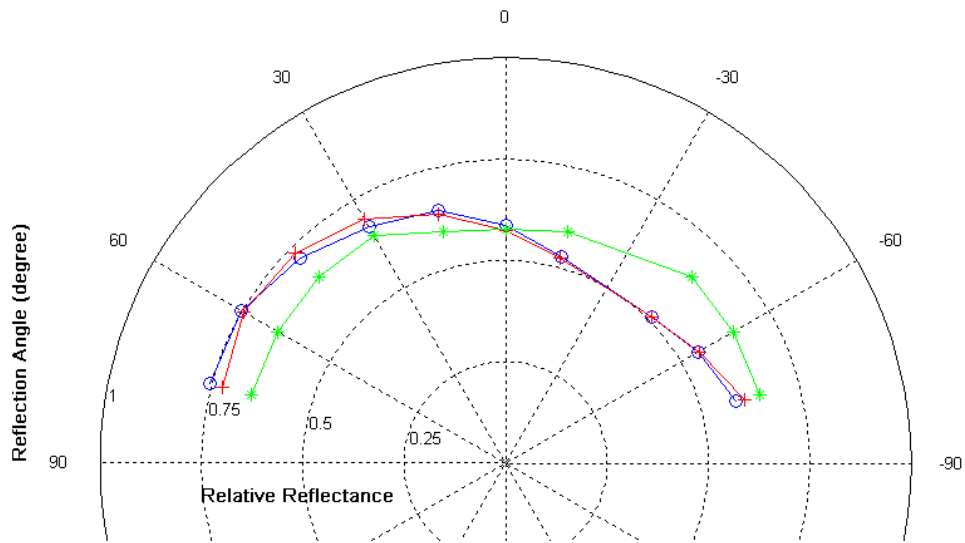
กราฟที่ (4.38) – (4.43) แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอให้ค่าการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมได้ดีกว่าค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของไอเรนและนิกเกิล



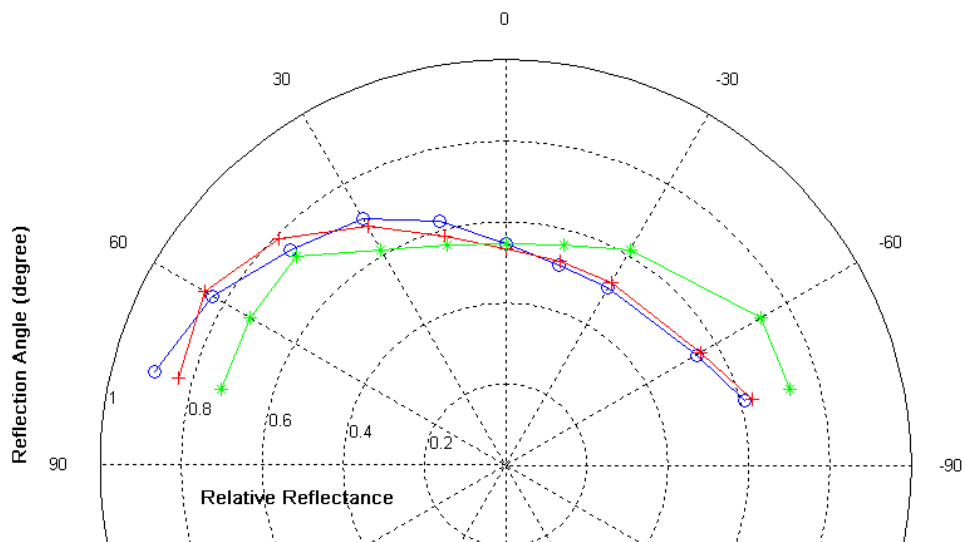
กราฟที่ 4.44 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



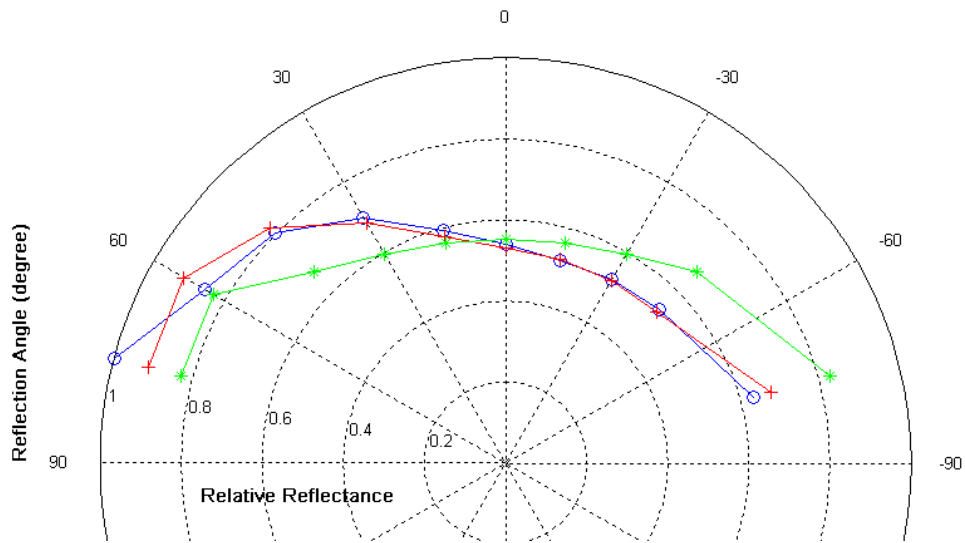
กราฟที่ 4.45 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



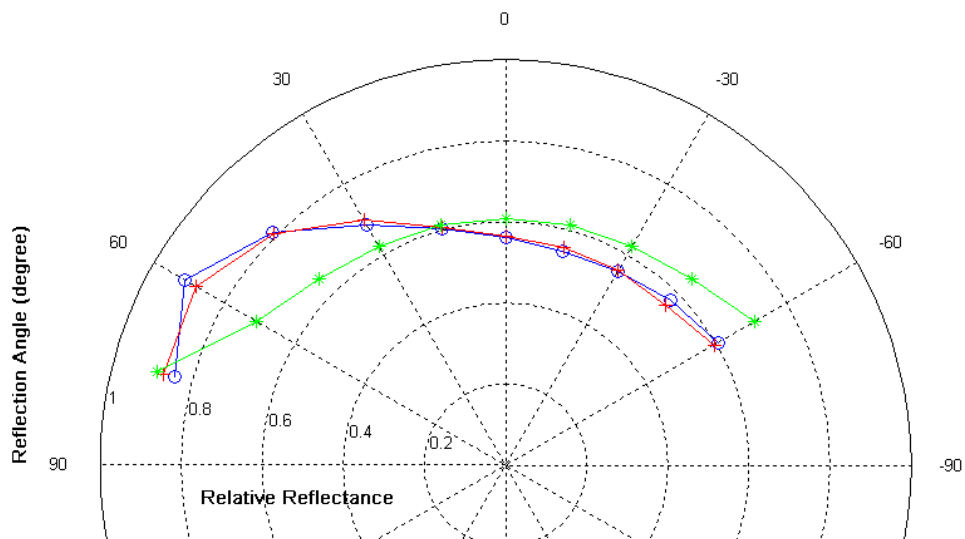
กราฟที่ 4.46 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



กราฟที่ 4.47 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



กราฟที่ 4.48 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมุมตกกระทบ -60 องศา



กราฟที่ 4.49 เส้นโค้งเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของแอซิกมินและเซอร์ลีย์ (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมุมตกกระทบ -75 องศา

กราฟที่ (4.38) – (4.43) แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอให้ค่าการสะท้อนแสงที่มีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมได้ดีกว่าค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงของของแอสซิมเมตริกและเซอร์ลีย์

การเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอกับแบบจำลองการสะท้อนแสงอื่นทั่วไป เห็นว่า แบบจำลองที่นำเสนอมีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงจากผิวผ้าไหมได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น สามารถดูค่าความผิดพลาดของค่าการสะท้อนแสงที่คำนวณจากแต่ละแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสะท้อนแสงจากผิวผ้าไหมได้คำนวณได้ และแสดงในตารางที่ (4.1)

ตารางที่ (4.1) แสดงให้เห็นค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอมีความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับค่าความผิดพลาดจากแบบจำลองอื่น ตัวอย่างเช่น ผ้าไหม ตัวอย่างที่ 3 ใช้มุมของแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบ -60 องศา มีค่าความผิดพลาดของแบบจำลองที่นำเสนออยู่ที่ 0.0214 แบบจำลองของฟองมีค่าอยู่ที่ 0.01918 แบบจำลองของโกลเดน-นaylor 0.1610 แบบจำลองของวอร์ด อยู่ที่ 0.1036 และแบบจำลองของแอสซิมเมตริก อยู่ที่ 0.0843 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอสามารถทำนายค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมได้แม่นยำกว่าแบบจำลองการสะท้อนแสงอื่น

สุดท้ายนี้สามารถดูกราฟผลการทดลองตอนที่ 2 ของแบบจำลองต่าง ๆ เพิ่มเติมได้ที่ ภาคผนวก ก. และสามารถดูค่าคงที่ของแบบจำลองการสะท้อนแสงต่าง ๆ ได้จากตารางบันทึกผลใน ภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดจากค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย

ตัวอย่างที่	θ_i องศา	ค่าความผิดพลาดของแบบจำลองการสะท้อนแสง				
		แบบจำลอง ที่นำเสนอ	Phong	Ward	Oren – Nayar	Ashikhmin – Shirley
1	0	0.0153	0.0223	0.0229	0.0229	0.0228
	-15	0.1012	0.1167	0.1253	0.1424	0.1274
	-30	0.0168	0.0824	0.0868	0.0906	0.0822
	-45	0.0296	0.1100	0.1163	0.1314	0.1067
	-60	0.0380	0.1161	0.1243	0.1594	0.1112
	-75	0.0154	0.0927	0.0979	0.1319	0.1008
2	0	0.0409	0.0073	0.0283	0.0409	0.0405
	-15	0.0307	0.0296	0.0415	0.0876	0.0540
	-30	0.0100	0.0487	0.0609	0.1165	0.0694
	-45	0.0235	0.0615	0.0643	0.1294	0.0765
	-60	0.0355	0.0577	0.0656	0.1504	0.0622
	-75	0.0217	0.0566	0.0658	0.1516	0.0835
3	0	0.0483	0.0058	0.0480	0.0499	0.0494
	-15	0.0444	0.0490	0.0480	0.0713	0.0503
	-30	0.0109	0.0707	0.0728	0.1057	0.0685
	-45	0.0148	0.0912	0.1044	0.1303	0.0831
	-60	0.0214	0.0918	0.1036	0.1610	0.0843
	-75	0.0188	0.0556	0.0658	0.1183	0.0949

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

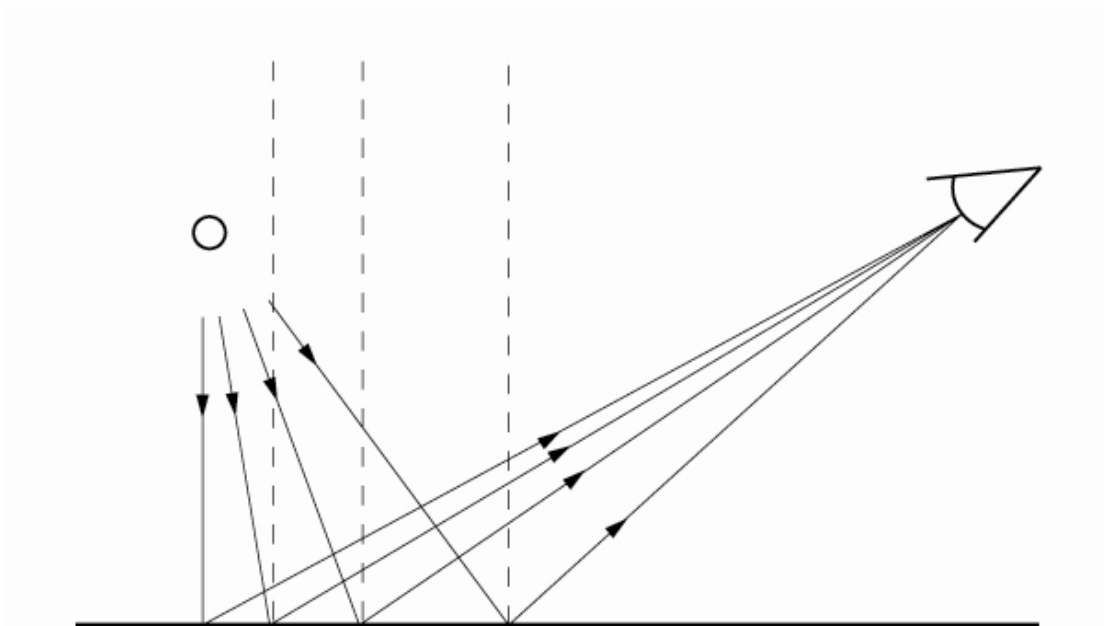
5.1. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาลักษณะการสะท้อนแสงและการสังเกตของผิวผ้าไหมแสดงให้เห็นว่า ผ้าไหมมีการสะท้อนแสงที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว กล่าวคือ เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าเห็นว่า ผ้าไหมมีความมันวาวและมีความเหลือมของแสงที่สะท้อนออกมา ซึ่งแตกต่างจากสิ่งทอจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น จากลักษณะของเส้นใยไหมมีลักษณะรูปร่างคล้ายรูปทรงปริซึมสามเหลี่ยม สันับสนุนการวิเคราะห์ผลการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งศึกษาลักษณะการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าผ้าไหม ได้ว่า เส้นใยไหมมีสมบัติเชิงแสงที่แตกต่างไปจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น ๆ ที่นำมาทำสิ่งทอ จึงมีลักษณะการสะท้อนแสงที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว การที่เส้นใยไหมมีรูปทรงเป็นปริซึมนั้น ทำให้ลักษณะการสะท้อนแสงคล้ายกับการสะท้อนแสงของปริซึม คือ ปริซึม สามารถหักเหแสงให้ส่องผ่านไปรวมที่หน้าตัดด้านเดียว ทำให้หน้าตัดของปริซึมด้านนั้นมีแสงส่องผ่านออกมามากกว่าด้านอื่น จึงทำให้หน้าตัดด้านนี้มีความสว่างมากกว่าปกติ ซึ่งเส้นใยไหมก็มีสมบัติในลักษณะนี้

การศึกษาลักษณะลายทอของผ้าไหมพบว่า เมื่อพิจารณาผ้าไหมในระยะใกล้ ลักษณะแบบการถักทอของลายทอจากเส้นใยที่ซ้ำ ๆ กันมีผลต่อการรับรู้การสะท้อนแสง แต่ถ้าพิจารณาผ้าไหมในระยะทางปกติหรือระยะทางไกล ลักษณะที่ซ้ำกันของลายทอมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการรับรู้การสะท้อนแสงของผ้าไหม แต่สิ่งที่มีผลกระทบต่อการสะท้อนแสง คือ ปริมาณพื้นที่ของเส้นไหมที่นำมาทอ ทั้งที่เป็นเส้นพุ่งและเส้นยืน และชนิดของเส้นใยไหม เพราะปริมาณความหนาแน่นของพื้นที่เส้นไหมมีผลต่อสมบัติการส่องผ่านและสมบัติการสะท้อนของผ้าไหม และชนิดของเส้นไหมแต่ละชนิดให้สมบัติการสะท้อนแสงที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากความขรุขระของผิวเส้นไหมและความเป็นระเบียบของเส้นใยไหมเมื่อนำมาตีเกลียวเป็นเส้นไหม รวมทั้งปริมาณพื้นที่เส้นพุ่งต่อพื้นที่เส้นยืนมีผลกระทบต่อ การสะท้อนแสงของผ้าไหมอีกด้วย

เมื่อศึกษากราฟการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมพบว่า ลักษณะการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหมนั้น ประกอบขึ้นจากการกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสง 2 ลักษณะด้วยกัน ได้แก่ ส่วนการกระจายตัวที่มีลักษณะเป็นแสงพุ่ง และส่วนที่กระจายตัวที่เป็นลักษณะเหมือนแสงกล้ำ การสะท้อนแสงของผ้าไหมในส่วนที่มีลักษณะเป็นแสงพุ่งนั้น เกิดจากการที่แสงตกกระทบบลงเส้นไหมแล้ว เกิดการกระเจิงแสงระหว่างเส้นใยไหมและเส้นไหมแต่ละเส้น จึงแสดงลักษณะเป็นแสงพุ่งออกมา การสะท้อนแสงของผ้าไหมในส่วนที่เหมือนแสงกล้ำนั้น เกิดจากการที่แสงไปกระทบบกับเส้นไหมแล้ว เส้นไหมสะท้อนแสงไปรวมกันที่ทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าปกติ จึงทำให้เกิดเป็นแสงเหมือนแสงกล้ำและเกิดออฟเพกคูลาร์ขึ้นมา ซึ่งทิศทางที่เกิดแสงเหมือนแสงกล้ำนี้ มีค่าความสว่างมากกว่าแสงสะท้อนจากผิวผ้าไหมที่ทิศทางอื่น ๆ

เมื่อผู้สังเกตมองผ้าไหมในมุมมองและทิศทางปกติเห็นว่า ผ้าไหมมีความมันวาวและความเงา เกิดจากแสงที่ตกกระทบบผิวผ้าไหมไม่ใช่แสงที่เป็นลำแสงตรงมาตกระทบบผิวผ้าไหม แต่เป็นลำแสงที่เป็นทรงกรวย เมื่อลำแสงนี้ตกระทบบที่ผิวผ้าไหมขึ้นกับระยะทางของพื้นที่ผิว เมื่อระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับผ้าไหมเปลี่ยนแปลง ทำให้ทิศทางของแสงตกกระทบบเปลี่ยนตามไปด้วย ดังแสดงไว้ตามภาพที่ (5.1)



ภาพที่ 5.1 ทิศทางของแสงตกกระทบบและมุมมองรับภาพ เมื่อมองผิวผ้าไหมที่ระยะทางต่าง ๆ

จากภาพที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับผิวผ้าไหมเปลี่ยนแปลง มุมตกกระทบก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ในทางเดียวกัน ระยะทางระหว่างผิวผ้าไหมกับผู้สังเกตเปลี่ยนแปลง มุมรับภาพก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้น เมื่อผู้สังเกตมองผ้าไหมในระยะประปรกติ ผู้สังเกตเห็นแสงสะท้อนจากผ้าไหมที่มีทิศทางของแสงตกกระทบและทิศทางของมุมรับภาพแตกต่างกัน จึงทำให้รับรู้การสะท้อนแสงในแต่ละตำแหน่งของผิวผ้าไหมแตกต่างกัน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ผู้สังเกตเห็นผ้าไหมดูมีความเหลือมของแสงสะท้อน ความเหลือมกันของแสงสะท้อนเป็นสาเหตุของการทำให้ผ้าไหมมีความเงาและความมันวาวมากกว่าผ้าชนิดอื่น แต่ในความเป็นจริงผ้าทุกชนิดเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ได้เหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่ชนิดของเส้นใยที่นำมาทอ ซึ่งเส้นใยไหมมีสมบัติเชิงแสงที่สะท้อนและหักเหแสงคล้ายปริซึมสามเหลี่ยม จึงทำให้ผ้าไหมมีลักษณะการสะท้อนแสงที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว

แบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สร้างขึ้นจากศึกษาลักษณะกระจายตัวของค่าการสะท้อนแสงของผ้าไหม แล้วนำมาเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ตามสมการที่ (5.1)

$$L(\theta_i, \theta_r) = k_d \cos^{\alpha(\theta_i, \theta_r)}(\theta_r) + k_s \cos^{\beta(\theta_i, \theta_r)}(\theta_r + (\theta_i - \theta_{off}))$$

(5.1)

ในการวิจัยนี้ พบตัวแปรเสริมแต่ละตัว สามารถอธิบายลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมและความสัมพันธ์กับผ้าไหมได้ ดังต่อไปนี้

ตัวแปรเสริม k_d ใช้ออกถึงความเข้มแสงของการสะท้อนแสงในส่วนที่เป็นแสงฟุ้งของผิวผ้าไหม นั้นหมายความว่า ผ้าไหมที่มีความเข้มแสงของแสงกระเจิงมากทำให้ค่าของตัวแปรเสริม k_d มีค่ามากตามไปด้วย

ตัวแปรเสริม α ใช้บอกถึงรูปร่างการกระจายตัวของการสะท้อนแสงในส่วนที่เป็นแสงฟุ้งของผิวผ้าไหม แต่ค่าของตัวแปรเสริมแปรผกผันกับความกว้างของกรวยแสงฟุ้ง นั่นหมายความว่าถ้าผ้าไหมมีการกระเจิงแสงมากค่าของตัวแปรเสริม α ก็มีค่าน้อยด้วย

ตัวแปรเสริม k_s ใช้บอกถึงความเข้มแสงของการสะท้อนแสงในส่วนที่เป็นแสงกล้าของผิวผ้าไหม นั่นหมายความว่า ผ้าไหมที่มีความเข้มแสงของแสงกล้ามาก ทำให้ค่าของตัวแปรเสริม k_s มีค่ามากตามไปด้วย

ตัวแปรเสริม β ใช้บอกถึงรูปร่างการกระจายตัวของการสะท้อนแสงในส่วนที่เสมือนแสงกล้าที่เกิดการกระเจิงแสงของผิวผ้าไหม แต่ค่าของตัวแปรเสริมแปรผกผันกับความกว้างของกรวยแสงกล้า นั่นหมายความว่า เมื่อผ้าไหมมีการกระเจิงแสงมาก ค่าของตัวแปรเสริม β ก็มีค่าน้อย

ตัวแปรเสริม θ_{off} ใช้บอกมุมที่เบี่ยงเบนไปของการเกิดออฟสเปกคูลาร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะการสะท้อนแสงของผิวผ้าไหม กล่าวคือ ตัวแปรเสริม θ_{off} บอกทิศทางที่แสงสะท้อนของผ้าไหมกระจายไปรวมตัวมากที่สุด ซึ่งทิศทางนั้นเห็นผ้าไหมนั้นมีความสว่างมากที่สุด

5.2. ข้อเสนอนณะ

เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องมือวัด จึงทำให้สามารถวัดค่าสะท้อนแสงของผ้าไหมได้เพียง 2 มิติ คือ ไม่สามารถวัดค่าการสะท้อนแสงในแนวของมุมกวาด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วแสงสะท้อนต้องมีการกระเจิงออกไปในแนวของมุมกวาดด้วย ถ้าศึกษาเรื่องนี้ต่อไปในอนาคต เห็นควรหาเครื่องมือที่สามารถวัดค่าการสะท้อนแสงได้ครอบคลุมทุกมุมแล้ว จึงสร้างฟังก์ชันใน 3 มิติ

เนื่องจากการสะท้อนแสงของผ้าไหม ปัจจัยหลักอยู่ที่ลักษณะของเส้นใยไหม ดังนั้น ในอนาคตควรศึกษาและเจาะลึกลงไปในโครงสร้างระดับโมเลกุลเชิงชีวภาพของเส้นใย หาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีกับสมบัติทางกายภาพ เพื่อนำข้อมูลที่ได้เพิ่มเติมพบมาพัฒนา

แบบจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหมให้สมบูรณ์ต่อไป นอกจากนี้ แบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอนี้ ยังสามารถพัฒนาต่อไปได้อีกมาก เพราะในงานวิจัยนี้ สมการของแบบจำลองยังเป็นแบบง่ายอยู่ในอนาคตสามารถศึกษาหาฟังก์ชันลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยไหม เพื่อนำมาปรับปรุงแบบจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหมในส่วนของตัวแปรเสริม α และ β และหาฟังก์ชันอัตราส่วนของพื้นที่ของเส้นพุ่ง เส้นยืน และส่วนที่เป็นช่องว่าง เพื่อมาปรับปรุงแบบจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหมในส่วนของตัวแปรเสริม k_a และ k_s

รายการอ้างอิง

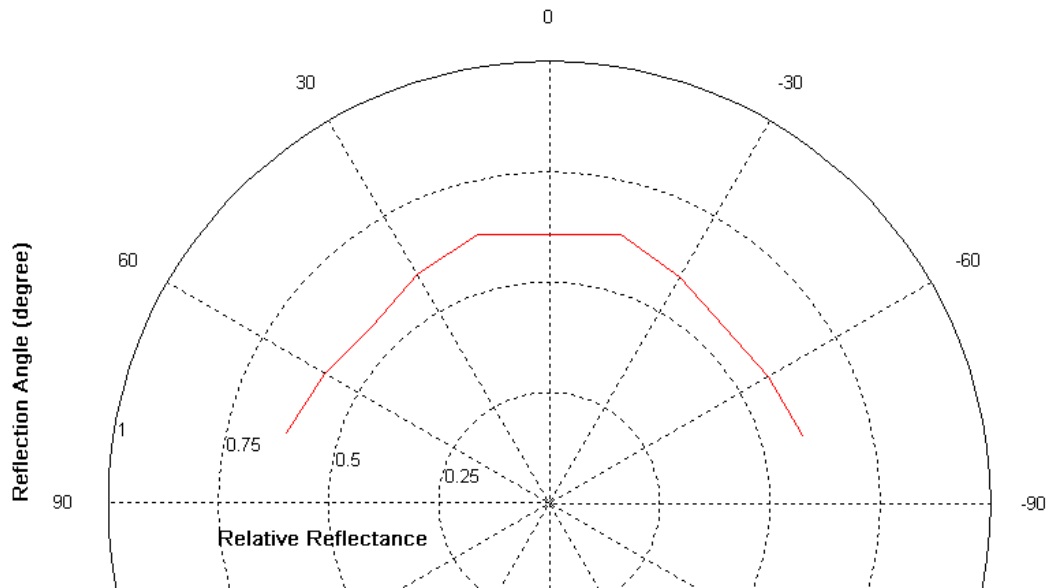
- [1] เศรษฐกิจการพาณิชย์, กรม. *การส่งออกผลิตภัณฑ์ใหม่*. กรุงเทพมหานคร: กรมศุลกากร, 2550.
- [2] สำนักสารสนเทศธุรกิจระหว่างประเทศ. *ตลาดส่งออกเสื้อผ้าสำเร็จรูปทำจากไหม 30 ประเทศแรกของไทย*. กรุงเทพมหานคร: กรมส่งเสริมการส่งออก, สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, 2550.
- [3] Wyszecki, G., and Stiles, W.S. *Color science*. 2nd ed. New York: Wiley Classic, 2000.
- [4] Lensch, H.P.A., and Goesele, M. Realistic materials in computer Graphics. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, pp24-29. New York: ACM, 2005.
- [5] พรทวี พึ่งวัชมี และมิตชูโอะ อิเคดะ. *สีและการมองเห็น*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [6] Dorsey, J., Rushmeier, H., and Sillion, F. *Digital modeling of material appearance*. China: Morgan Kaufmann, 2008.
- [7] Pharr, M., and Humphreys, G. *Physically based rendering from theory to Implementation*. Series in Interactive 3D Technology. China: Morgan Kaufmann, 2004.
- [8] Phong, B.T. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM* 18 (June 1975): 311-317.
- [9] Torrance, K.E., and Sparrow, E.M. Theory for off-specular Reflection from roughened surface. *Journal of the Optical Society of America* 57 (October 1967): 1105-1114.

- [10] Blinn, J.F. Models of Light reflection for computer synthesized pictures. In *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Proceedings of the 4th annual conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 192-198. New York: ACM, 1997.
- [11] Oren, M., and Nayar, S.K. Generalization of Lambert's reflectance model. *International Journal of Computer Vision* 14 (April 1995): 227-251.
- [12] Ward, G.J. Measuring and modeling anisotropic reflection. *Computer Graphics* 26 (July 1992): 265-272.
- [13] Ashikmin, M., and Shirley, P. An anisotropic Phong BRDF model. *Journal of Graphic Tools* 5 (December 2000): 25-32.
- [14] Hecht, E. *Optics*. 4th ed. San Francisco: Addison Wesley, 2002.
- [15] Adabala, N., Thalmann, N.M., and Fei, G. Visualization of woven cloth. In *Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering, Leuven, Belgium*, pp 178–185. Aire-la-Ville: Eurographics Association, 2003.
- [16] Giordano, F.R., Fox, W.P., Horton, S.B. and Weir, M.D. *A first course in mathematical modeling*. 4th ed. Canada: Cengage Learning, 2009
- [17] Devore, J.L. *Probability and statistics for engineering and the sciences*. 7th ed. Canada: Cengage Learning, 2009.
- [18] Rubin, B. Kobsa, H. and Shearer, S.M. Prediction and verification of an iridescent Synthetic fiber. *Applied Optics* 36 (September 1997): 6388-6392.

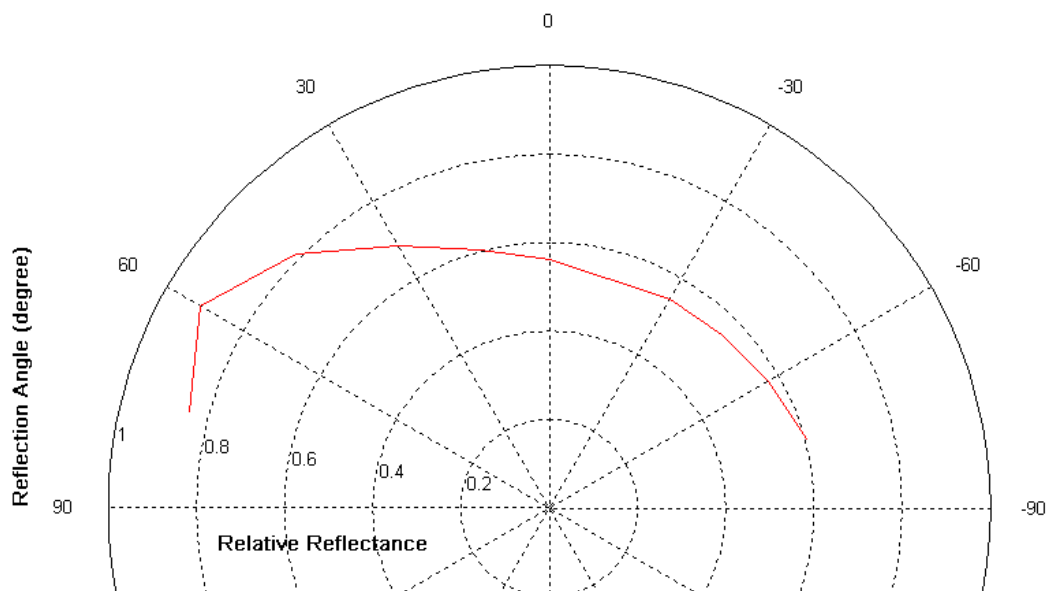
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

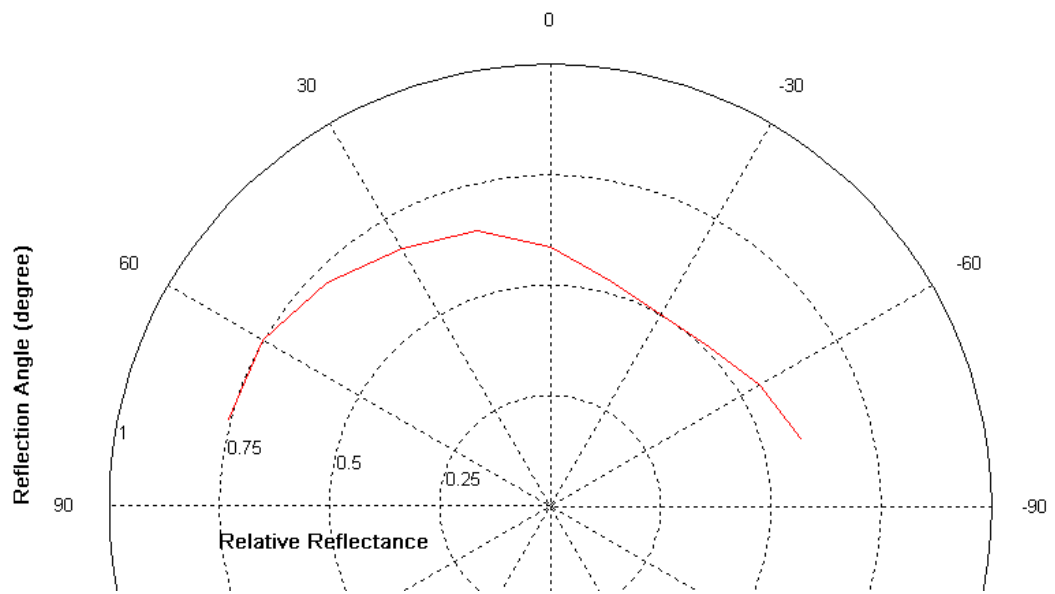
กราฟผลการทดลองตอนที่ 1



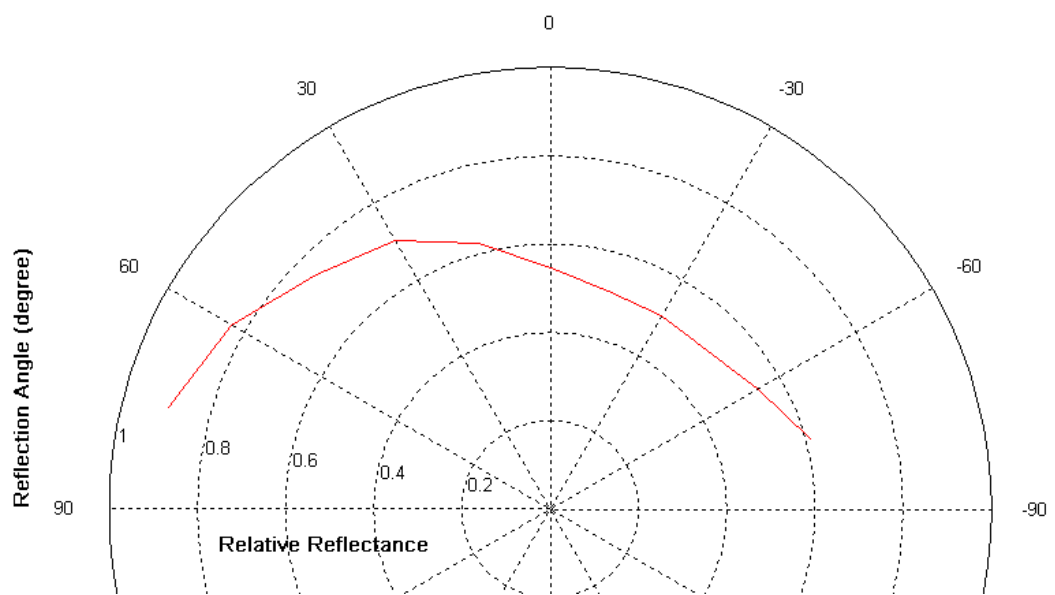
กราฟที่ 1 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้มุมตกกระทบ 0 องศา



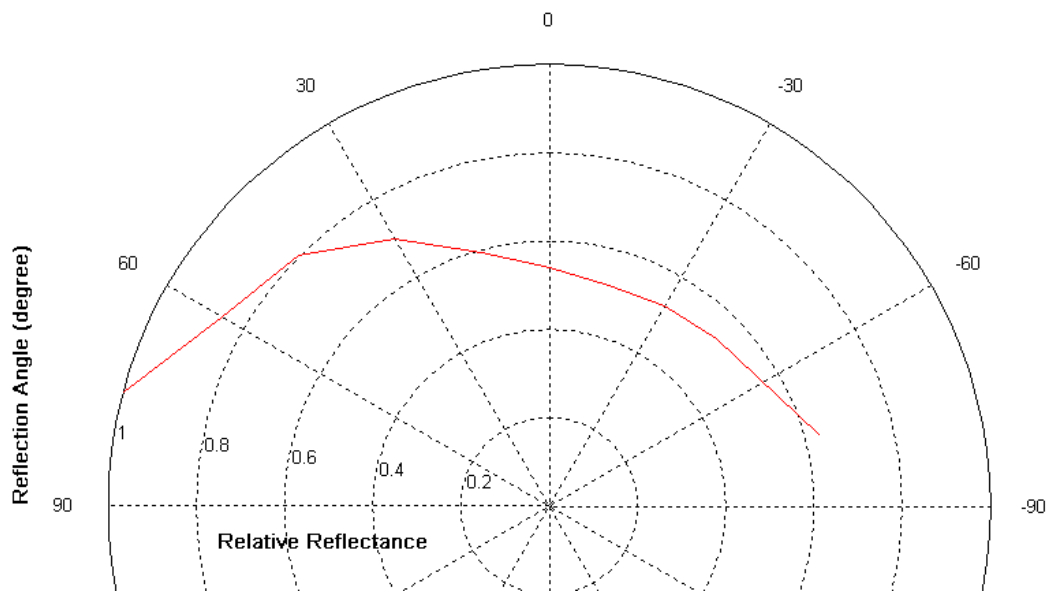
กราฟที่ 2 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -15 องศา



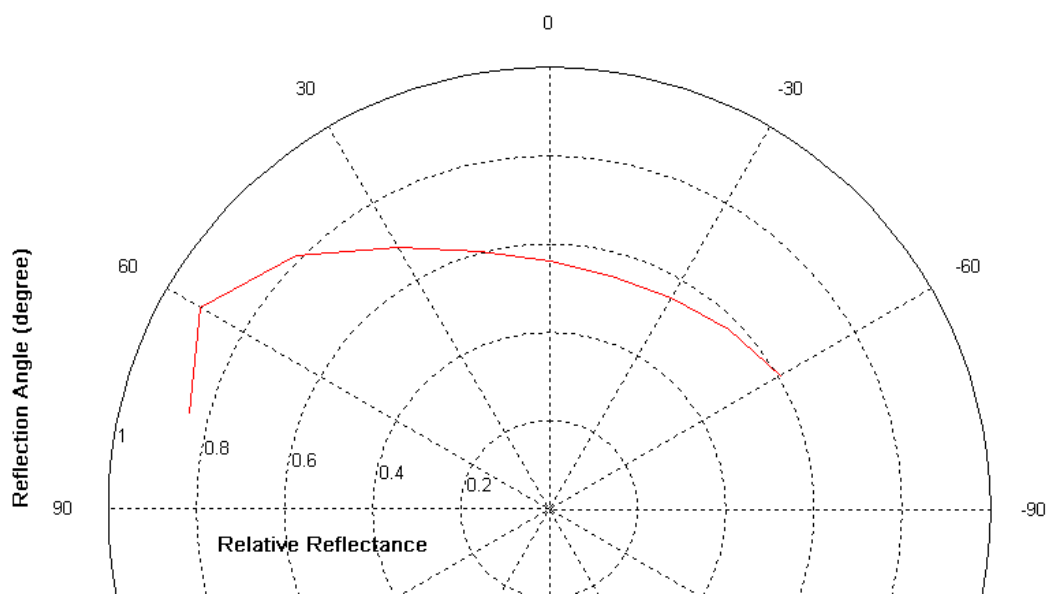
กราฟที่ 3 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -30 องศา



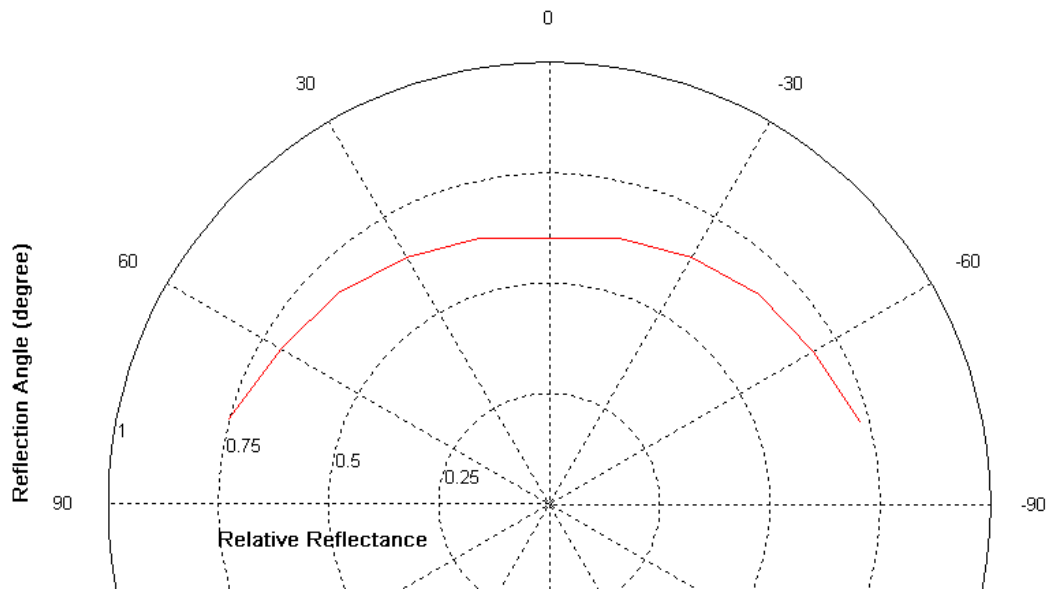
กราฟที่ 4 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -45 องศา



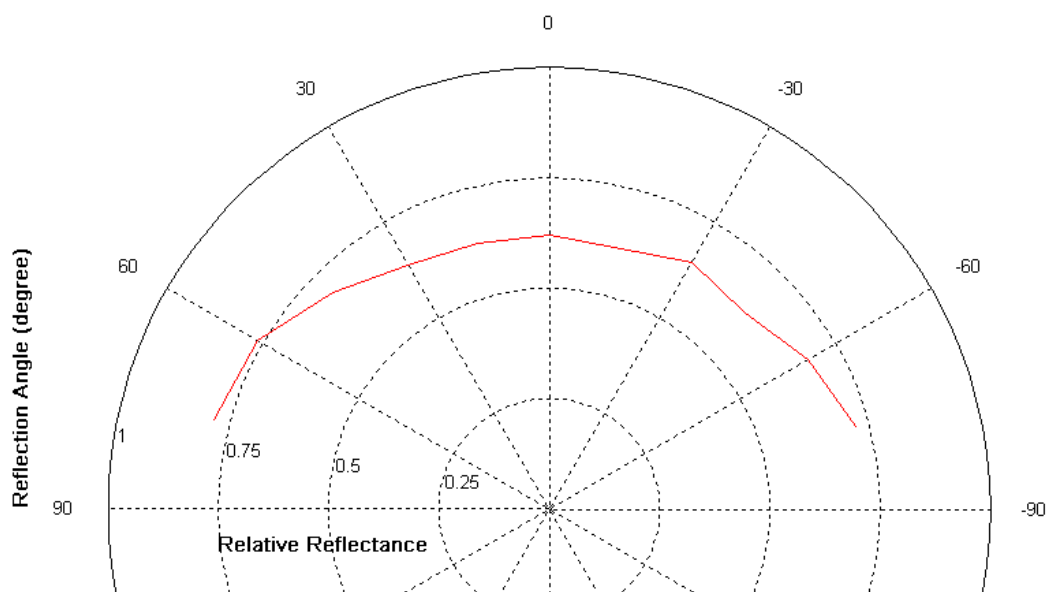
กราฟที่ 5 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -60 องศา



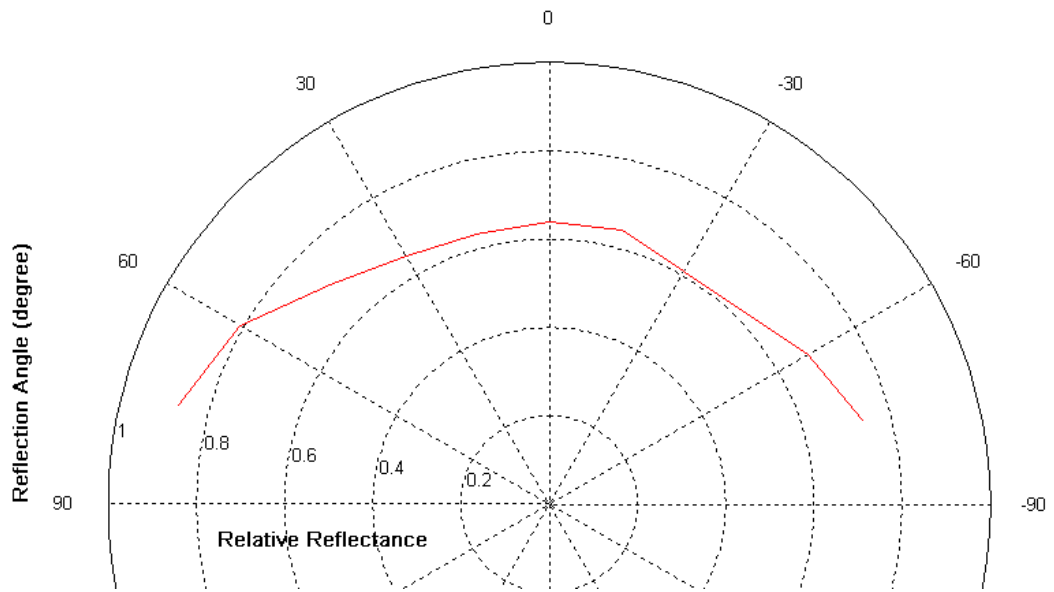
กราฟที่ 6 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -75 องศา



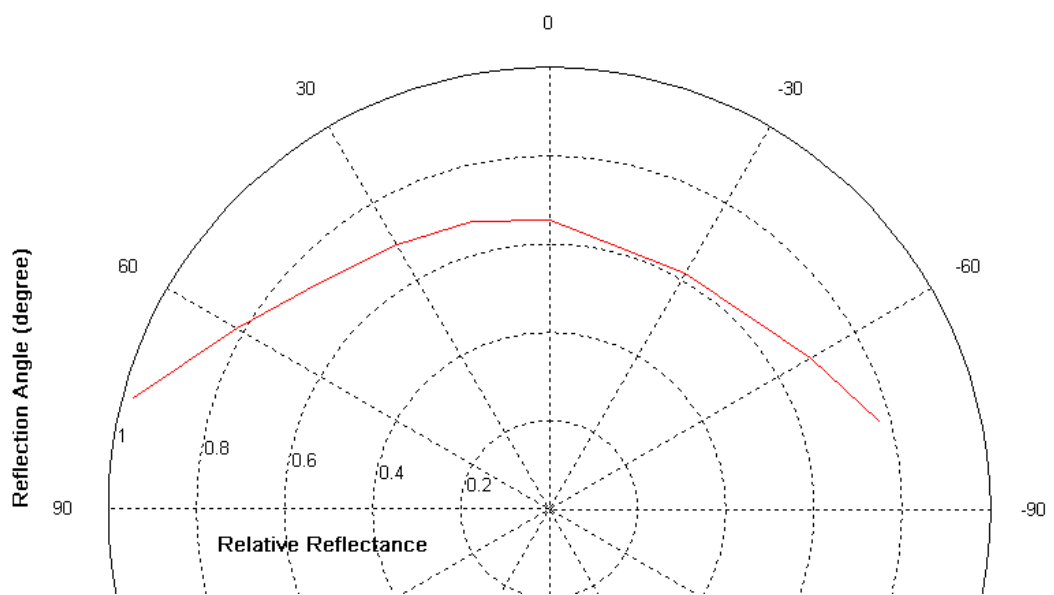
กราฟที่ 7 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้มุมตกกระทบ 0 องศา



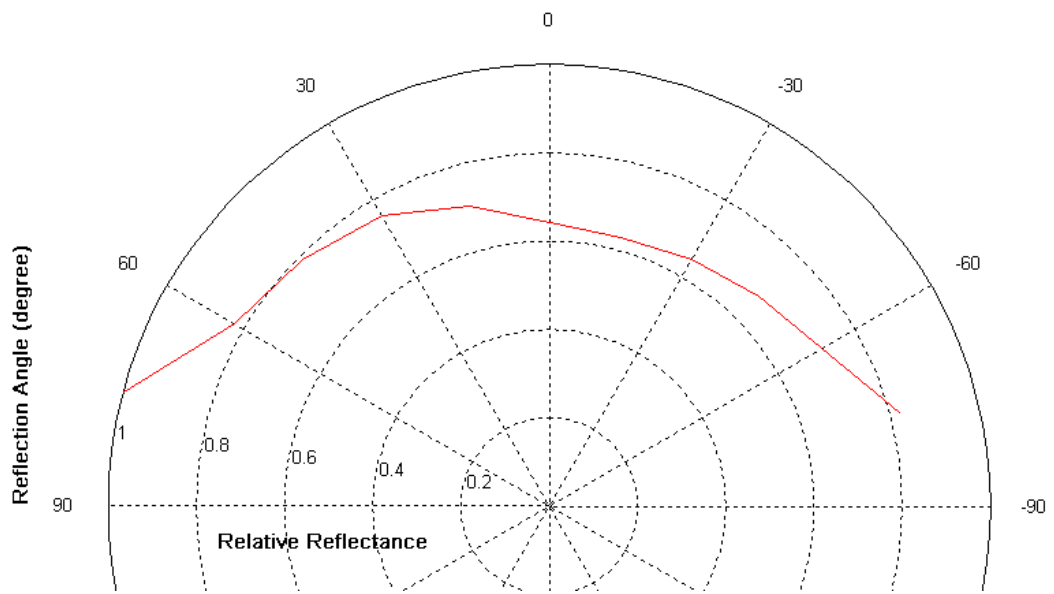
กราฟที่ 8 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -15 องศา



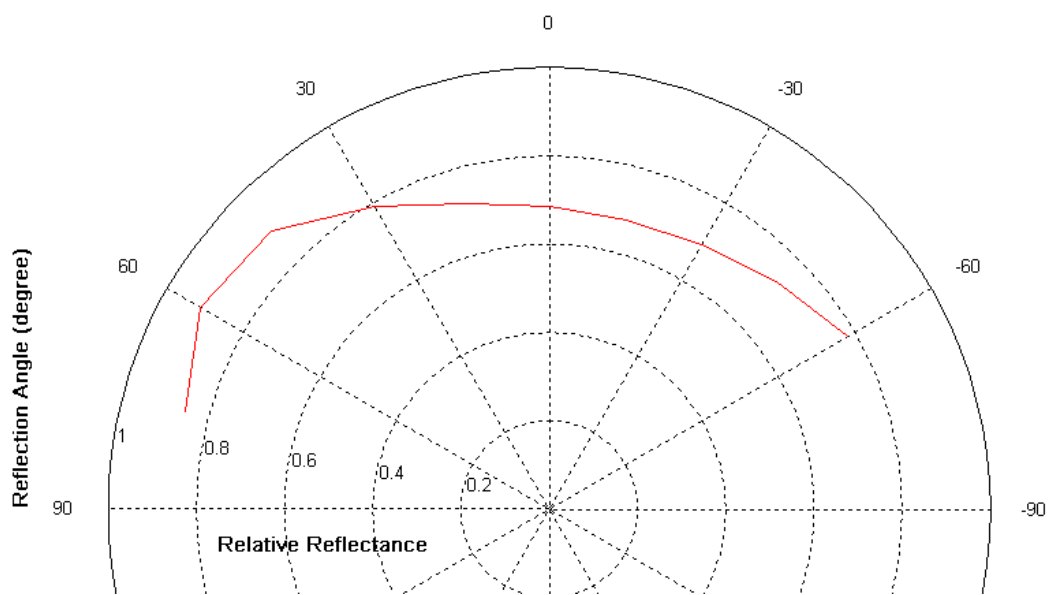
กราฟที่ 9 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -30 องศา



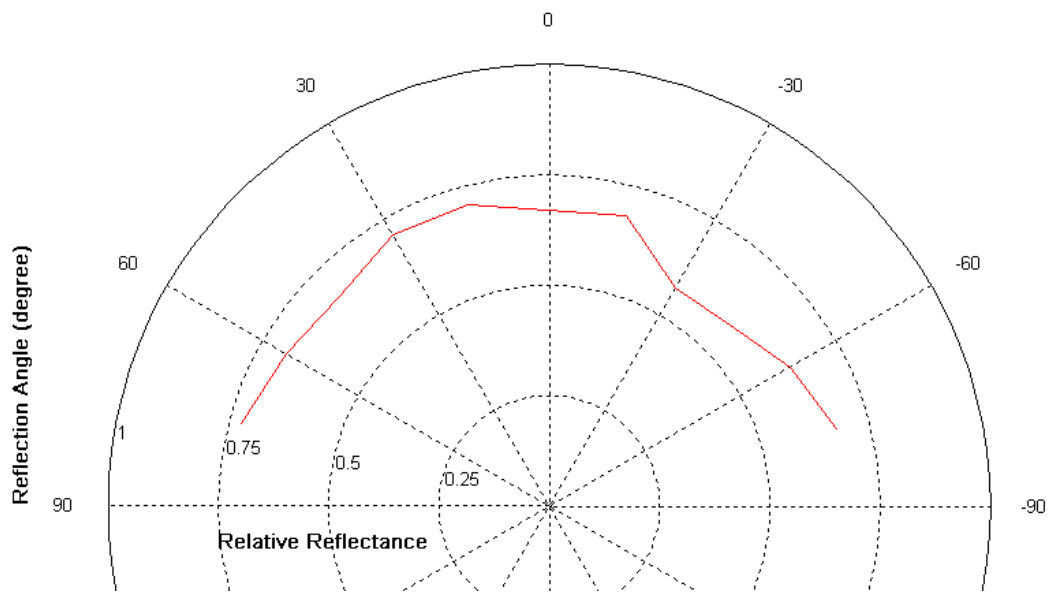
กราฟที่ 10 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -45 องศา



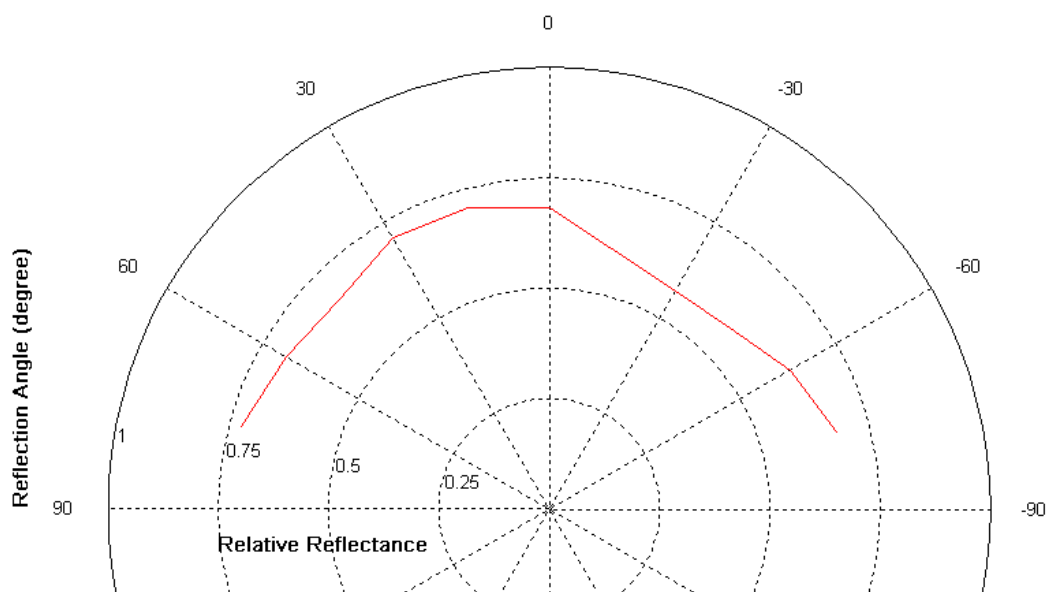
กราฟที่ 11 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้มุมตกระทบ -60 องศา



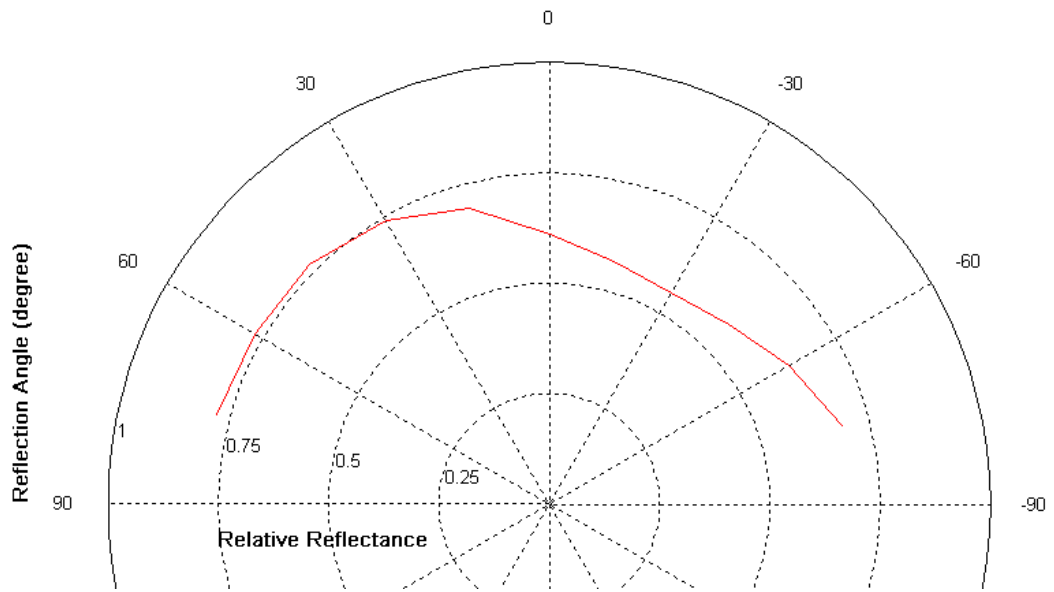
กราฟที่ 12 อาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เมื่อใช้มุมตกระทบ -75 องศา



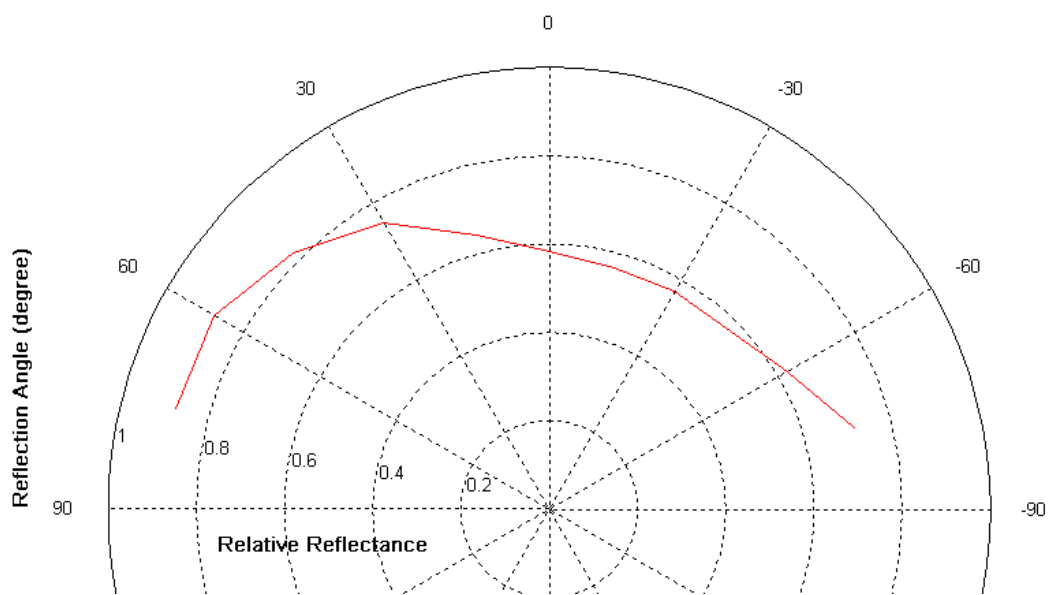
กราฟที่ 13 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้มุมตกกระทบ 0 องศา



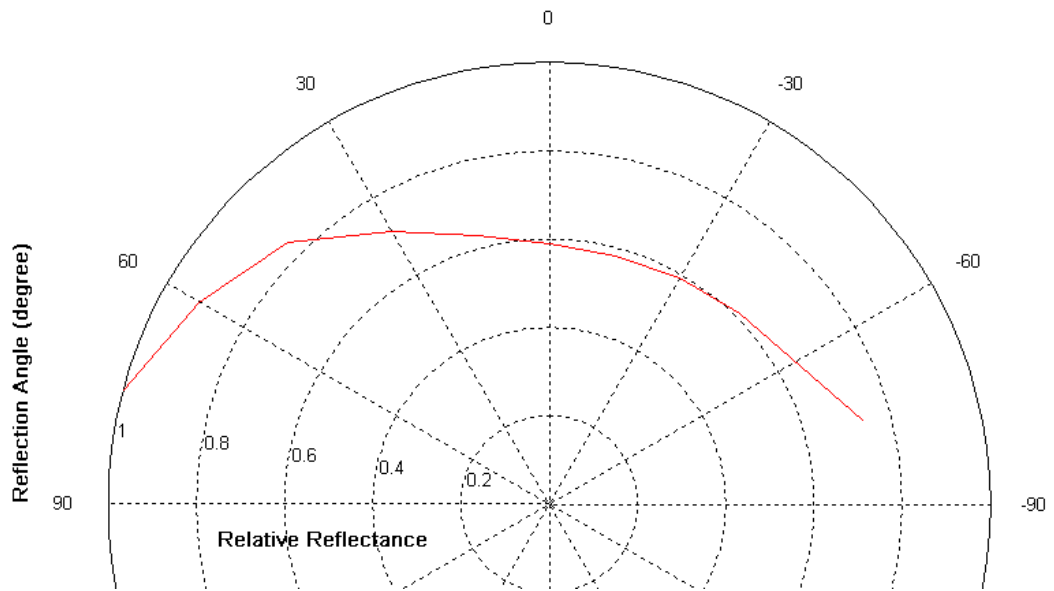
กราฟที่ 14 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -15 องศา



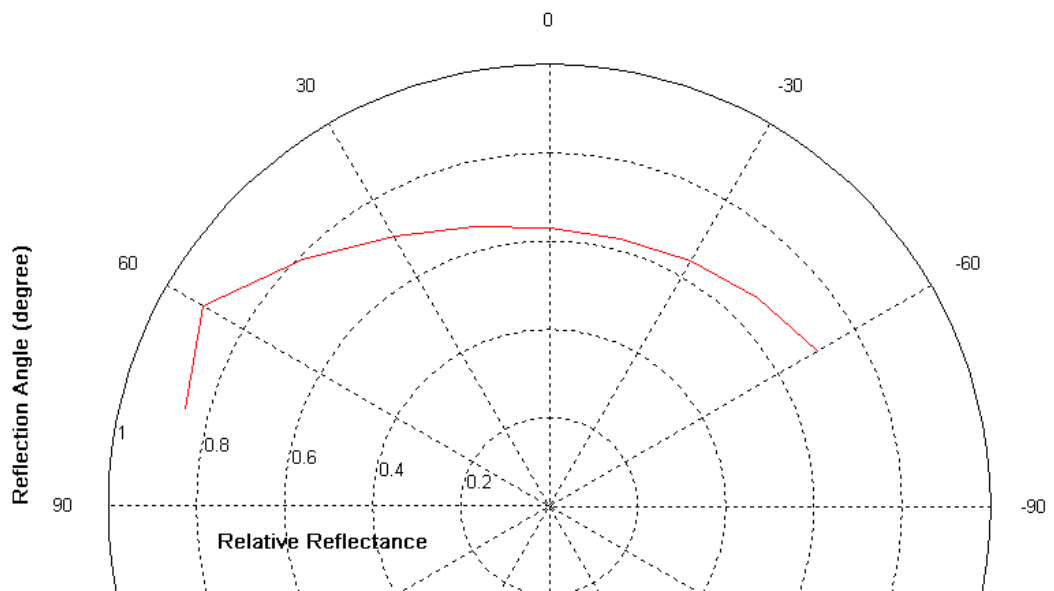
กราฟที่ 15 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -30 องศา



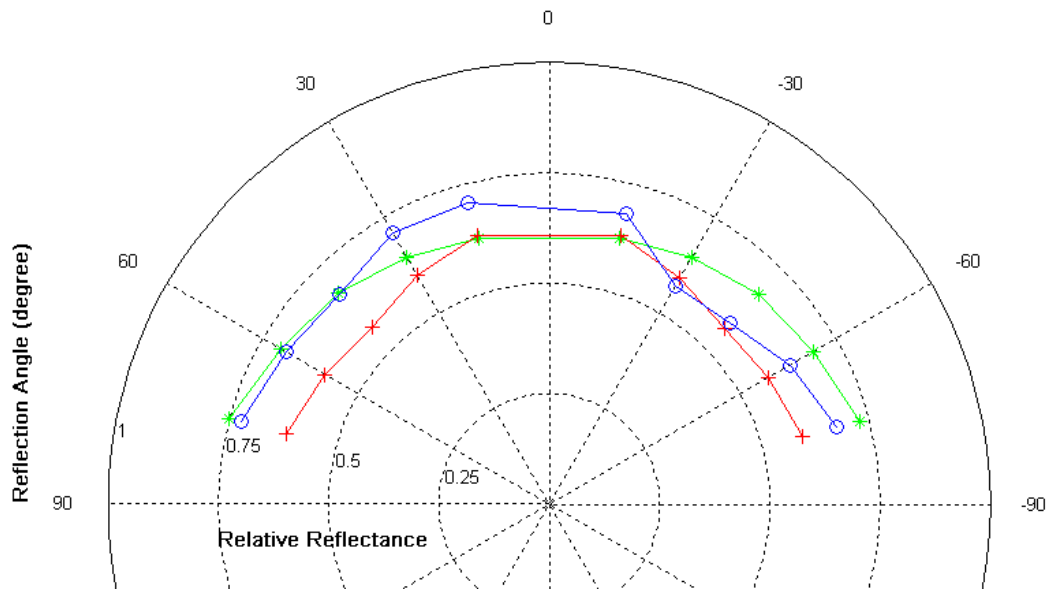
กราฟที่ 16 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -45 องศา



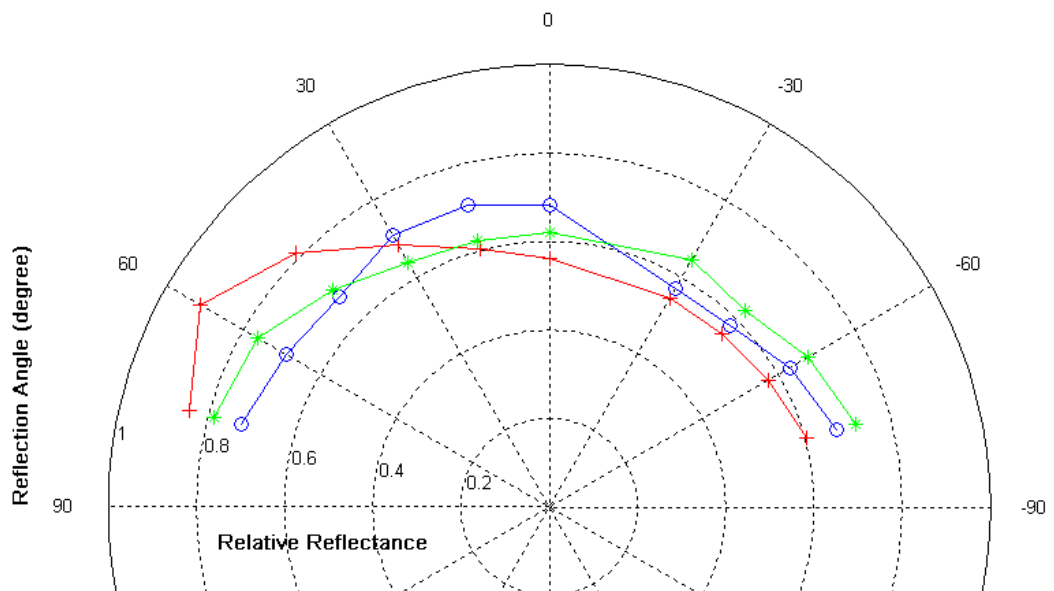
กราฟที่ 17 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -60 องศา



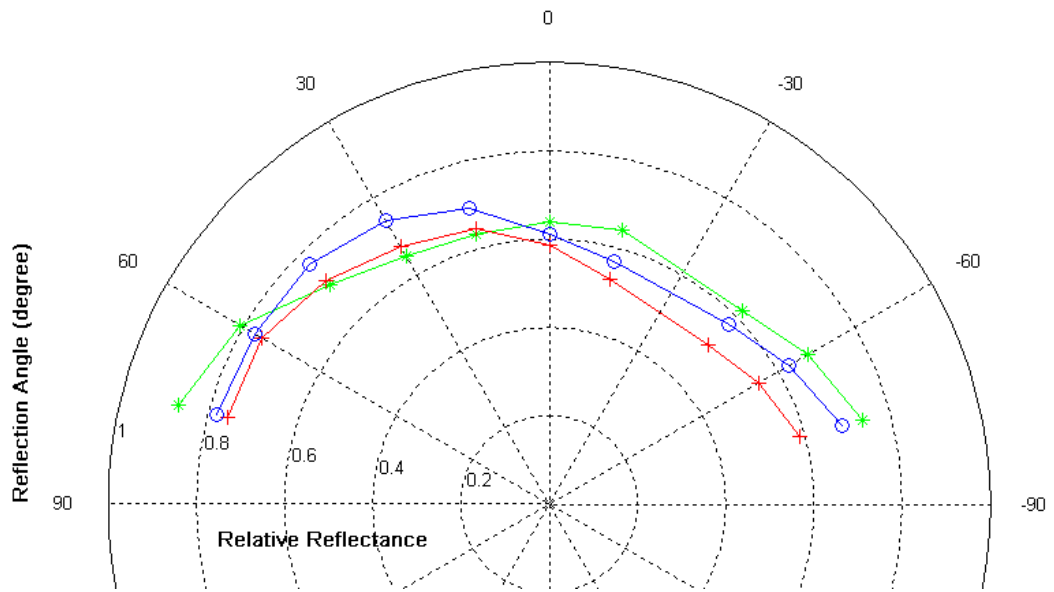
กราฟที่ 18 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้มุมตกกระทบ -75 องศา



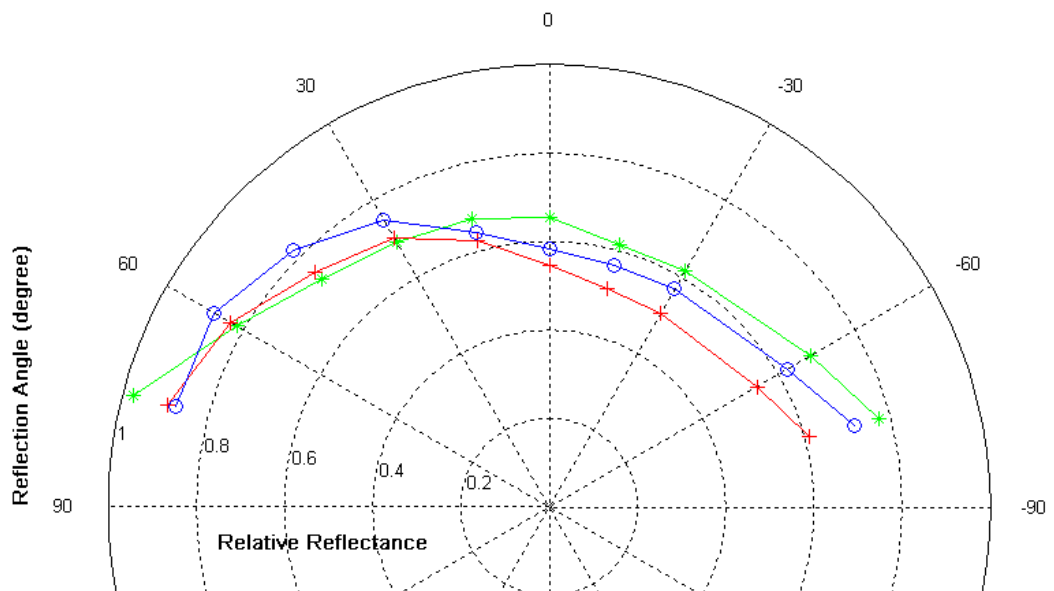
กราฟที่ 19 ค่าบีอาร์ดีเอพของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้มุมตกกระทบ 0 องศา



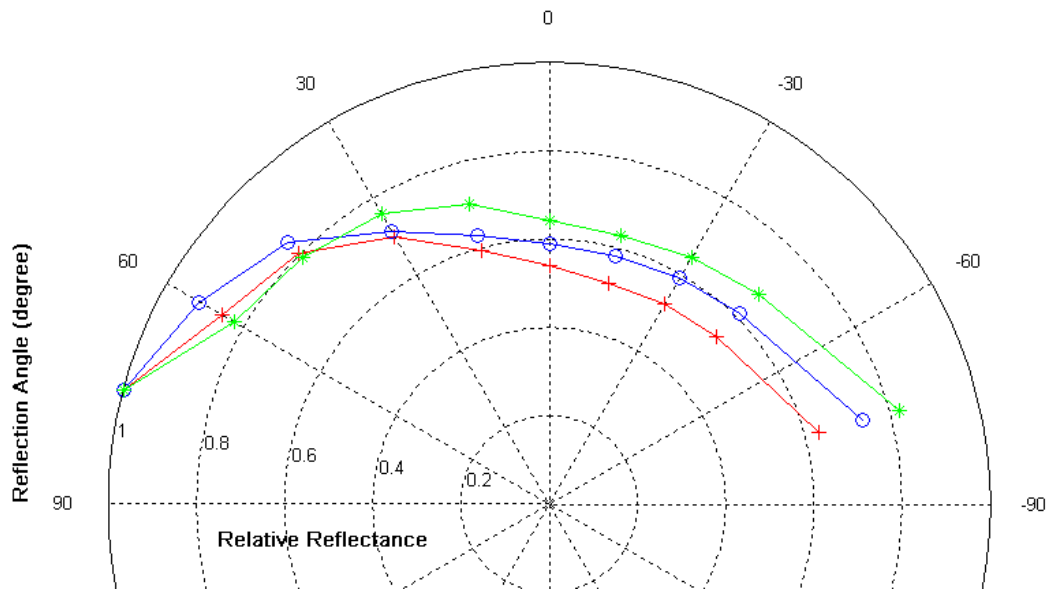
กราฟที่ 20 ค่าบีอาร์ดีเอพของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้มุมตกกระทบ -15 องศา



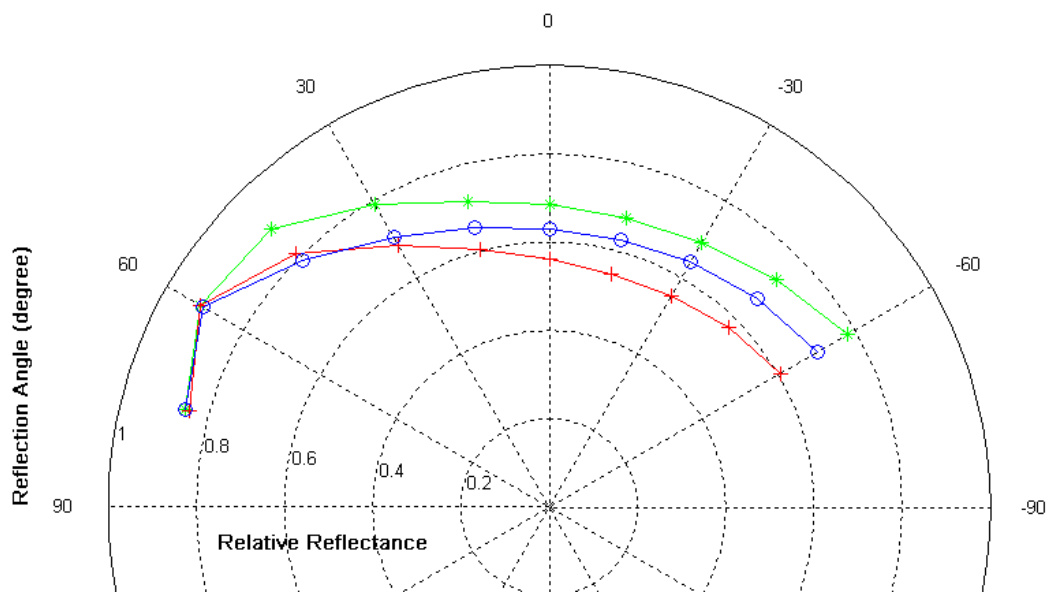
กราฟที่ 21 ค่าบีอาร์ดีเอพของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้มุมตกกระทบ -30 องศา



กราฟที่ 22 ค่าบีอาร์ดีเอพของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้มุมตกกระทบ -45 องศา

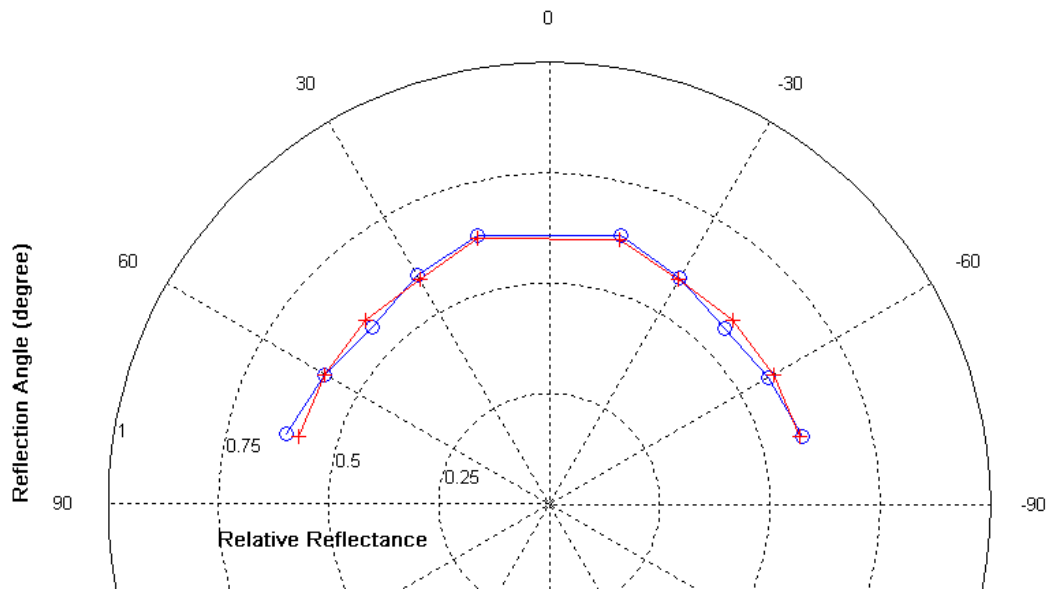


กราฟที่ 23 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้มุมตกกระทบ -60 องศา

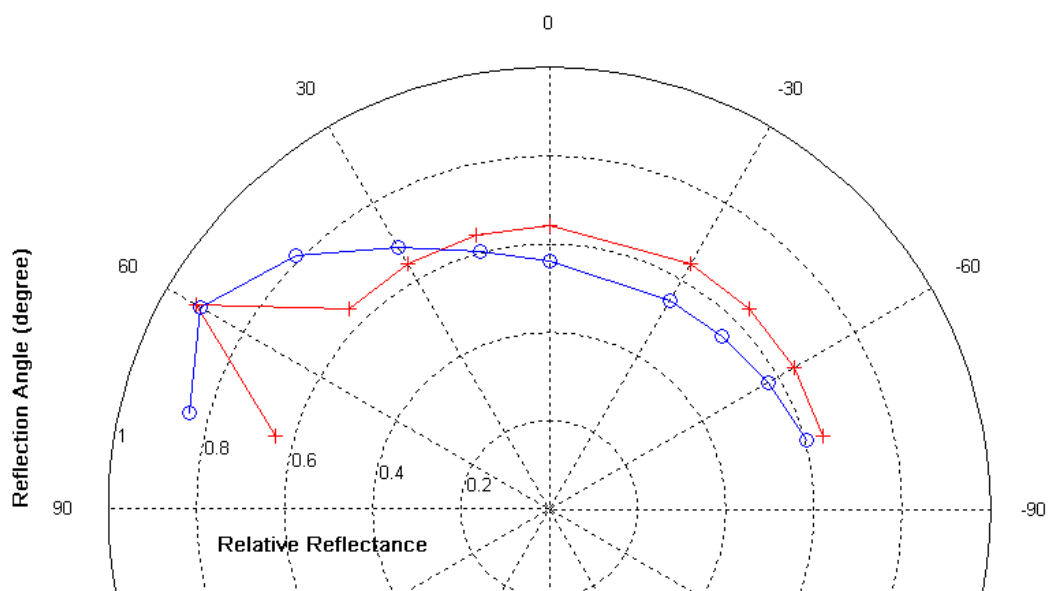


กราฟที่ 24 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 (+) ตัวอย่างที่ 2 (*) และตัวอย่างที่ 3 (o) เมื่อใช้มุมตกกระทบ -75 องศา

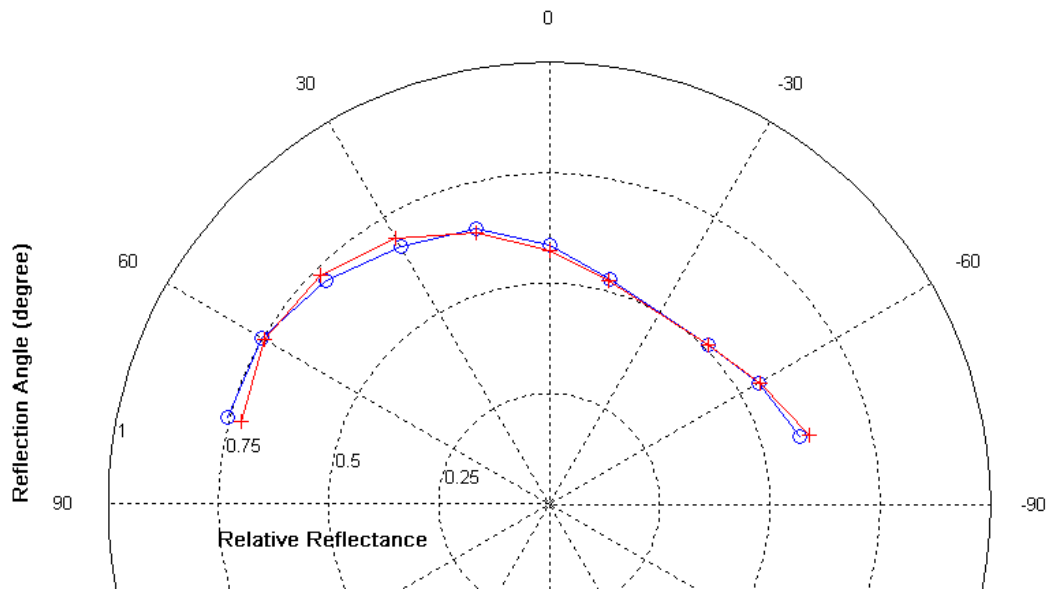
กราฟผลการทดลองตอนที่ 2



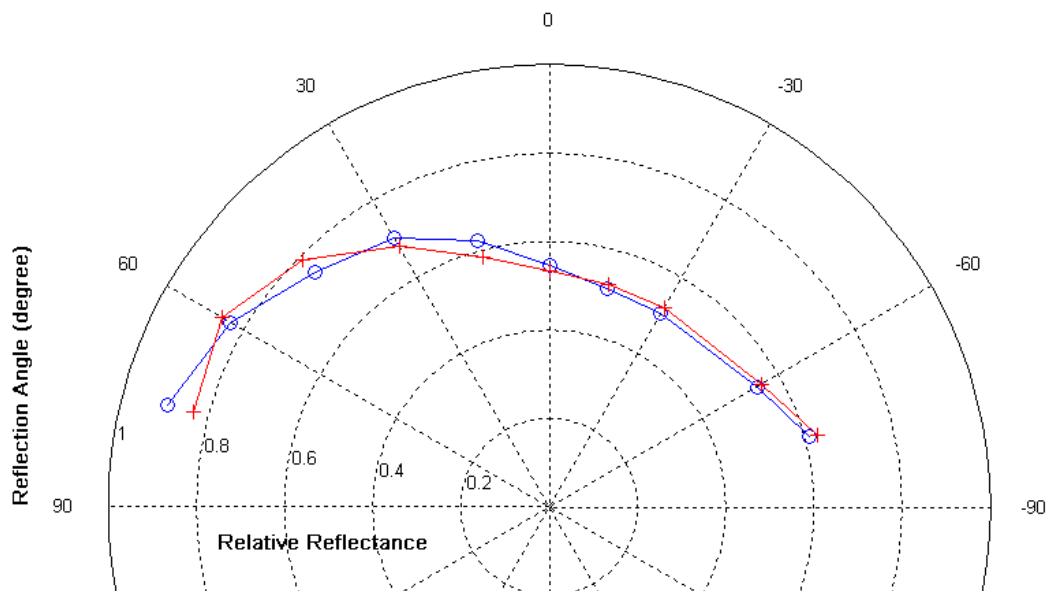
กราฟที่ 25 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเลนส์ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



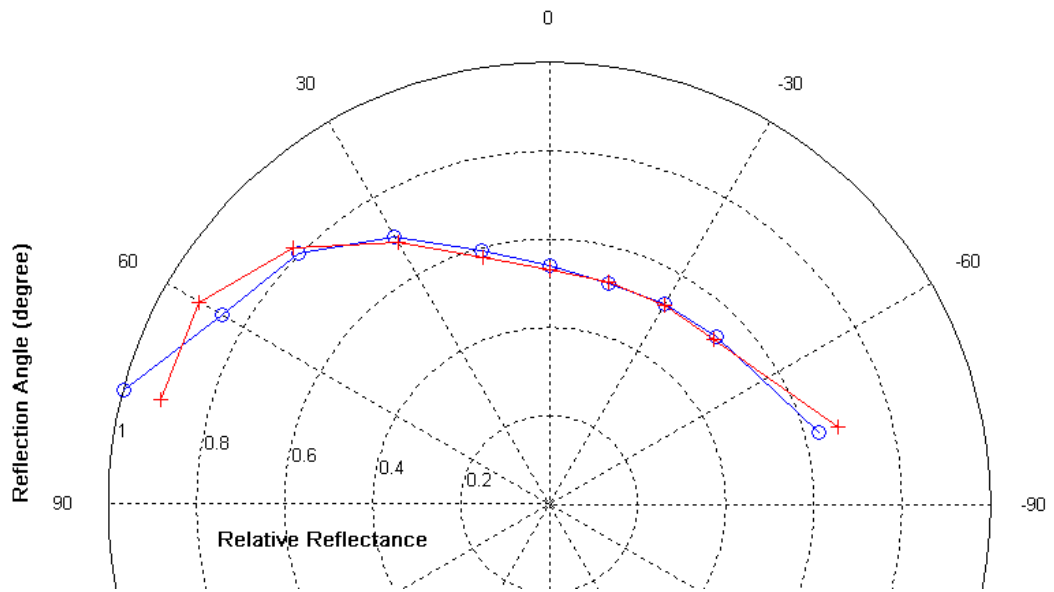
กราฟที่ 26 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเลนส์ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



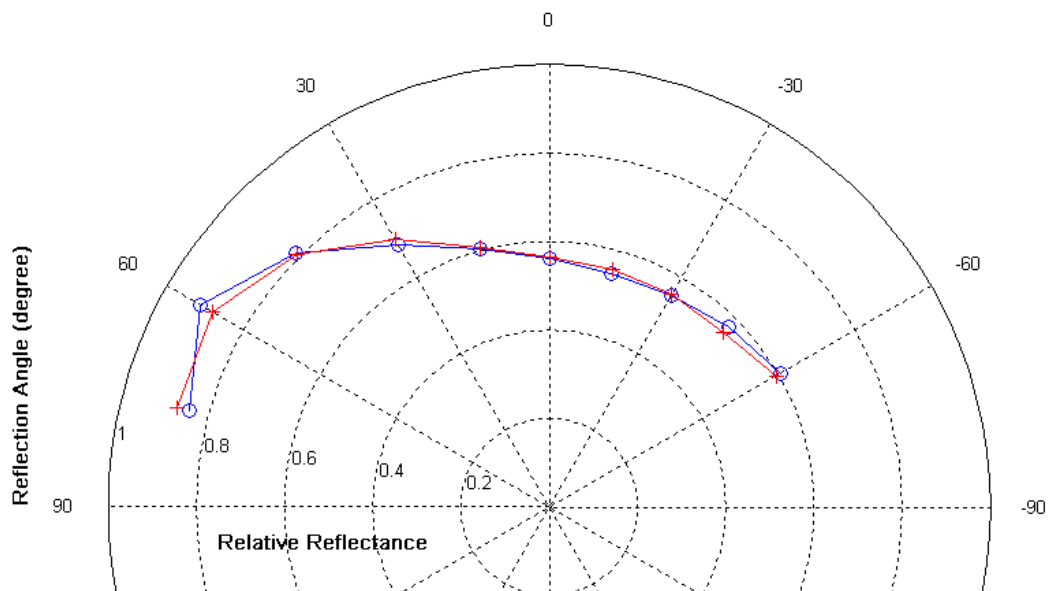
กราฟที่ 27 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



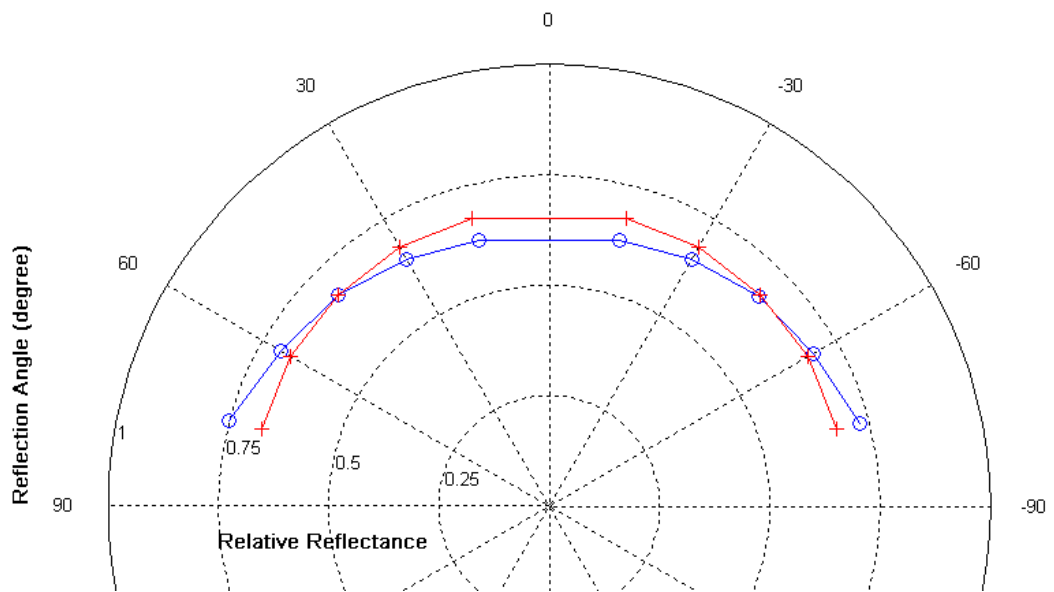
กราฟที่ 28 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



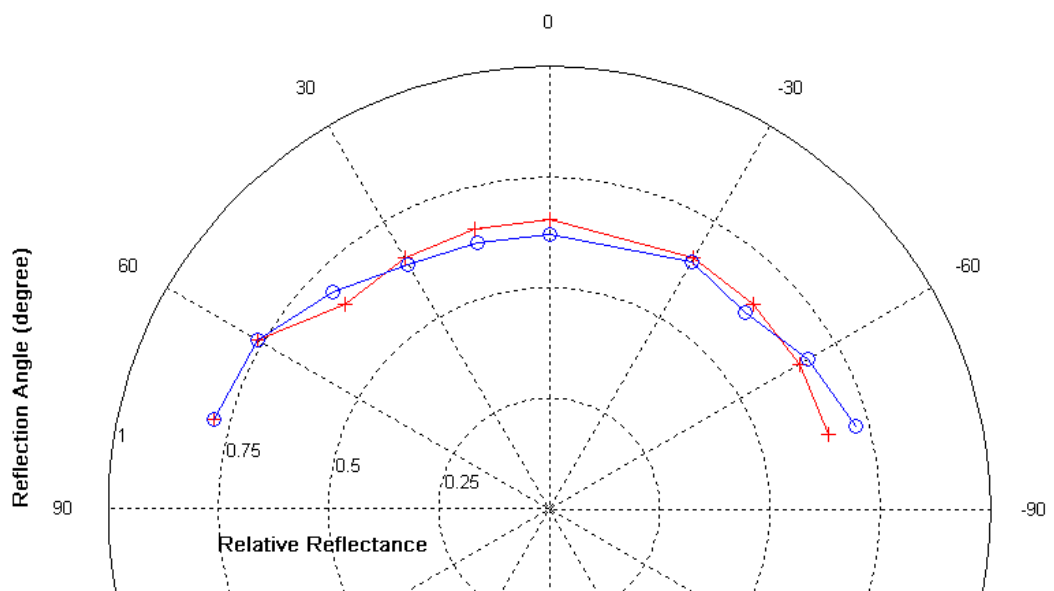
กราฟที่ 29 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมตกกระทบ -60 องศา



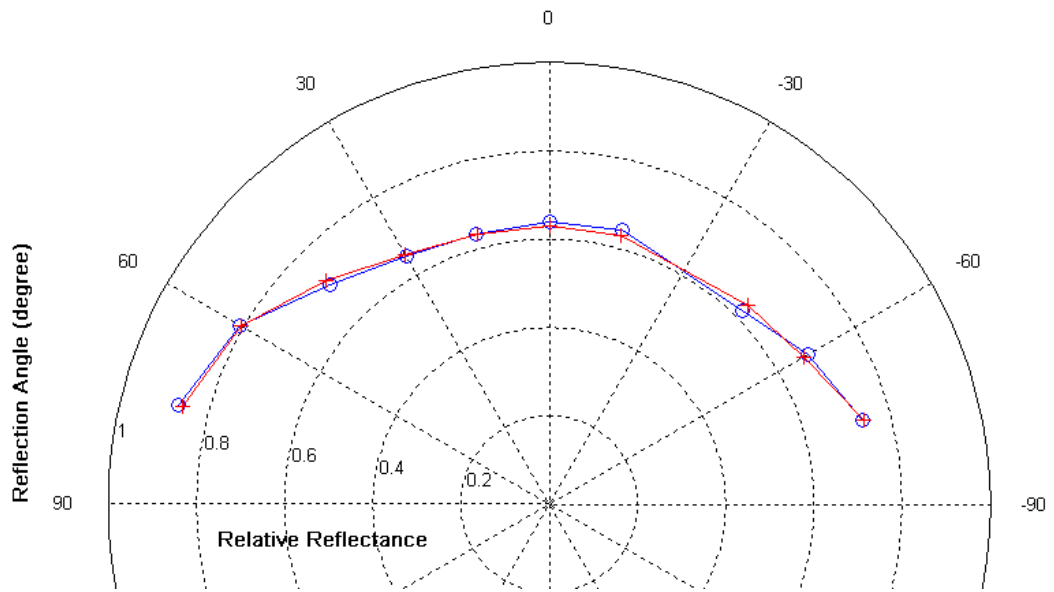
กราฟที่ 30 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมตกกระทบ -75 องศา



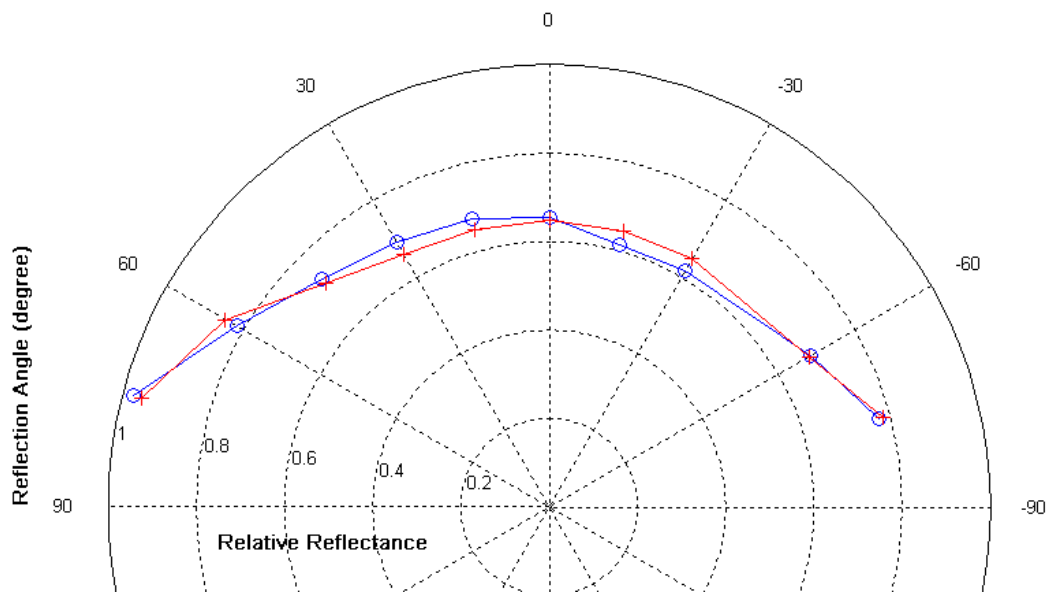
กราฟที่ 31 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



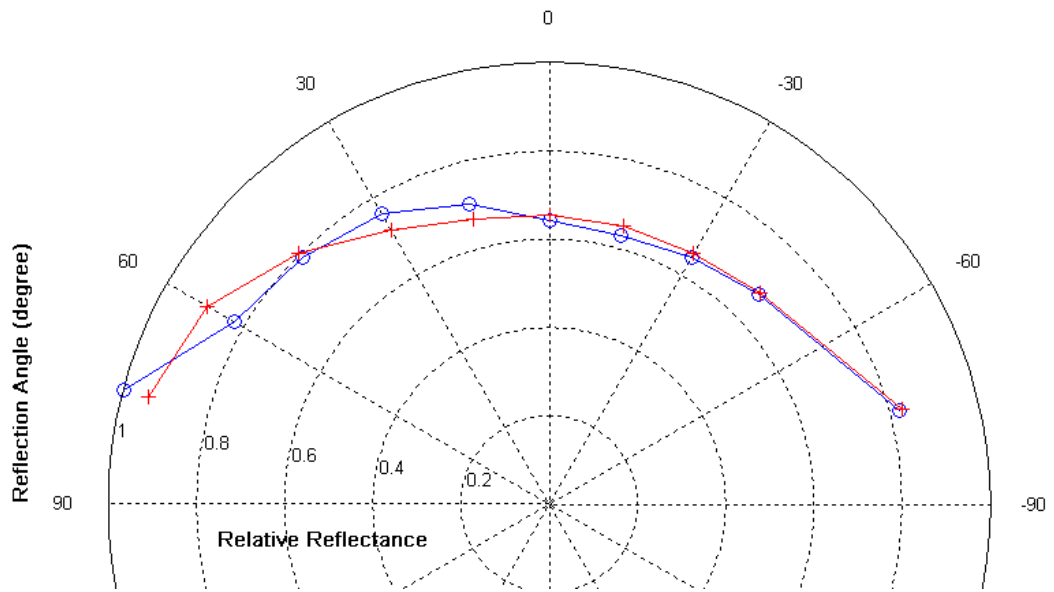
กราฟที่ 32 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



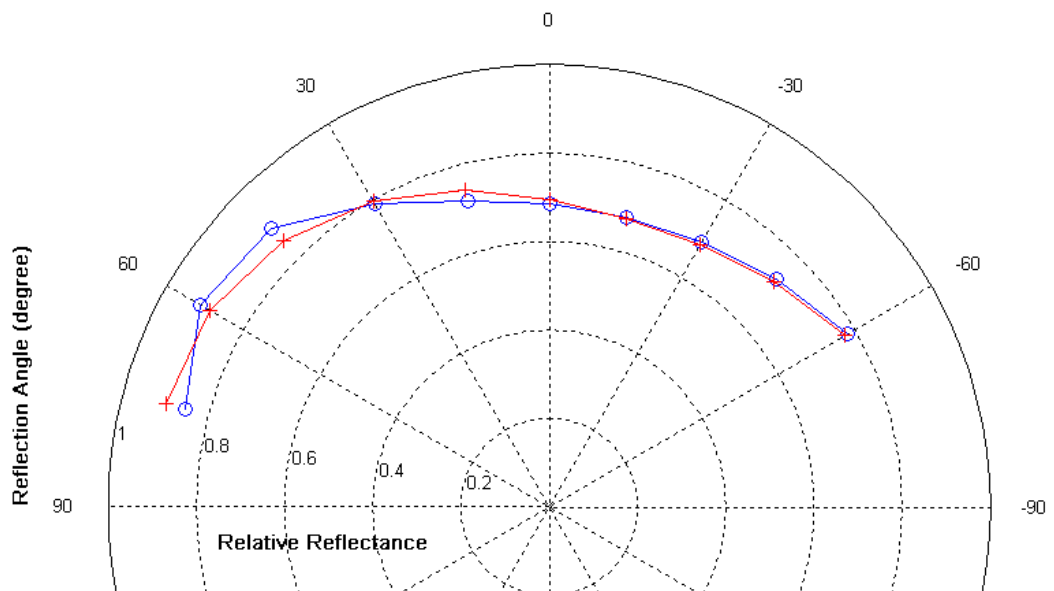
กราฟที่ 33 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมตกกระทบ -30 องศา



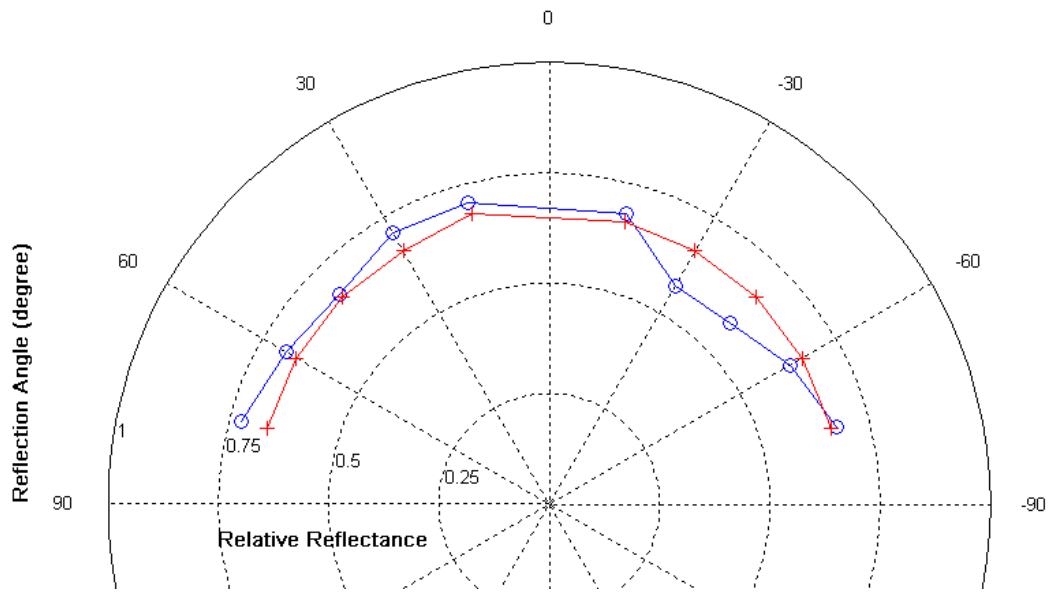
กราฟที่ 34 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมตกกระทบ -45 องศา



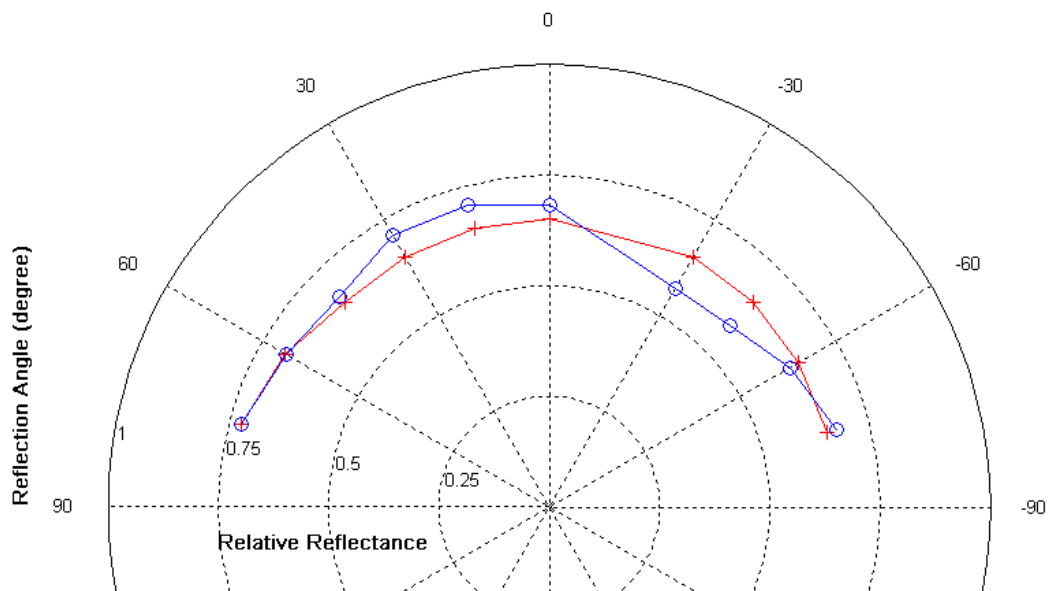
กราฟที่ 35 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



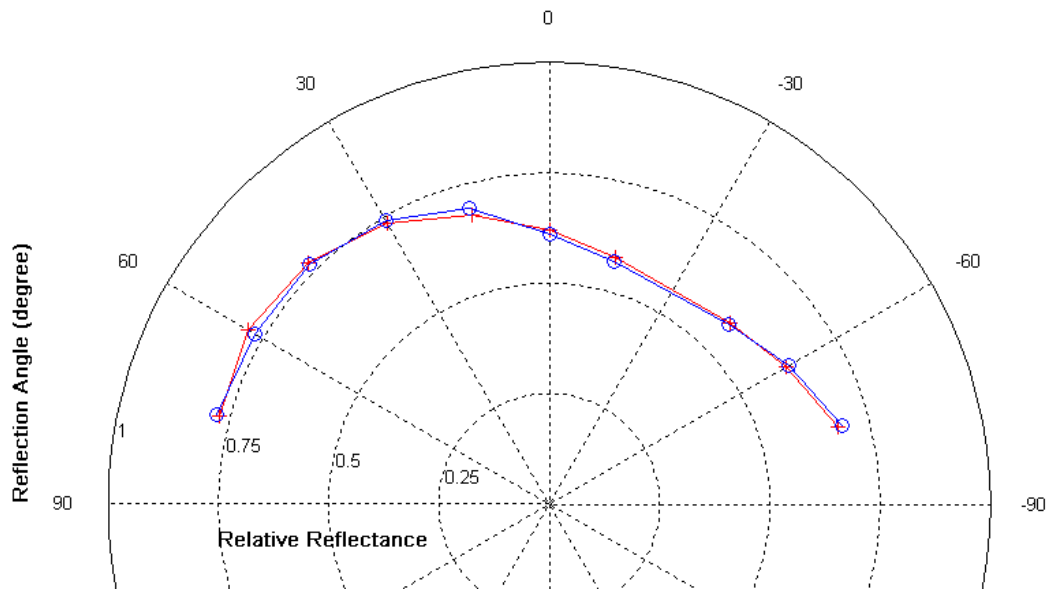
กราฟที่ 36 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



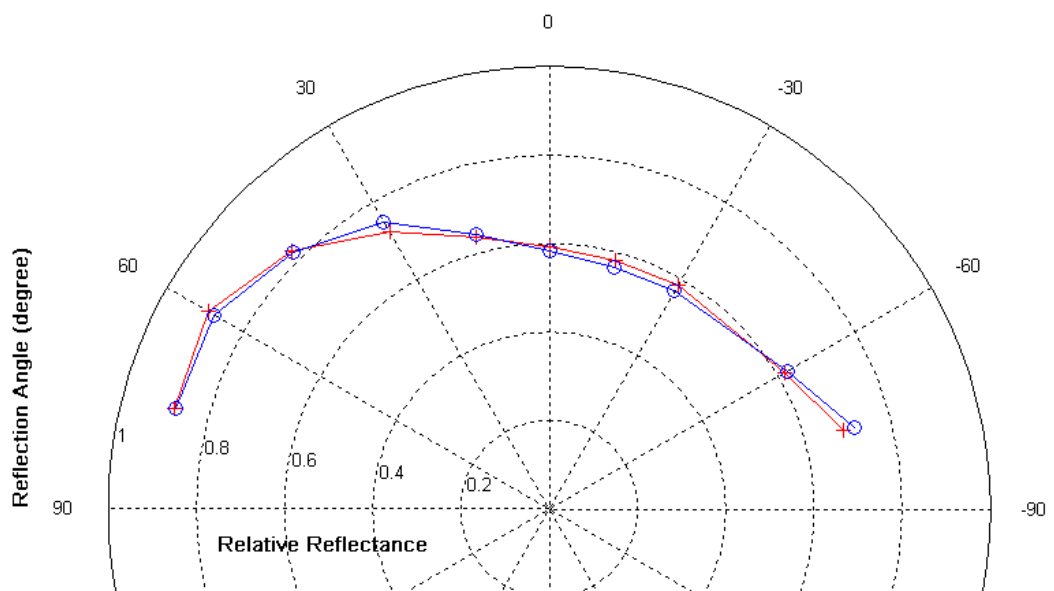
กราฟที่ 37 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



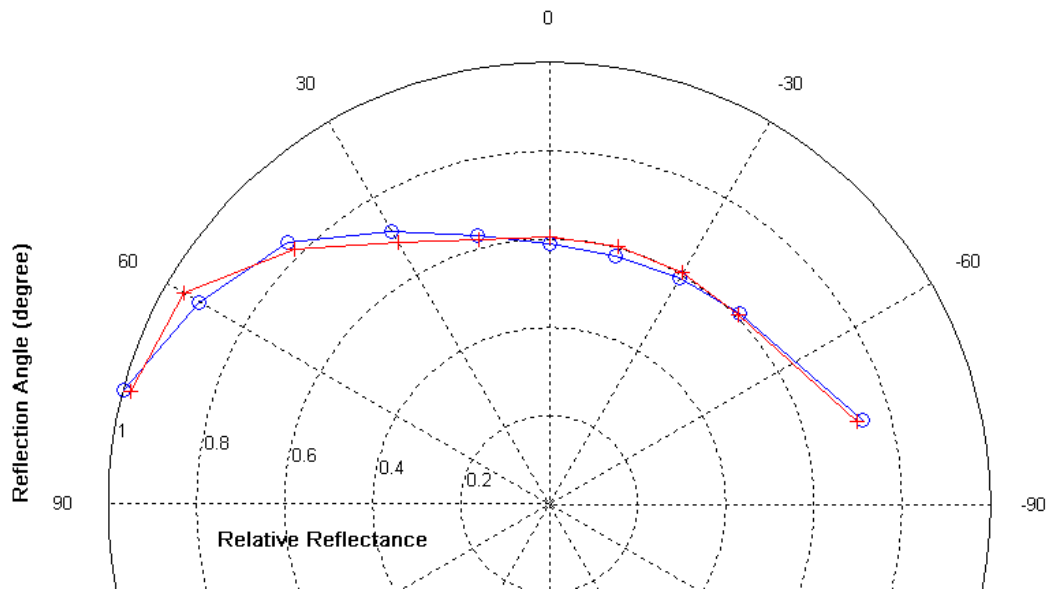
กราฟที่ 38 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



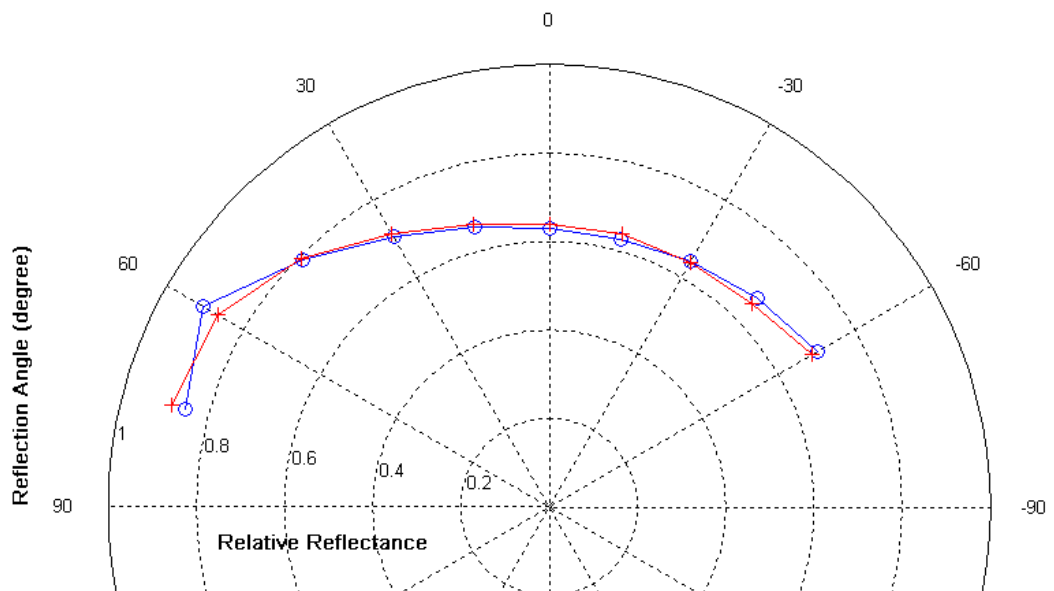
กราฟที่ 39 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



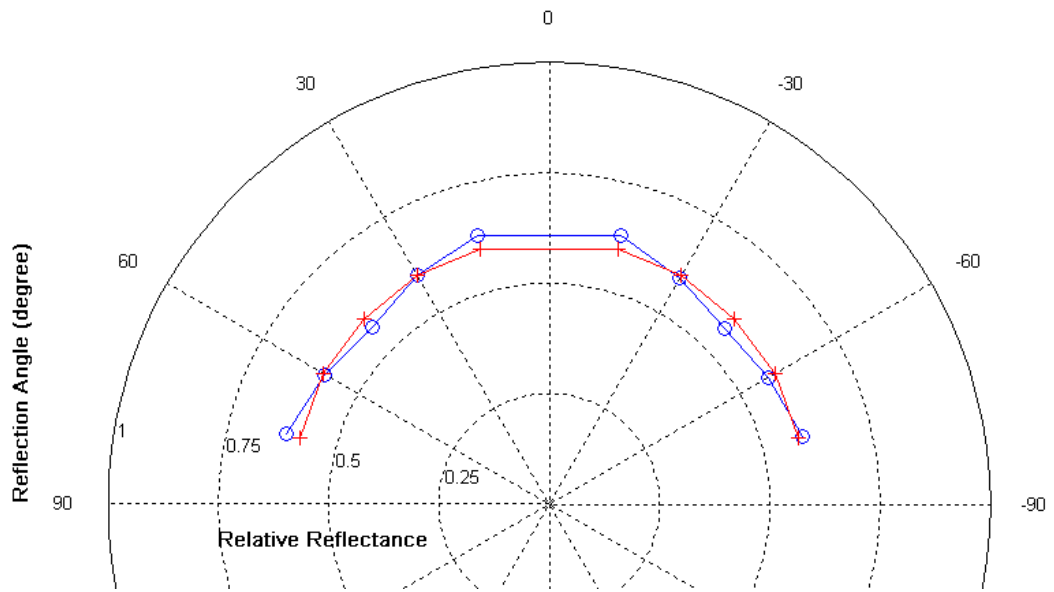
กราฟที่ 40 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



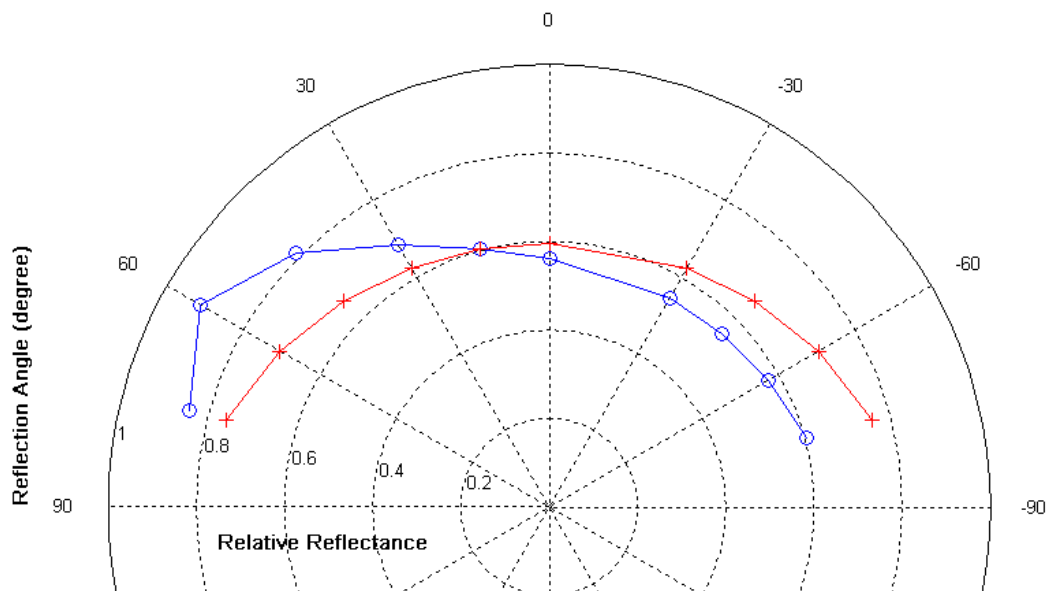
กราฟที่ 41 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



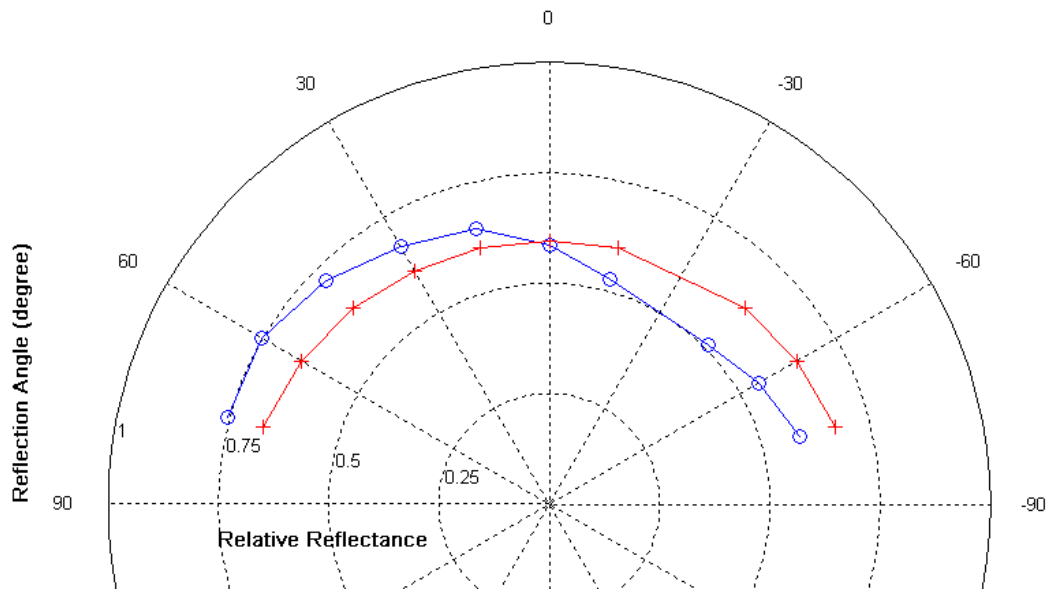
กราฟที่ 42 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



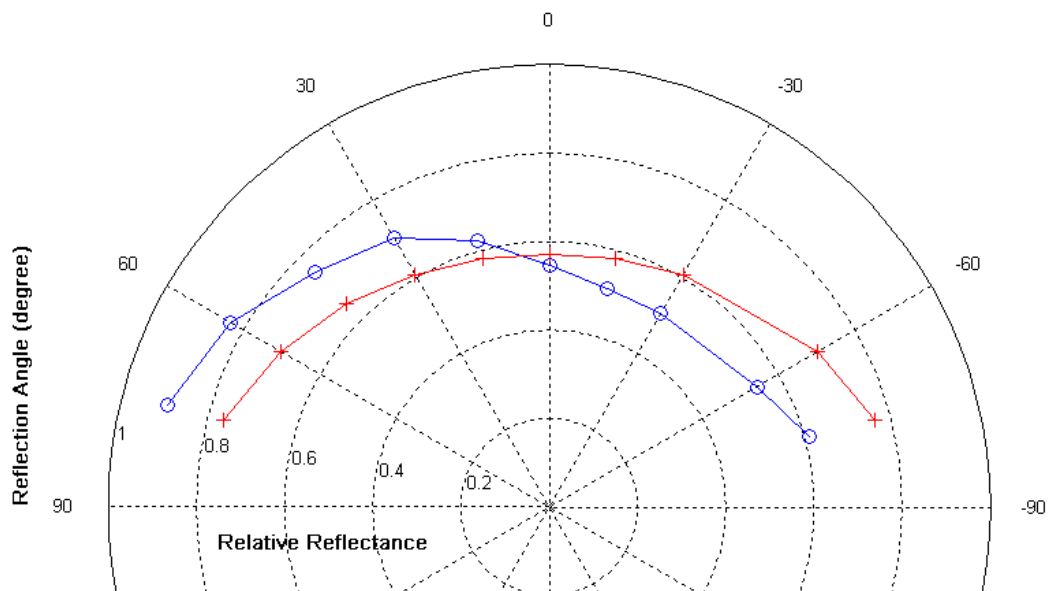
กราฟที่ 43 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



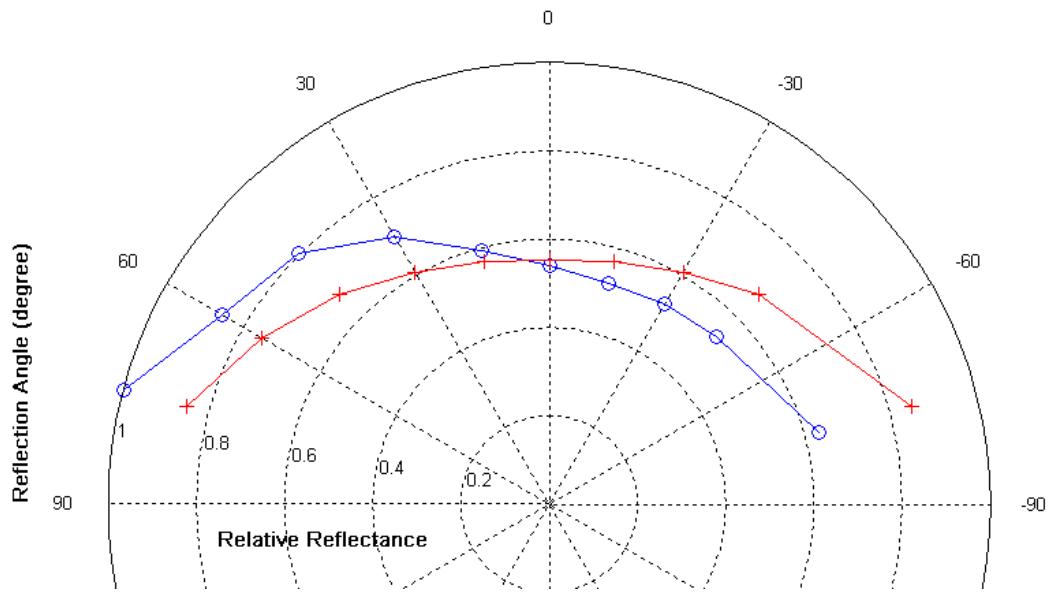
กราฟที่ 44 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



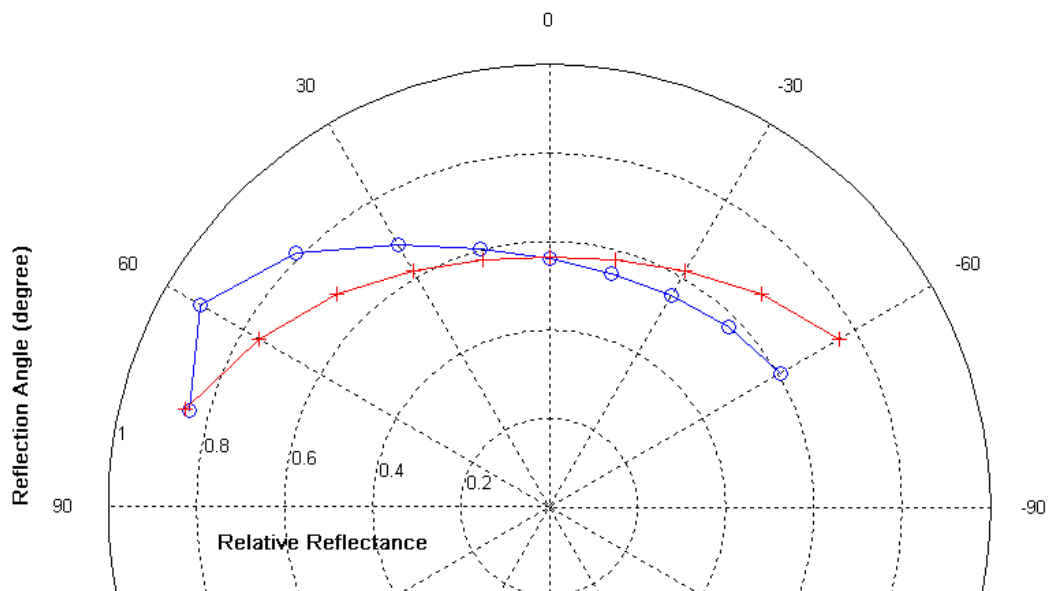
กราฟที่ 45 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



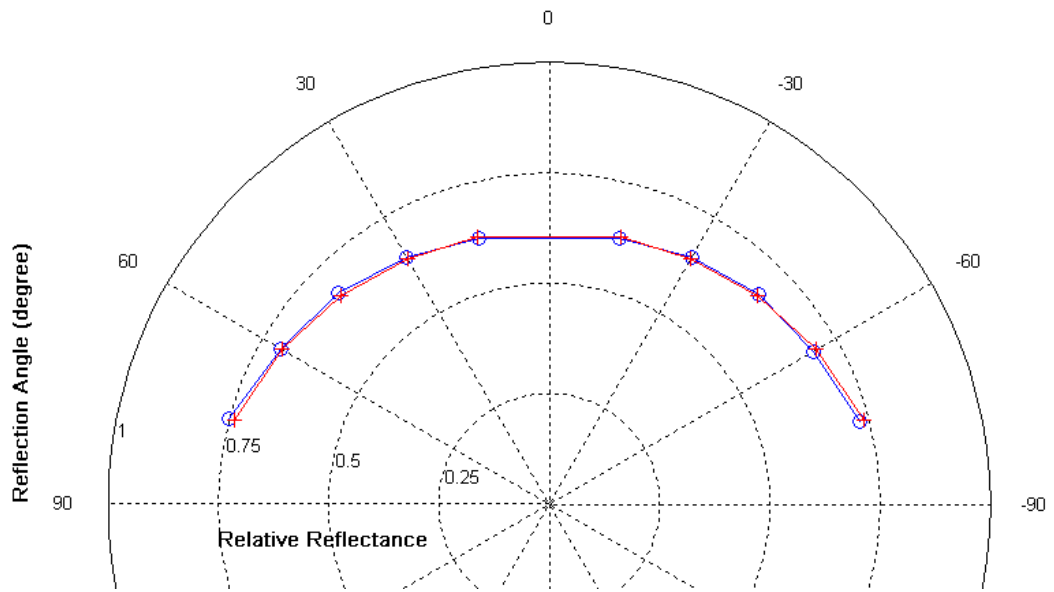
กราฟที่ 46 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



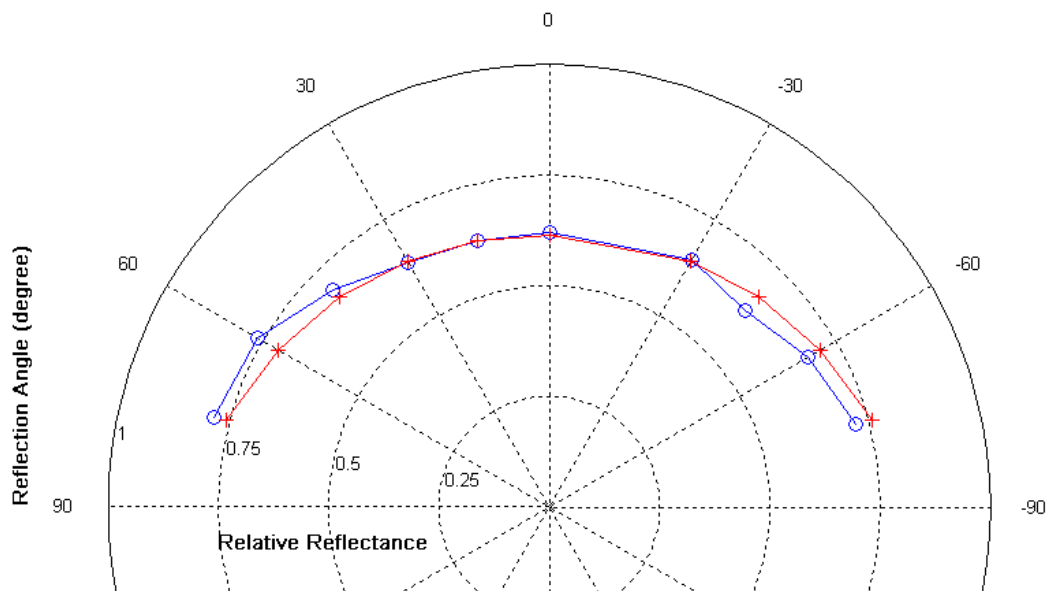
กราฟที่ 47 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



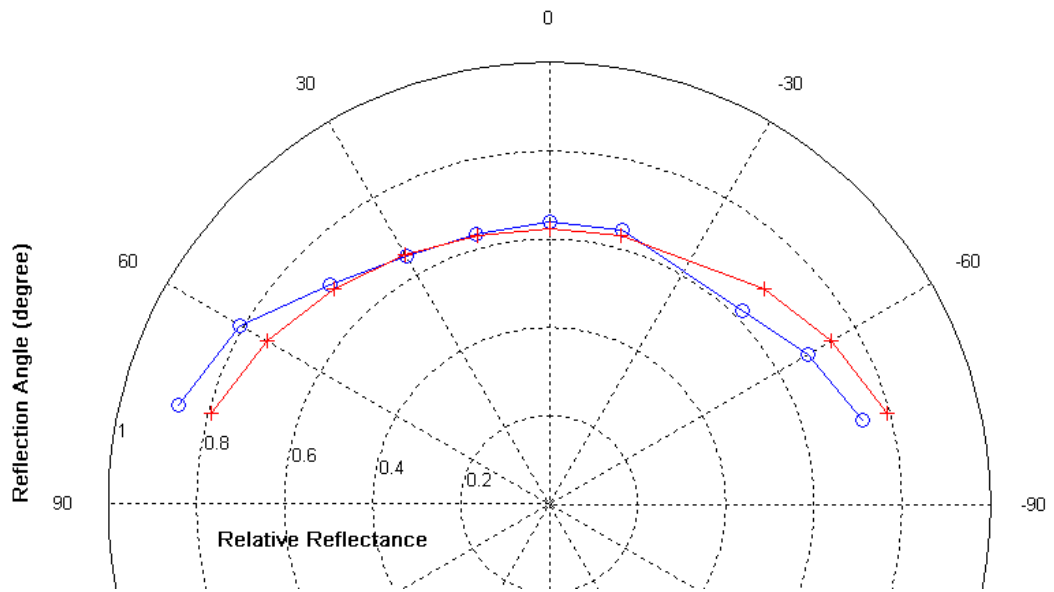
กราฟที่ 48 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



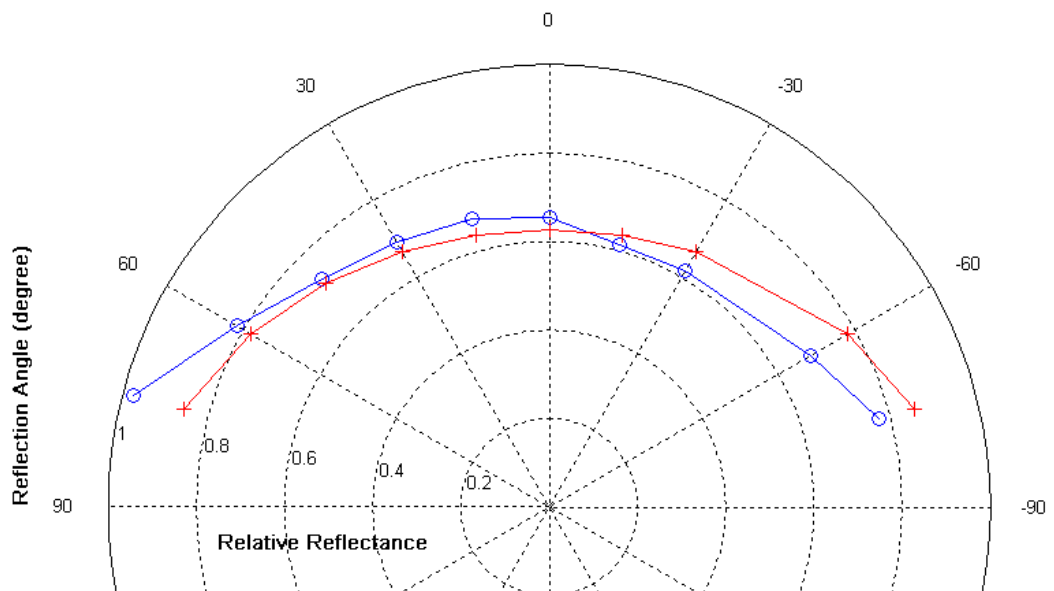
กราฟที่ 49 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



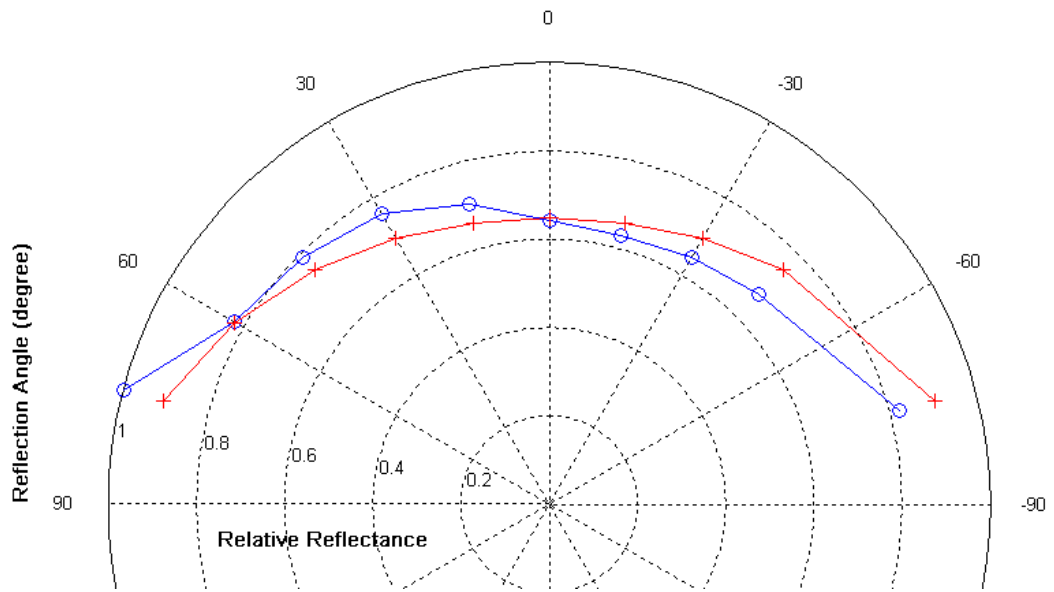
กราฟที่ 50 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



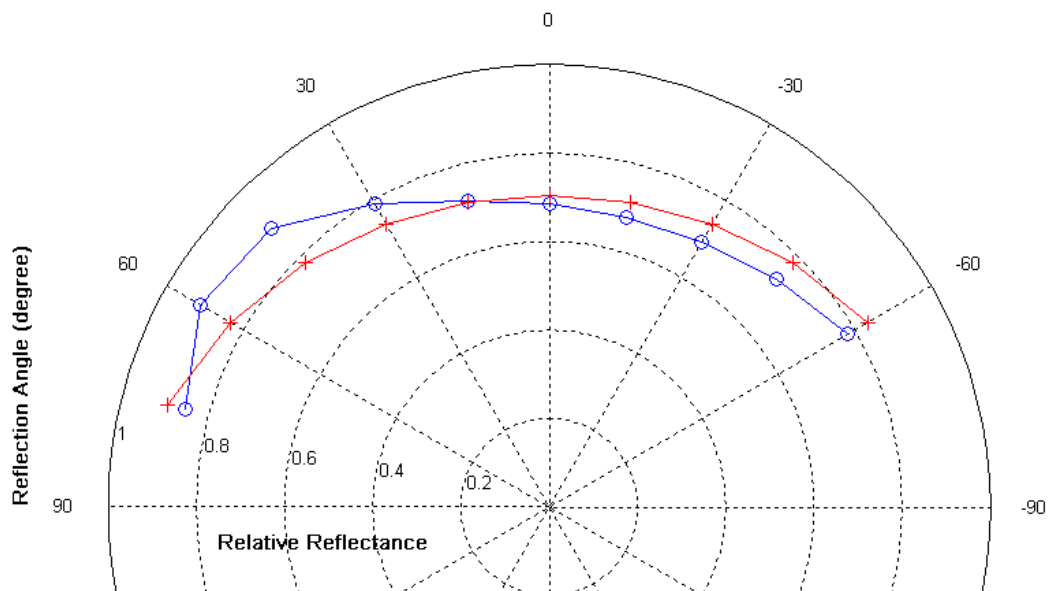
กราฟที่ 51 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมุมตกกระทบ -30 องศา



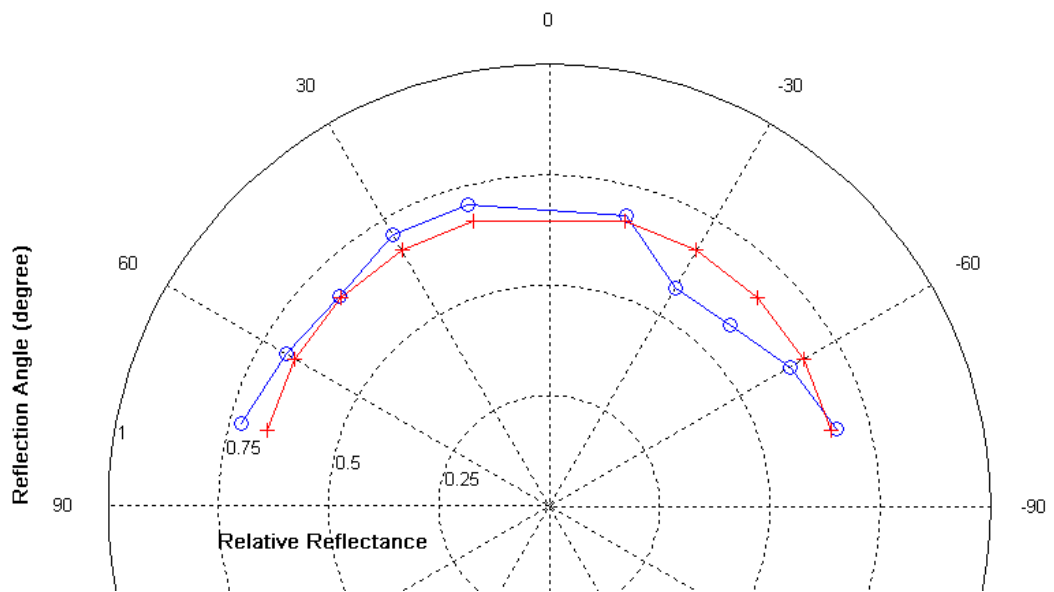
กราฟที่ 52 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมุมตกกระทบ -45 องศา



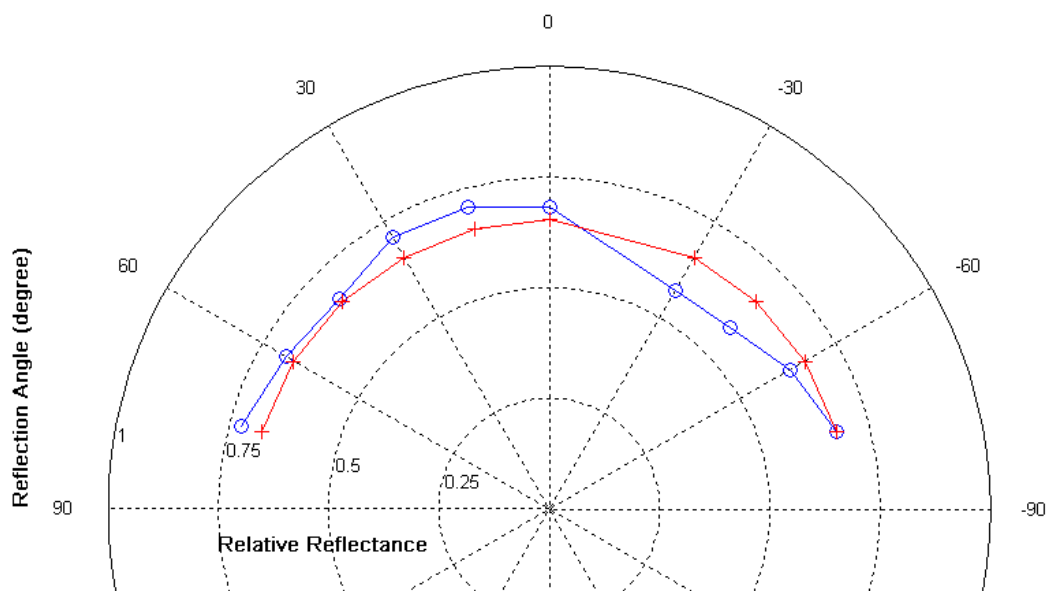
กราฟที่ 53 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



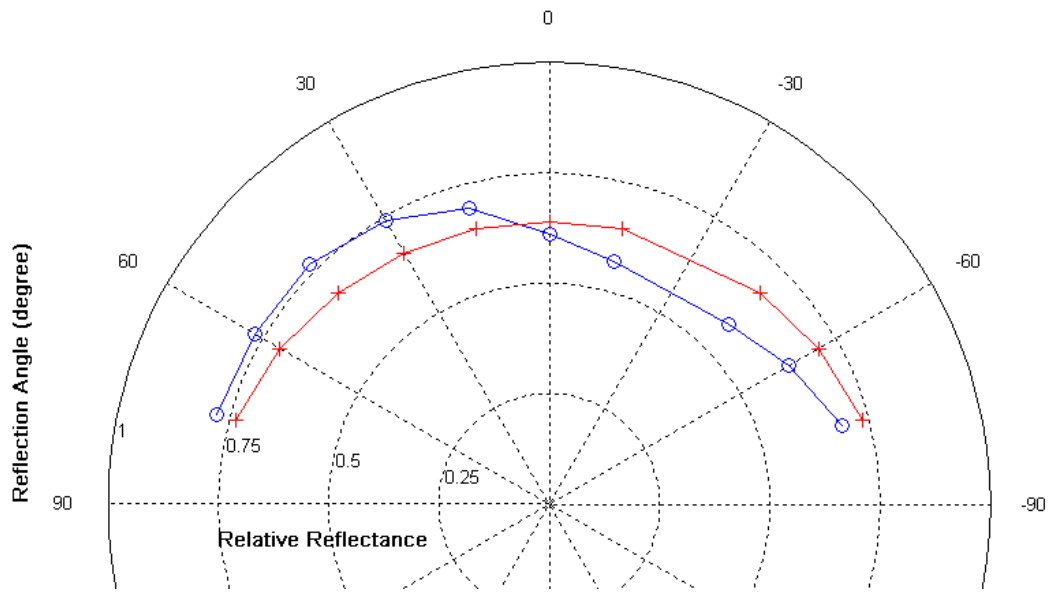
กราฟที่ 54 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



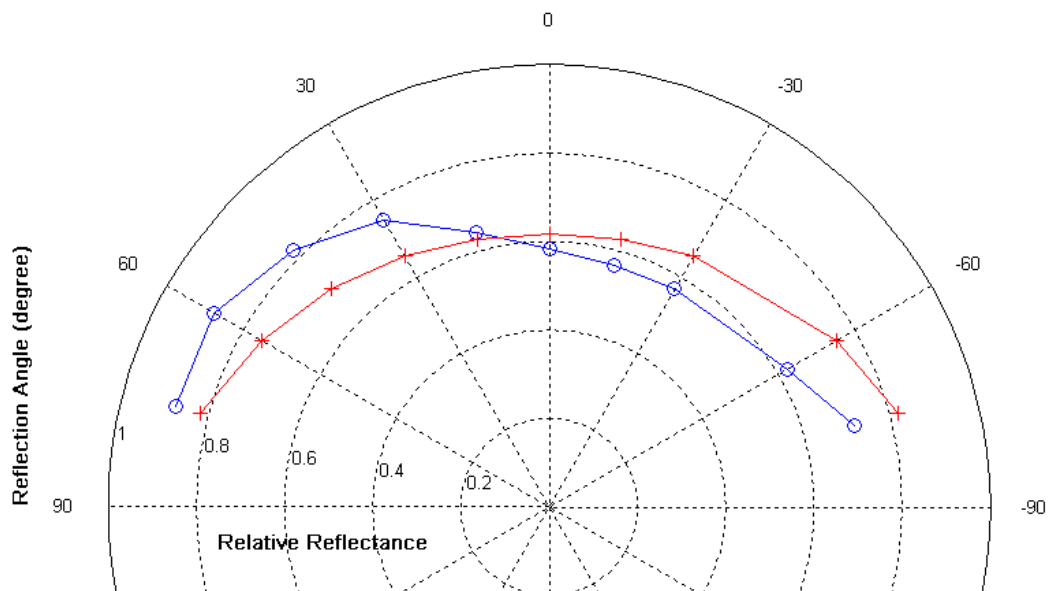
กราฟที่ 55 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



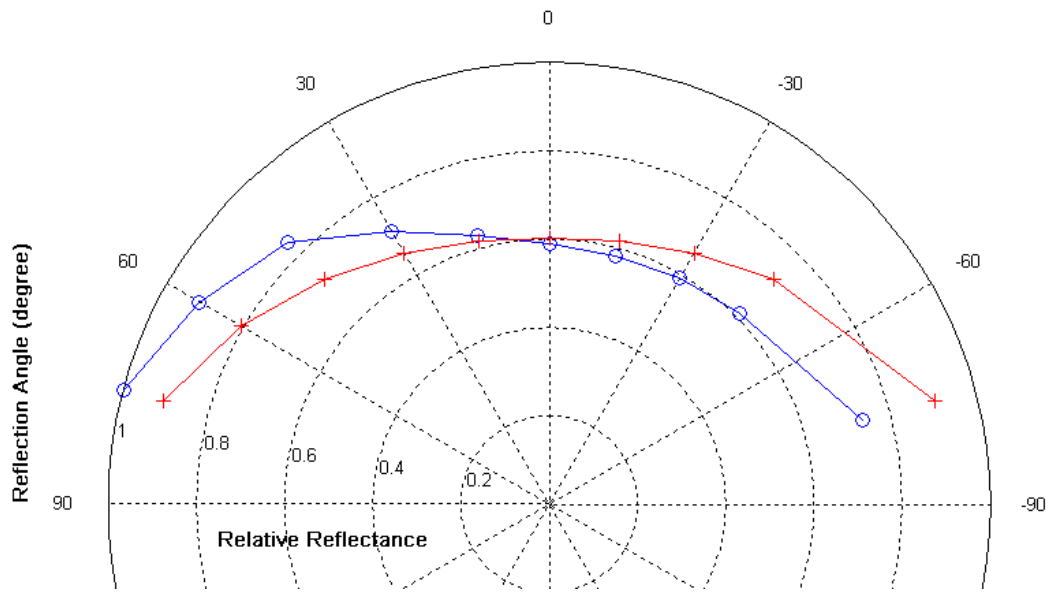
กราฟที่ 56 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



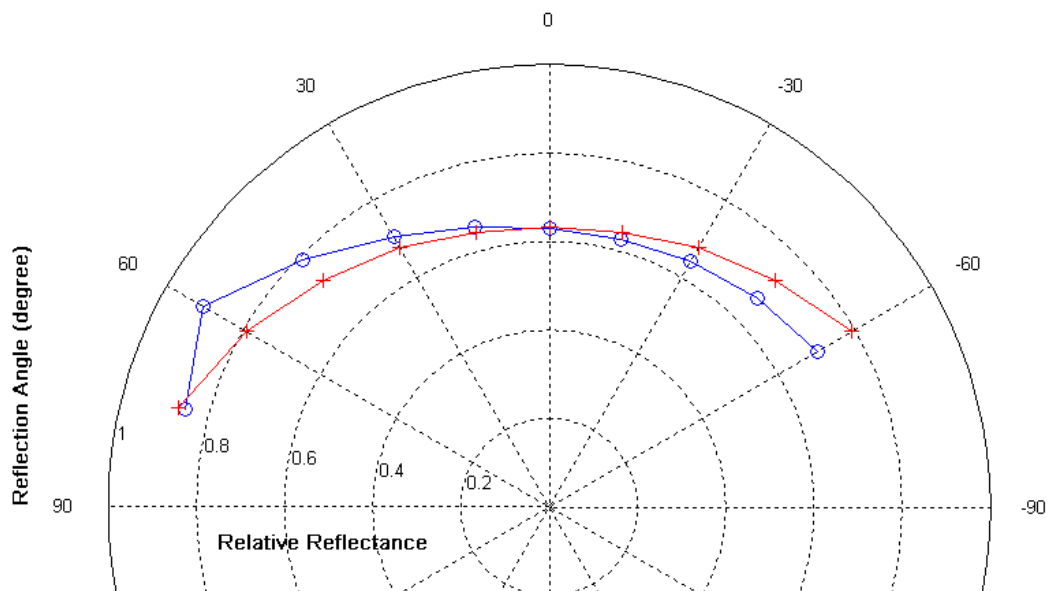
กราฟที่ 57 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



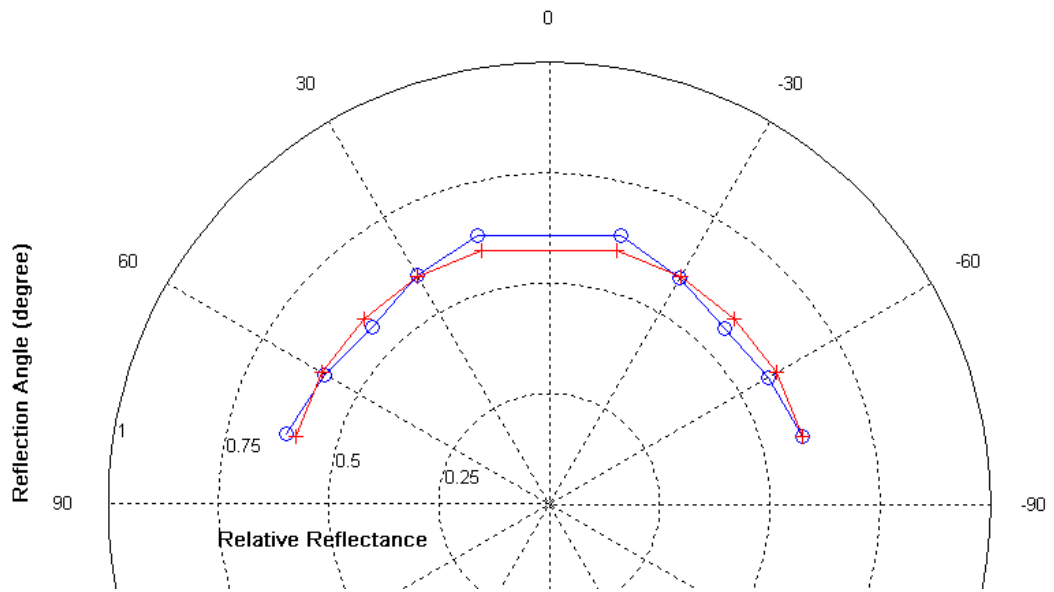
กราฟที่ 58 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



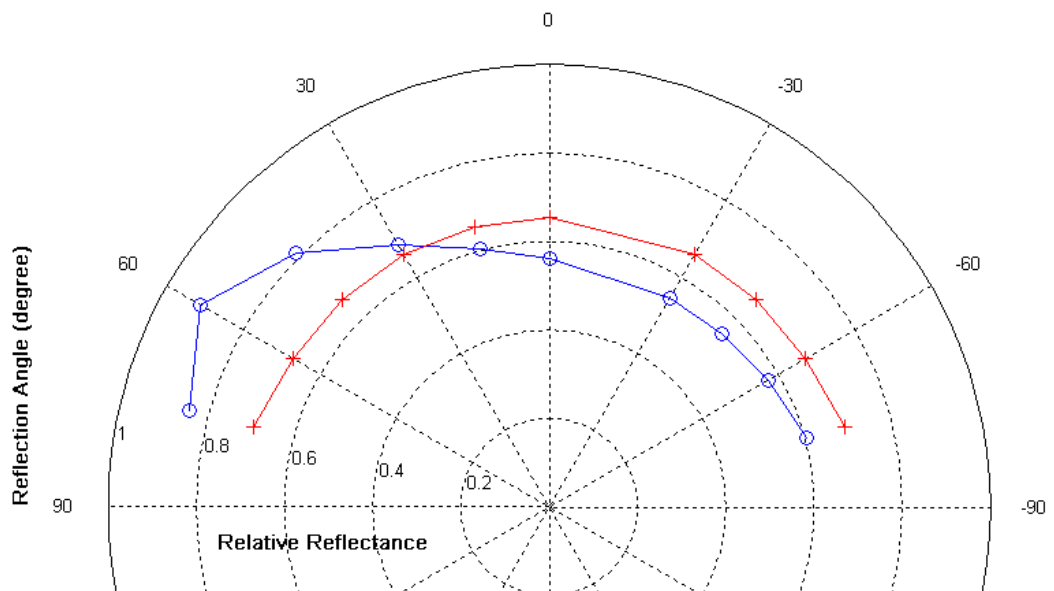
กราฟที่ 59 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มีมุมตกกระทบ -60 องศา



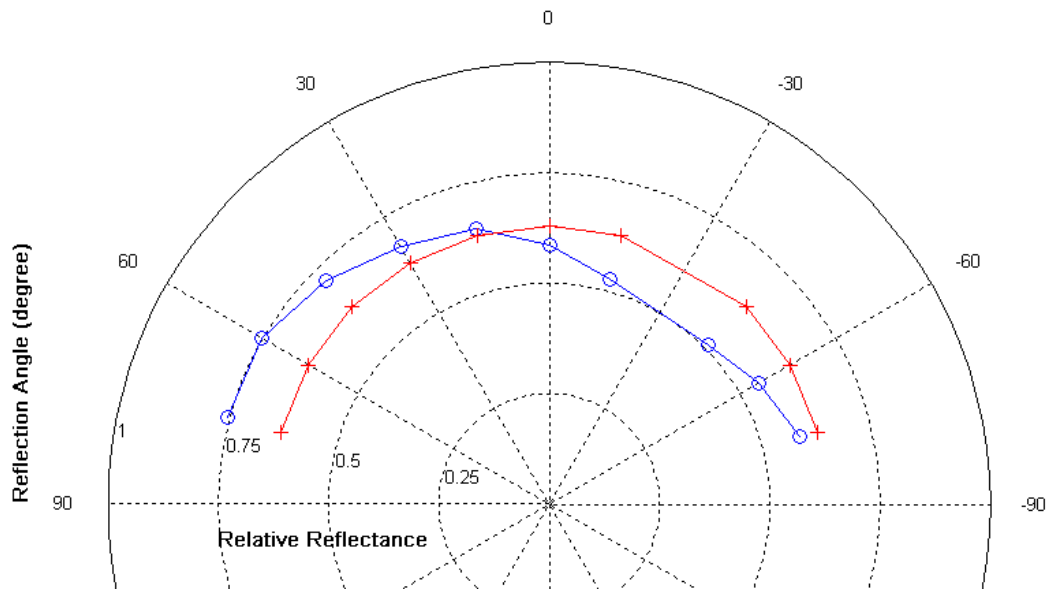
กราฟที่ 60 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจากPhong reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มีมุมตกกระทบ -75 องศา



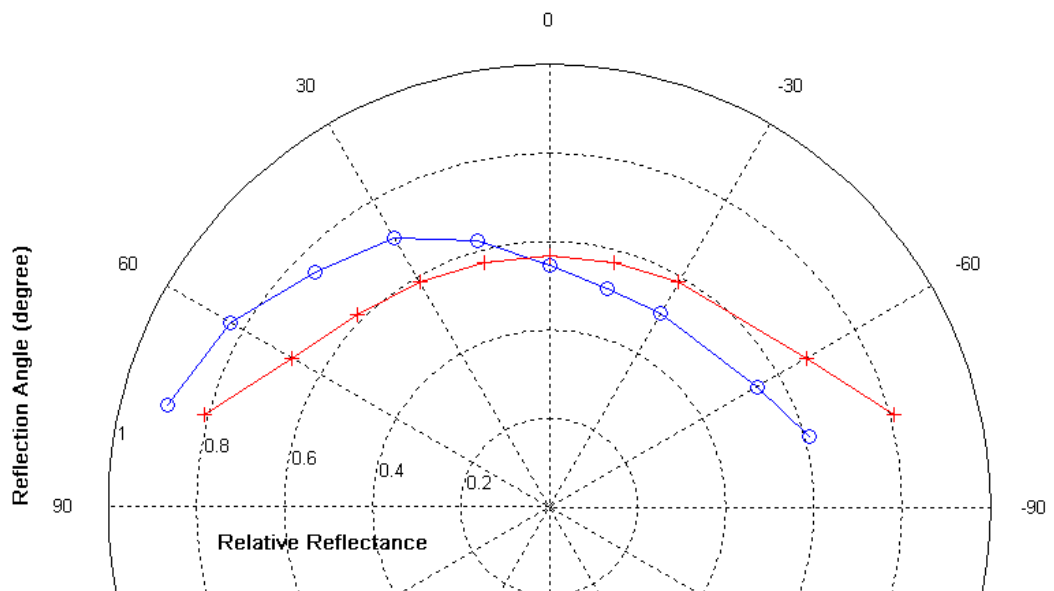
กราฟที่ 61 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



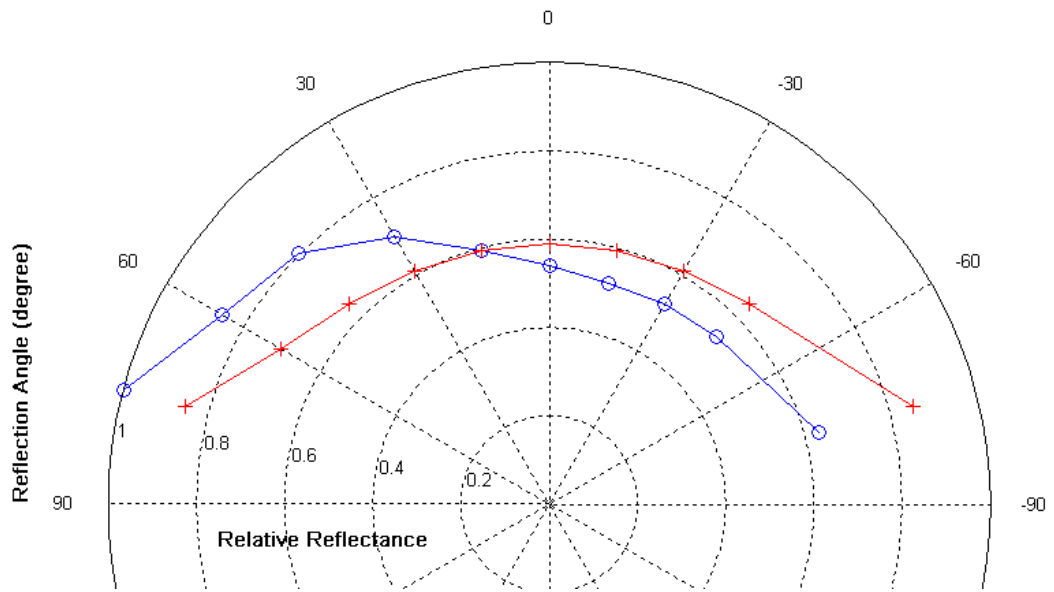
กราฟที่ 62 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



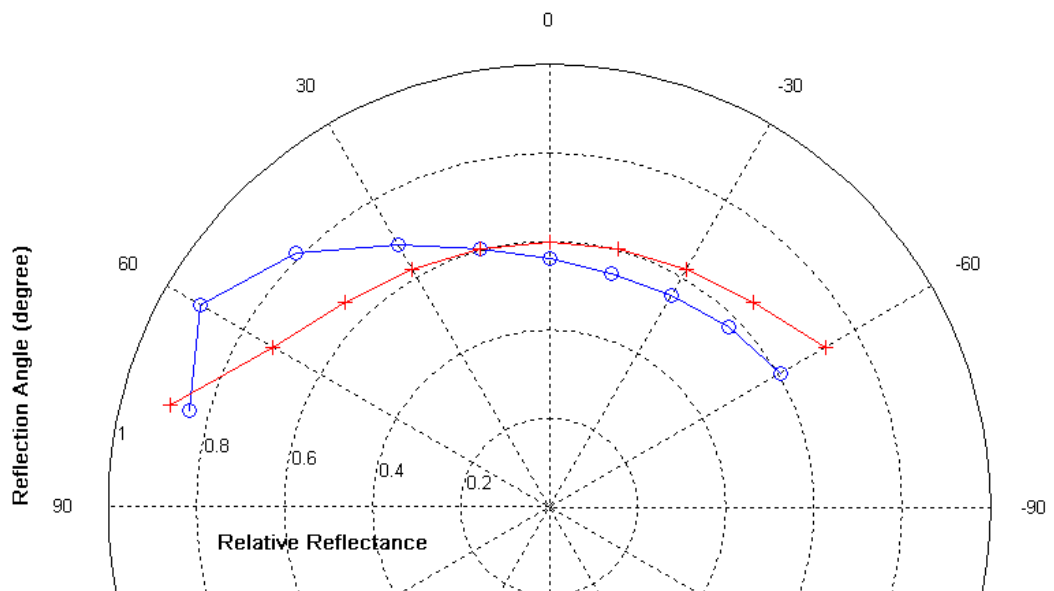
กราฟที่ 63 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



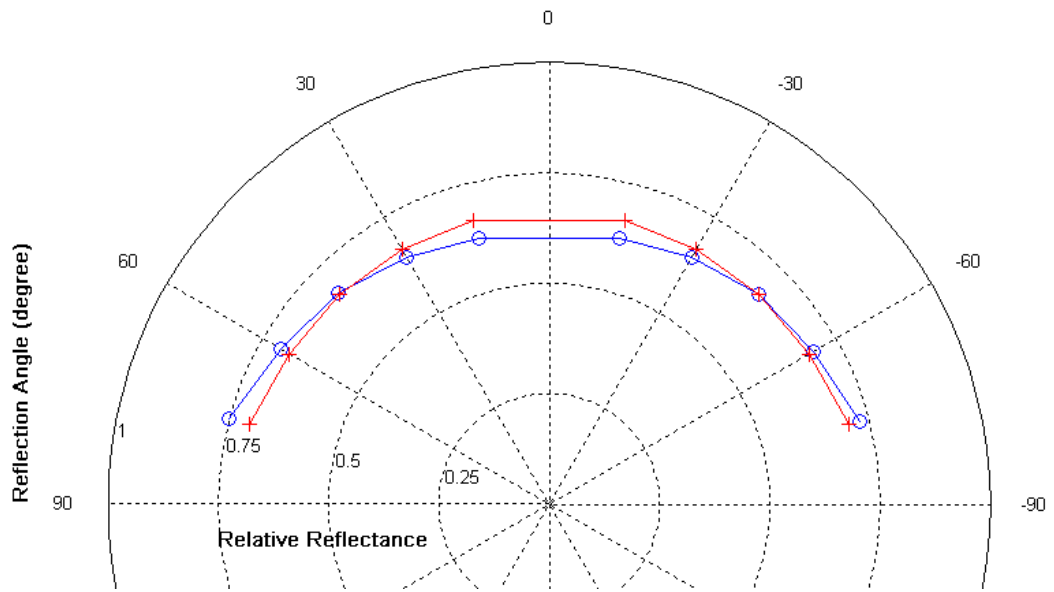
กราฟที่ 64 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



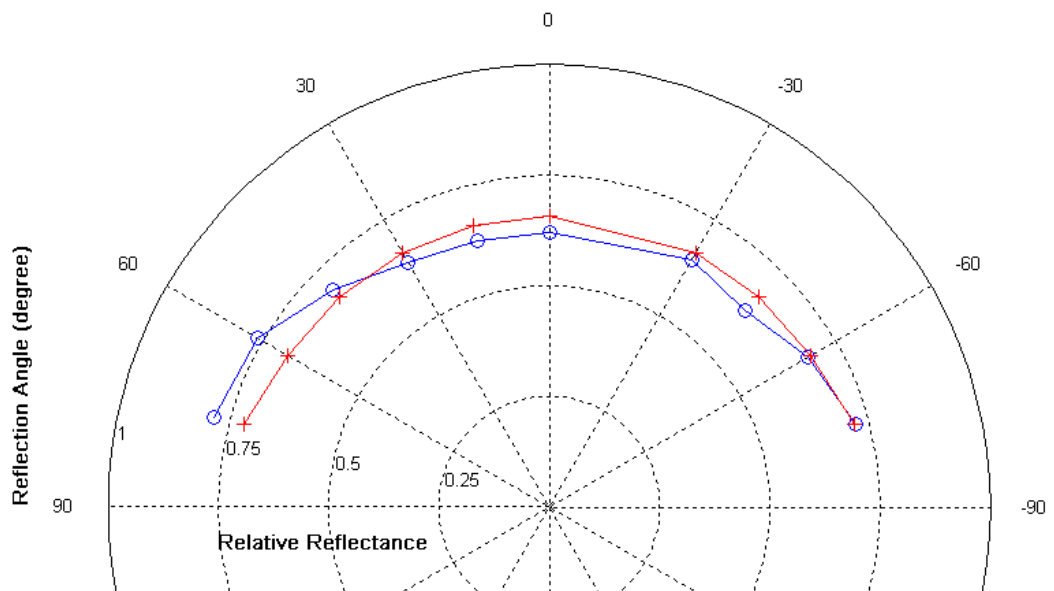
กราฟที่ 65 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



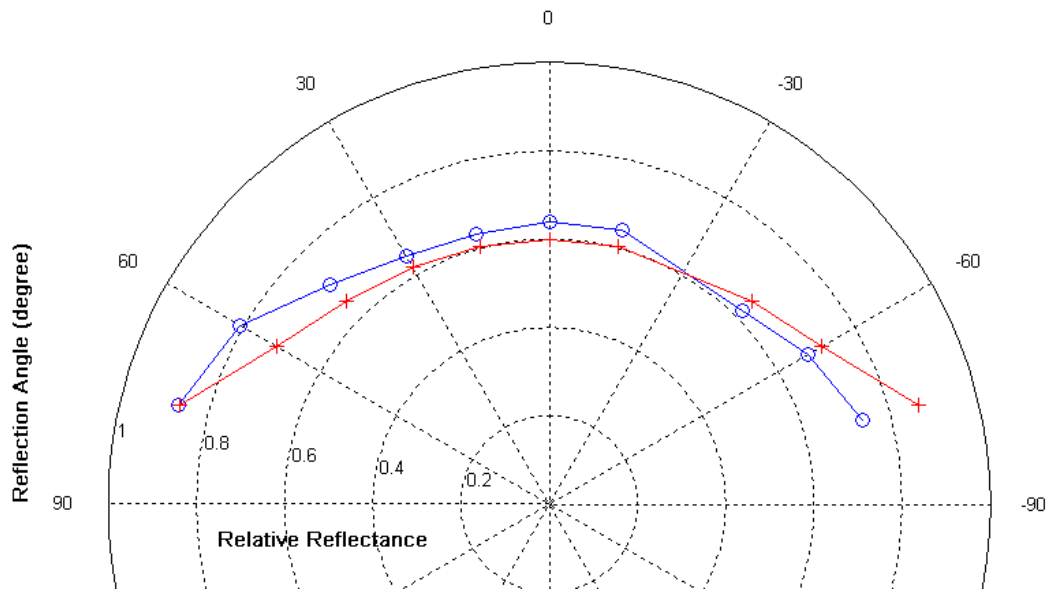
กราฟที่ 66 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



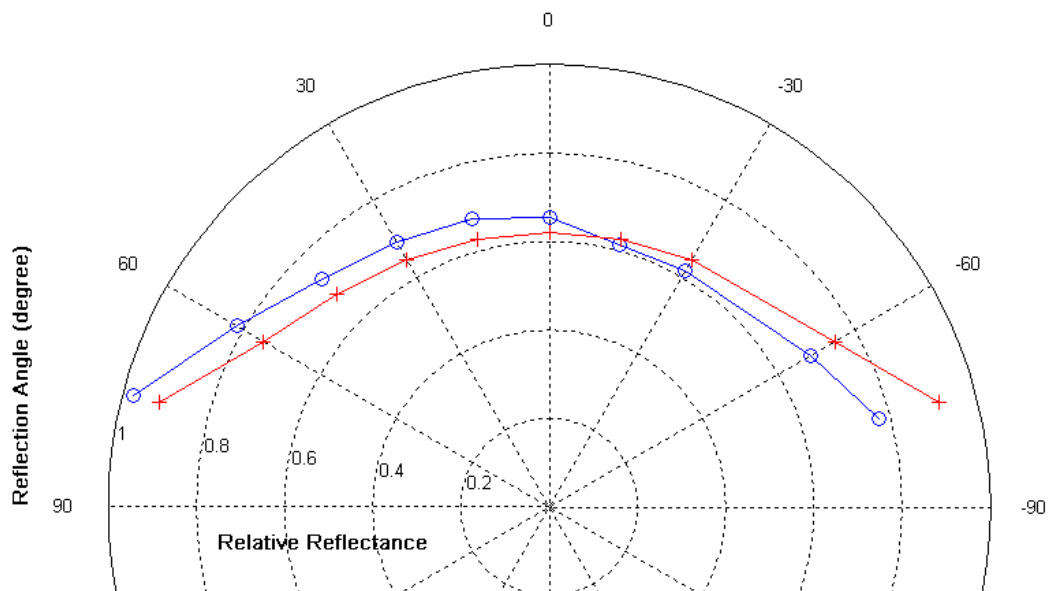
กราฟที่ 67 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



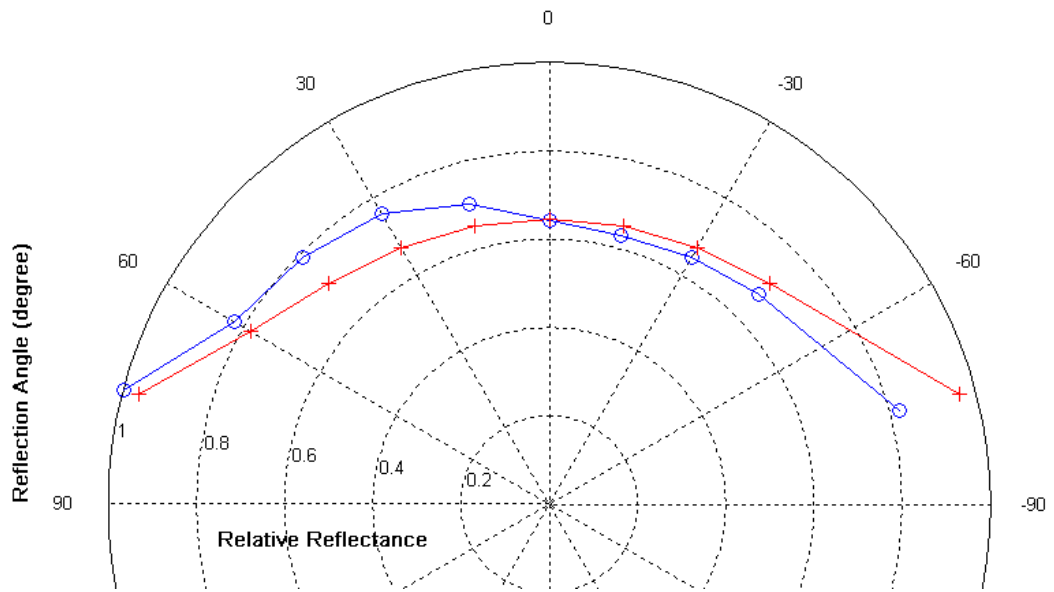
กราฟที่ 68 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



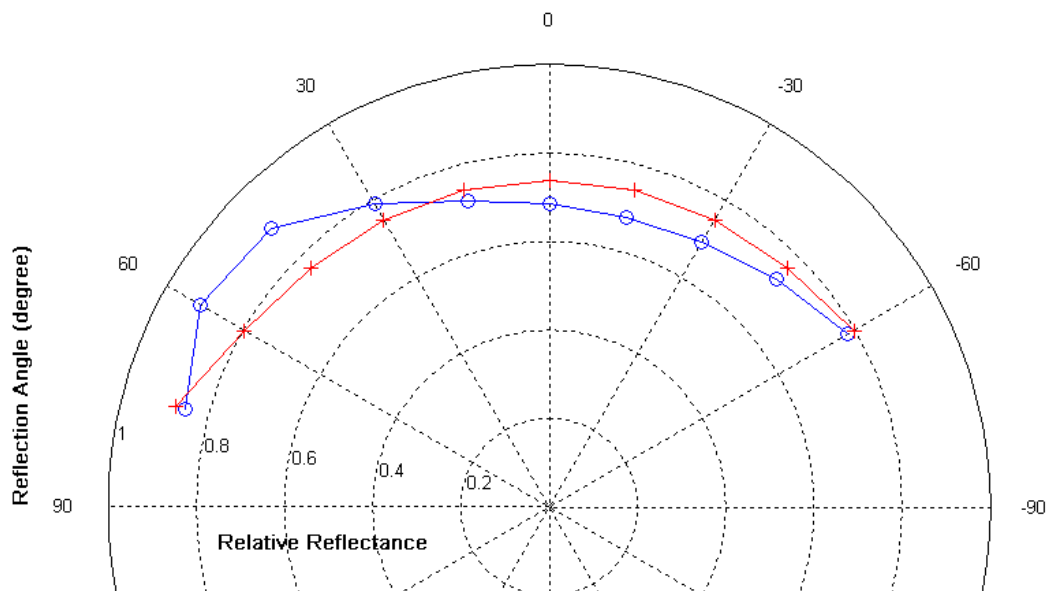
กราฟที่ 69 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



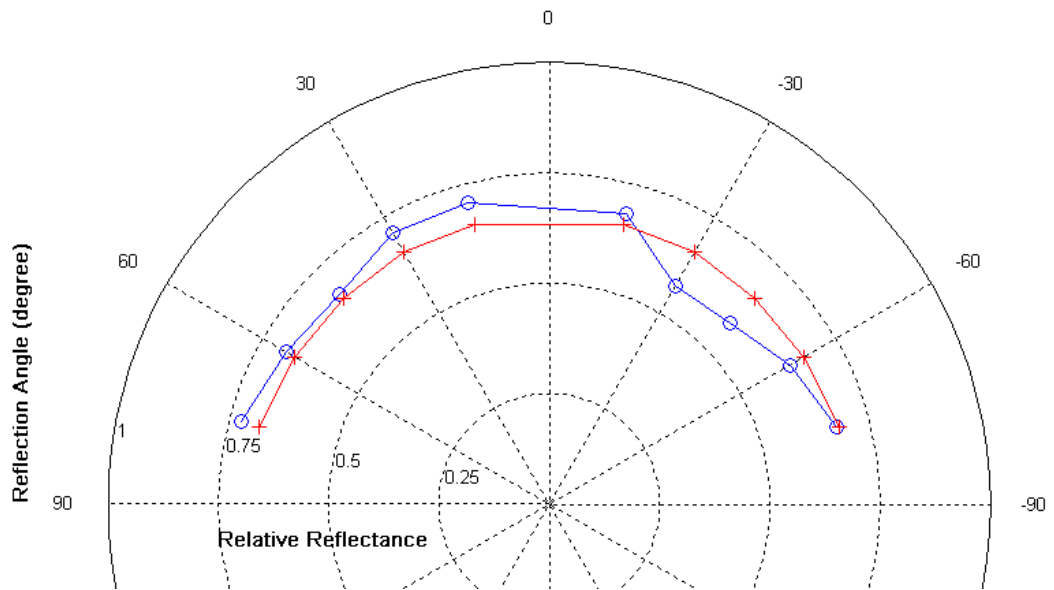
กราฟที่ 70 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



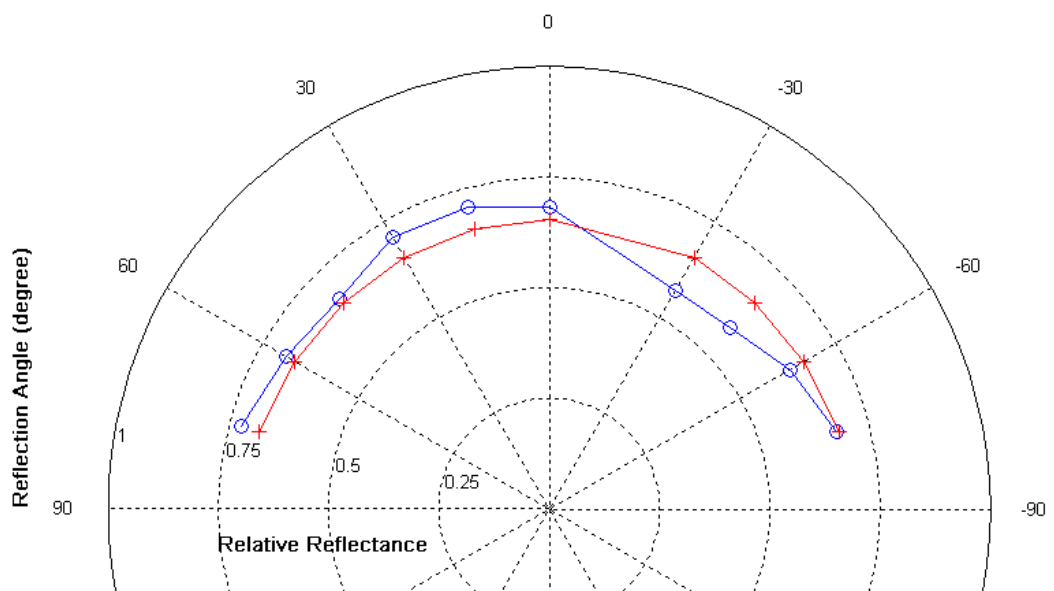
กราฟที่ 71 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



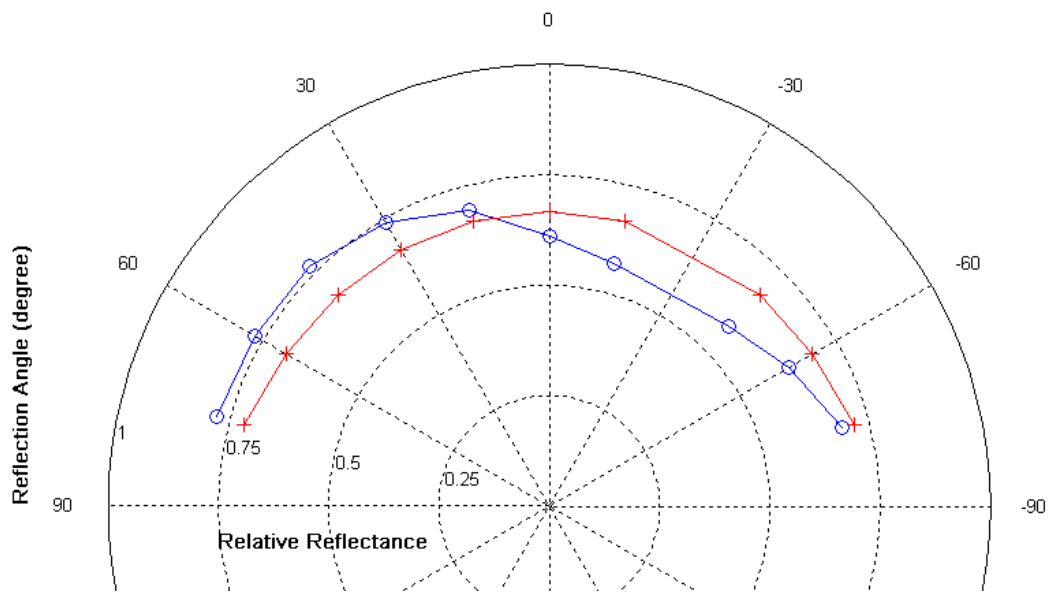
กราฟที่ 72 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



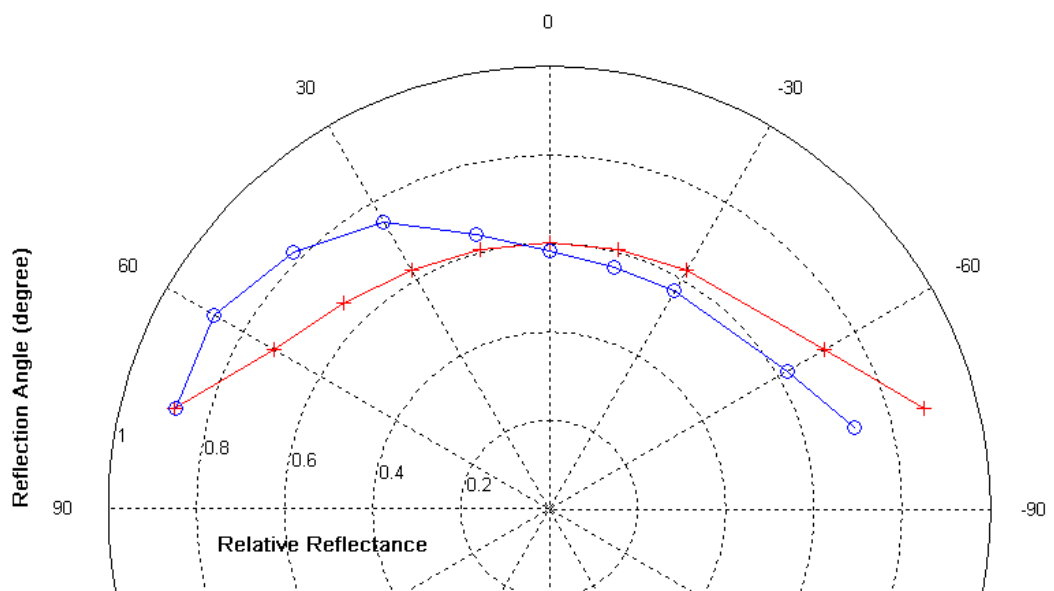
กราฟที่ 73 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



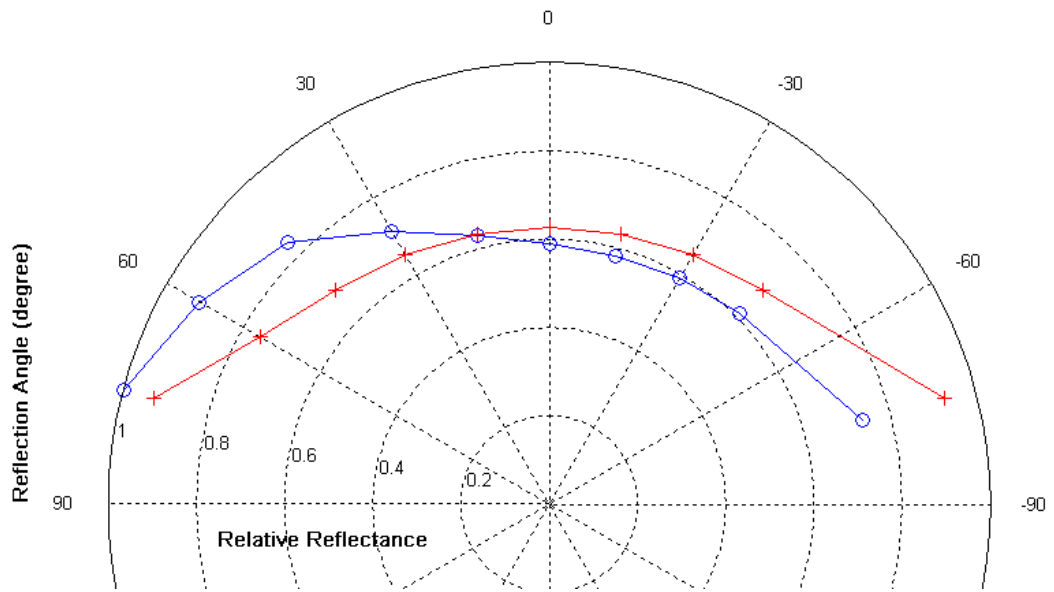
กราฟที่ 74 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



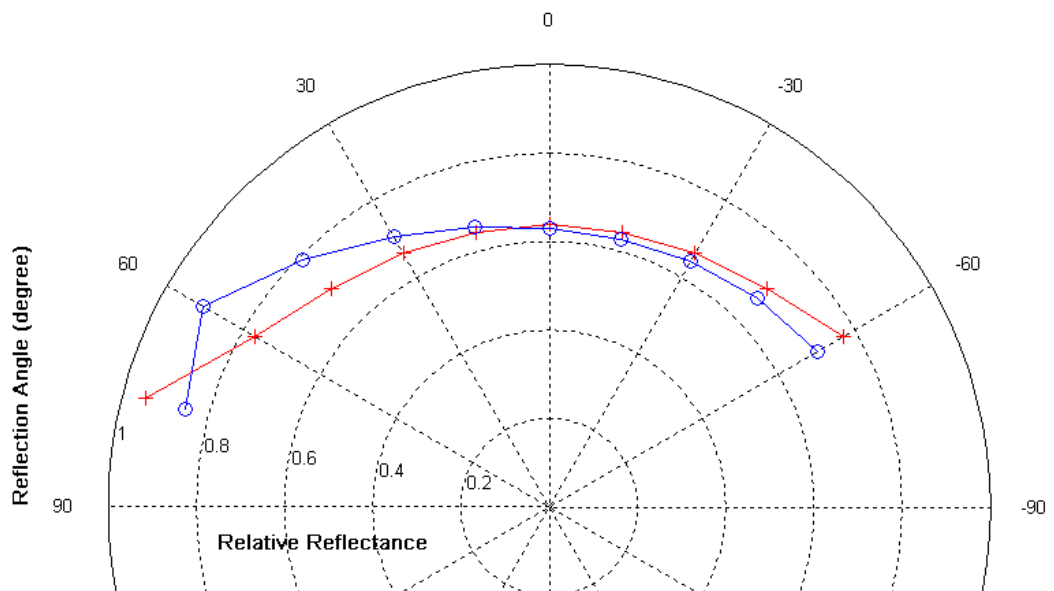
กราฟที่ 75 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



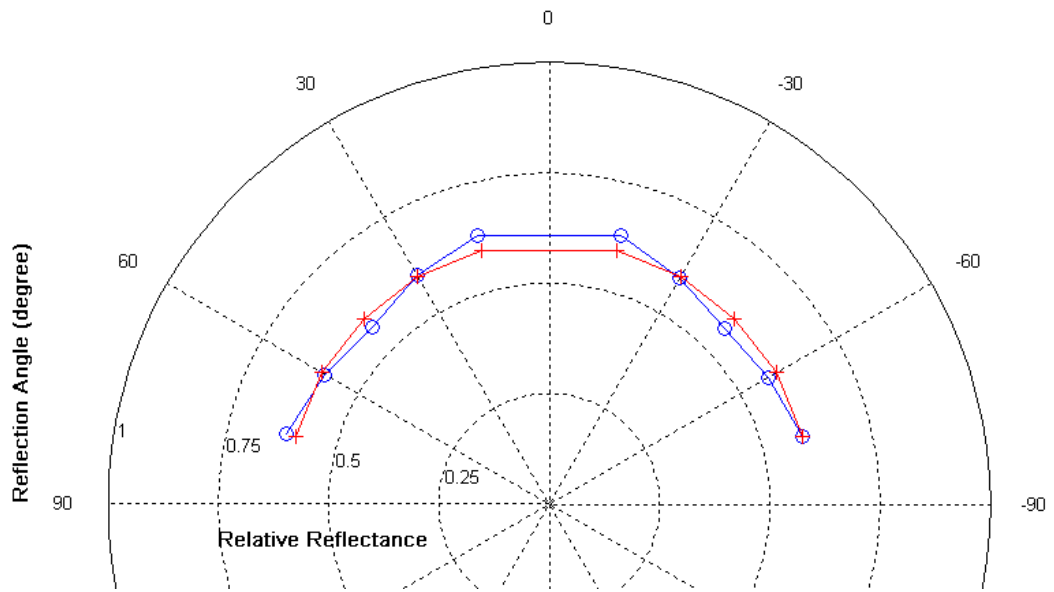
กราฟที่ 76 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



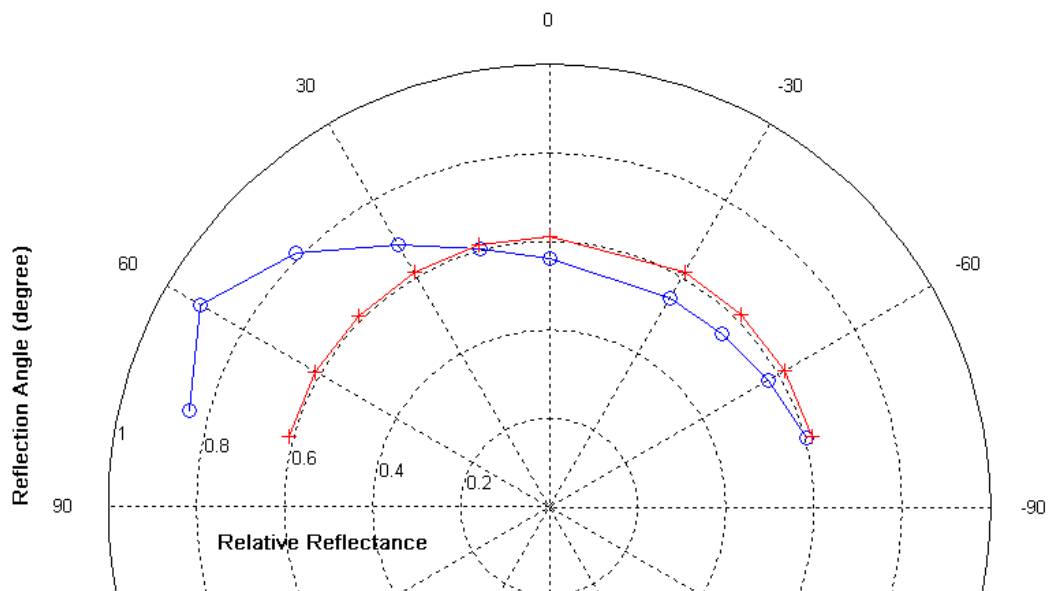
กราฟที่ 77 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



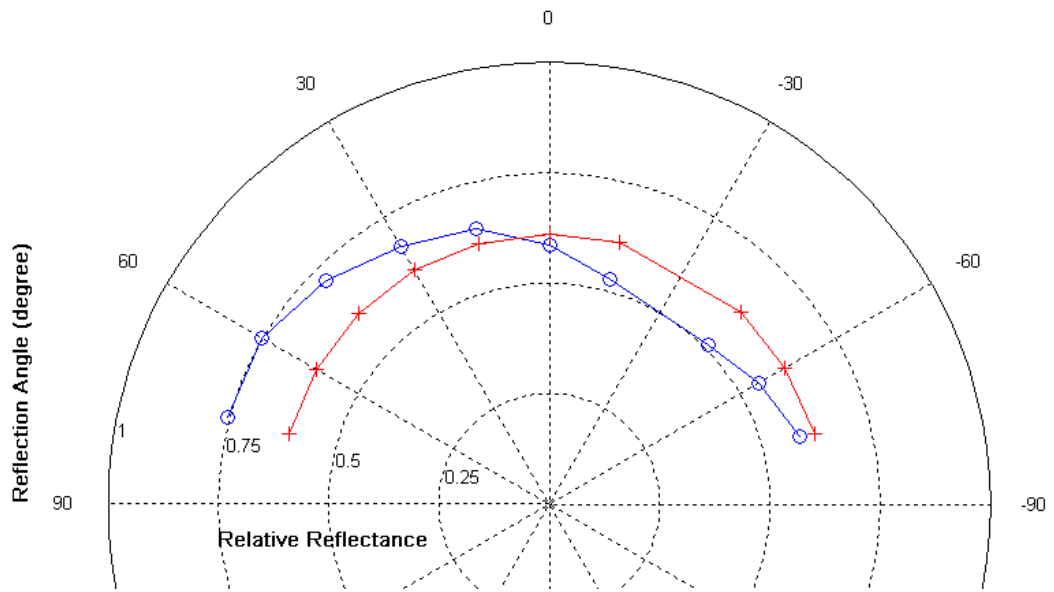
กราฟที่ 78 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



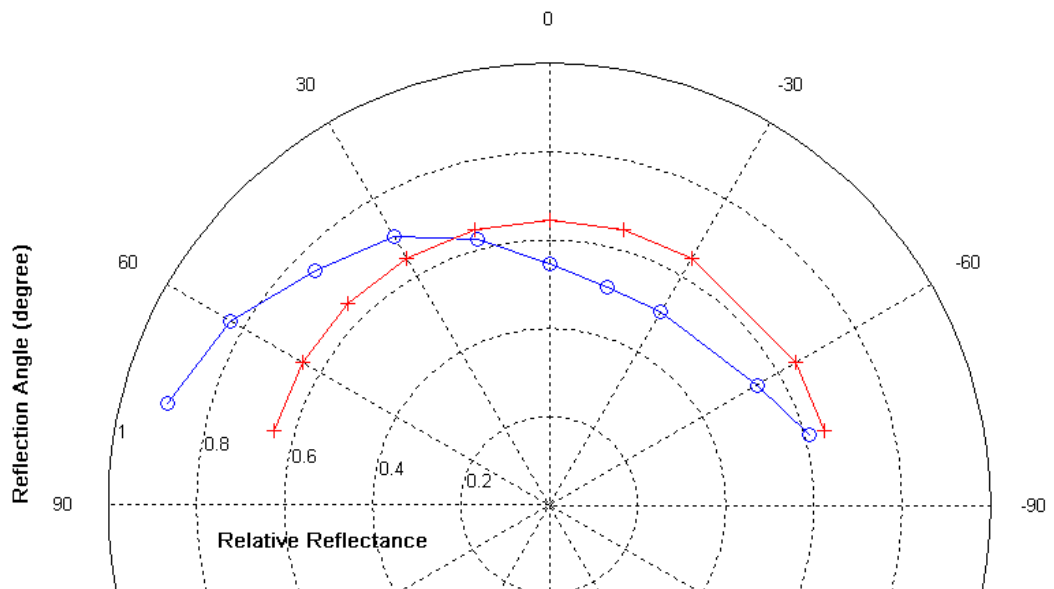
กราฟที่ 79 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



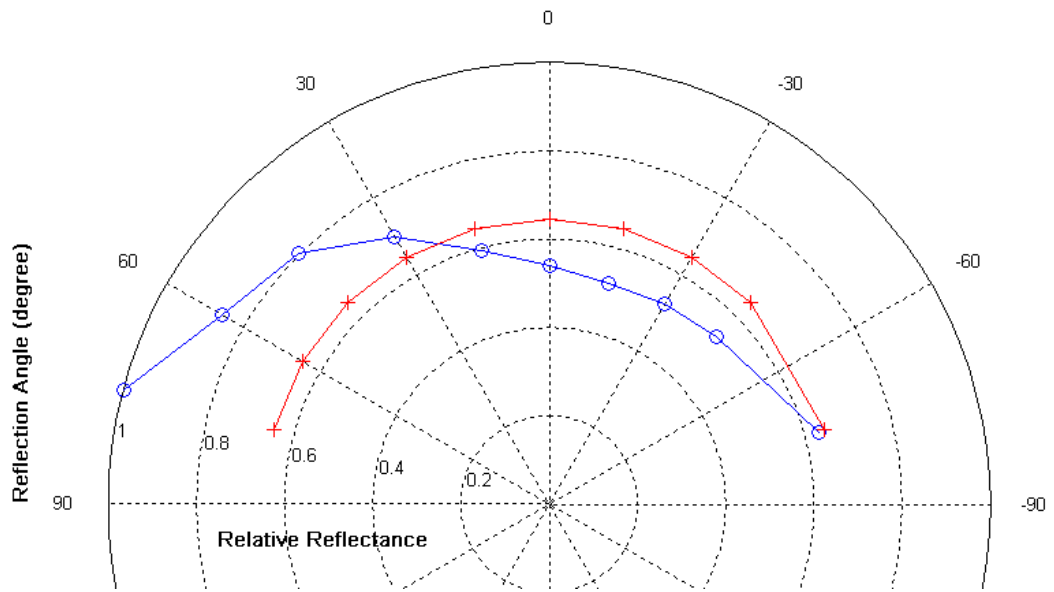
กราฟที่ 80 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



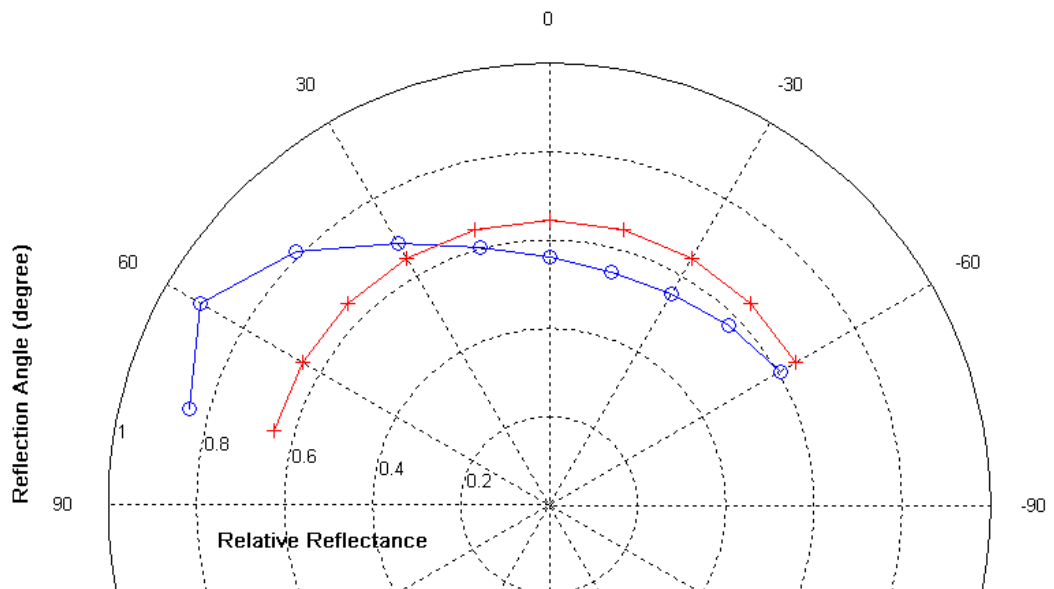
กราฟที่ 81 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



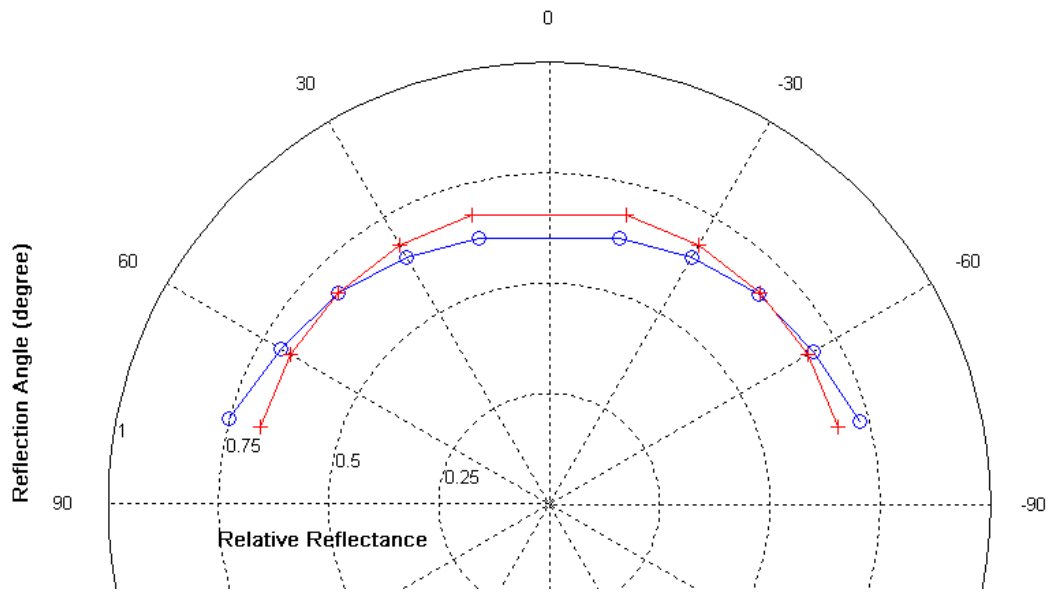
กราฟที่ 82 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



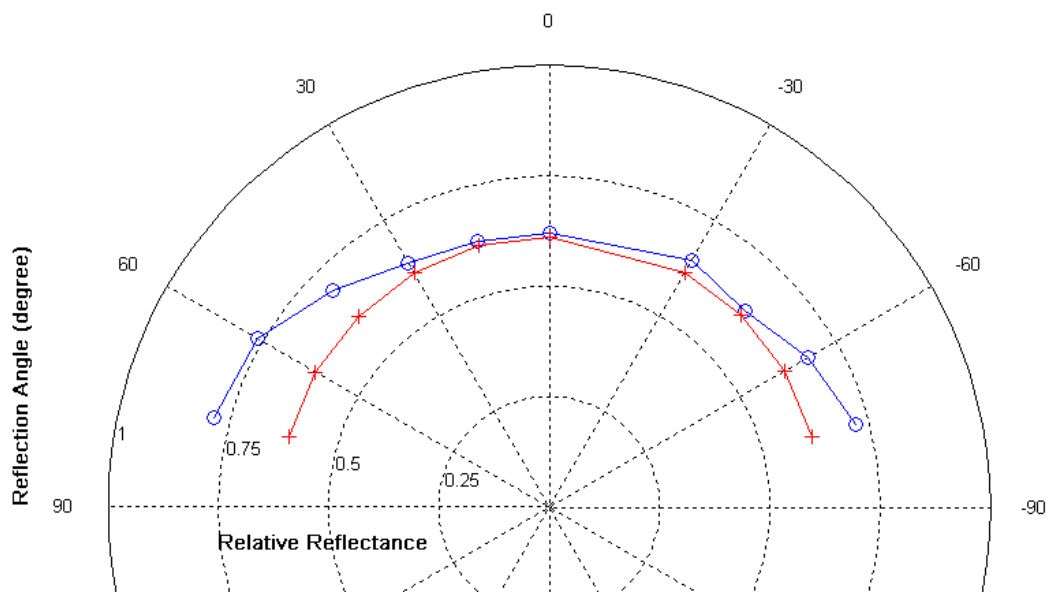
กราฟที่ 83 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



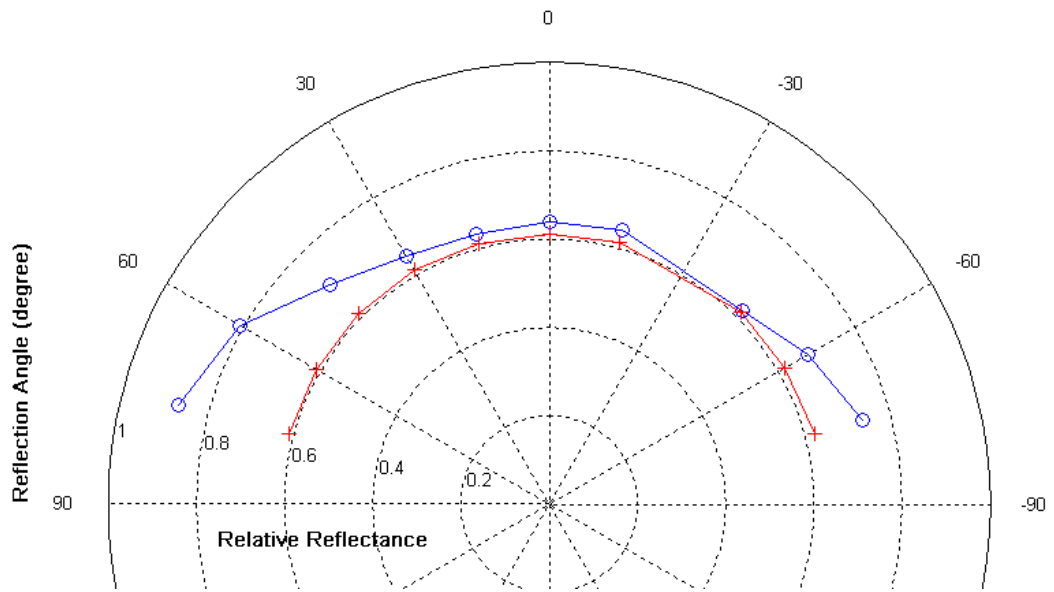
กราฟที่ 84 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



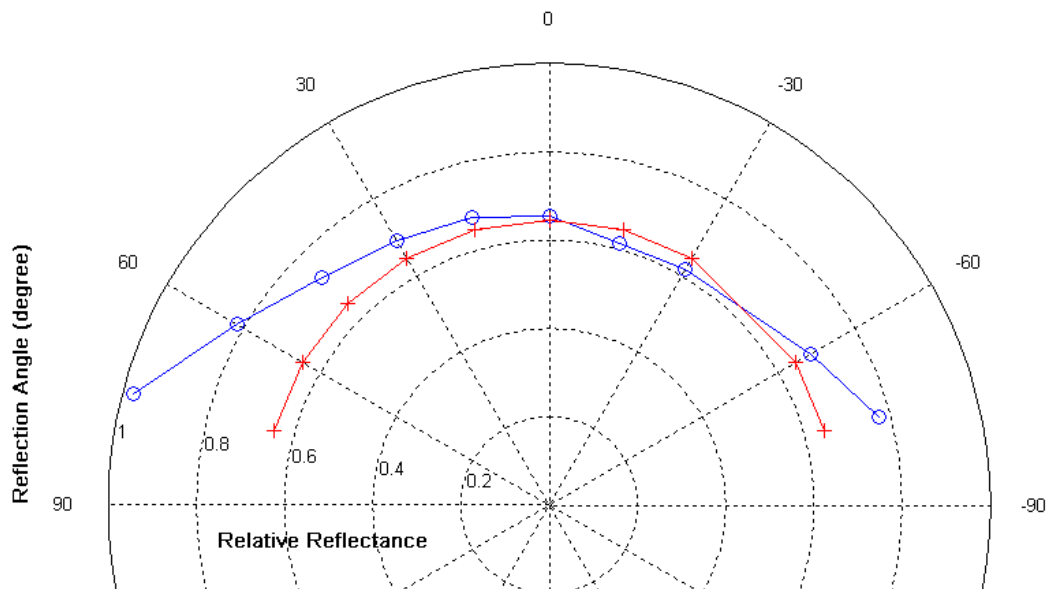
กราฟที่ 85 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมุมตกกระทบ 0 องศา



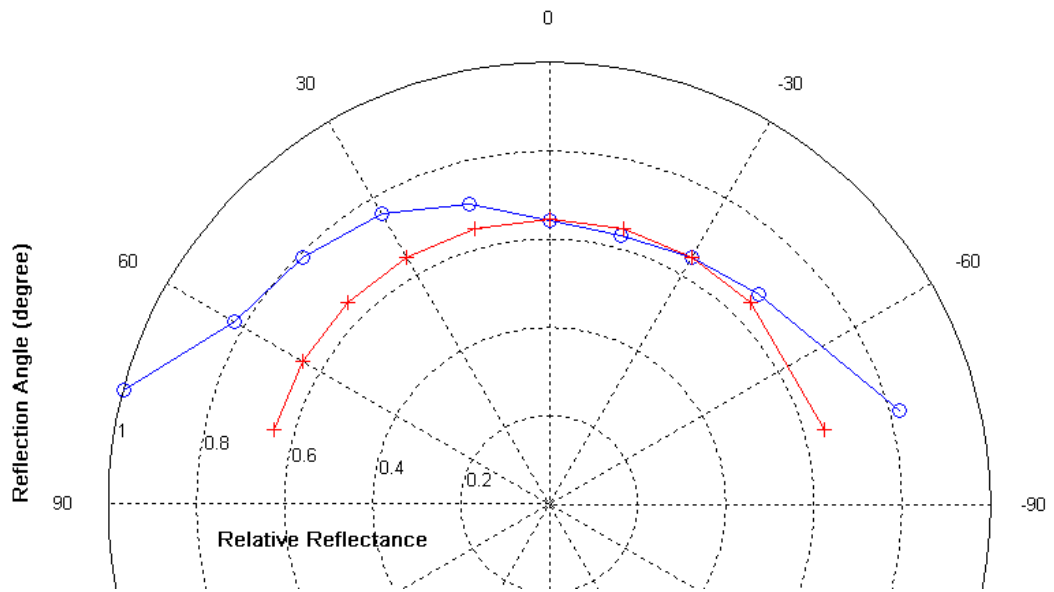
กราฟที่ 86 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมุมตกกระทบ -15 องศา



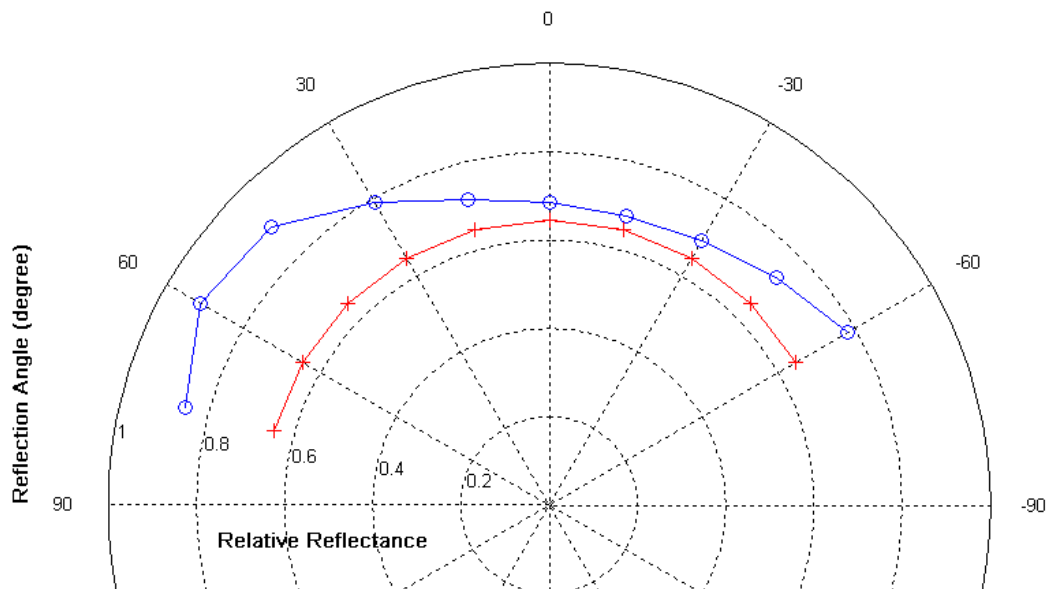
กราฟที่ 87 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมุมตกกระทบ -30 องศา



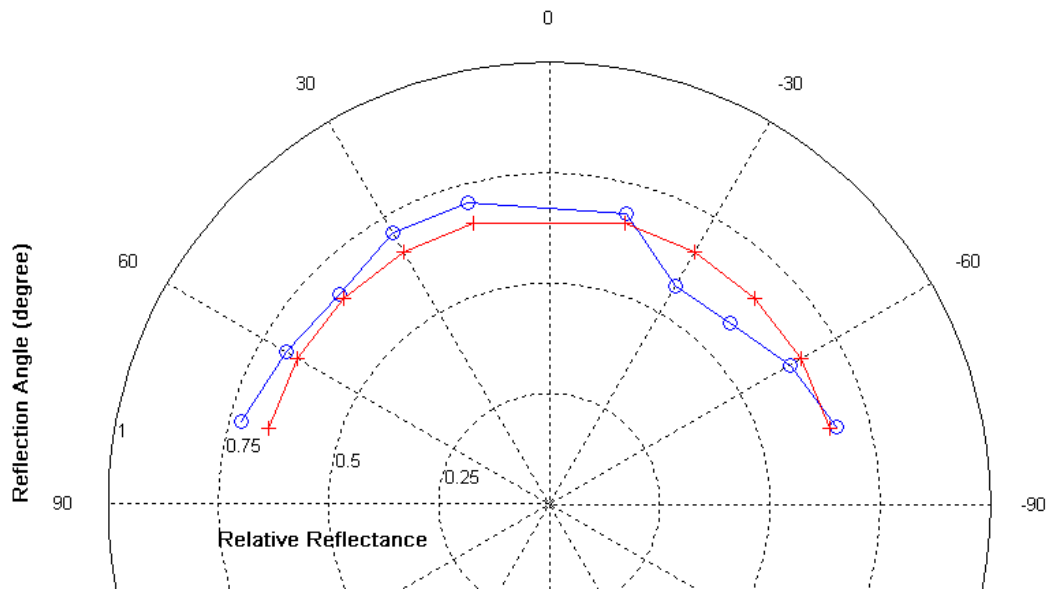
กราฟที่ 88 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมุมตกกระทบ -45 องศา



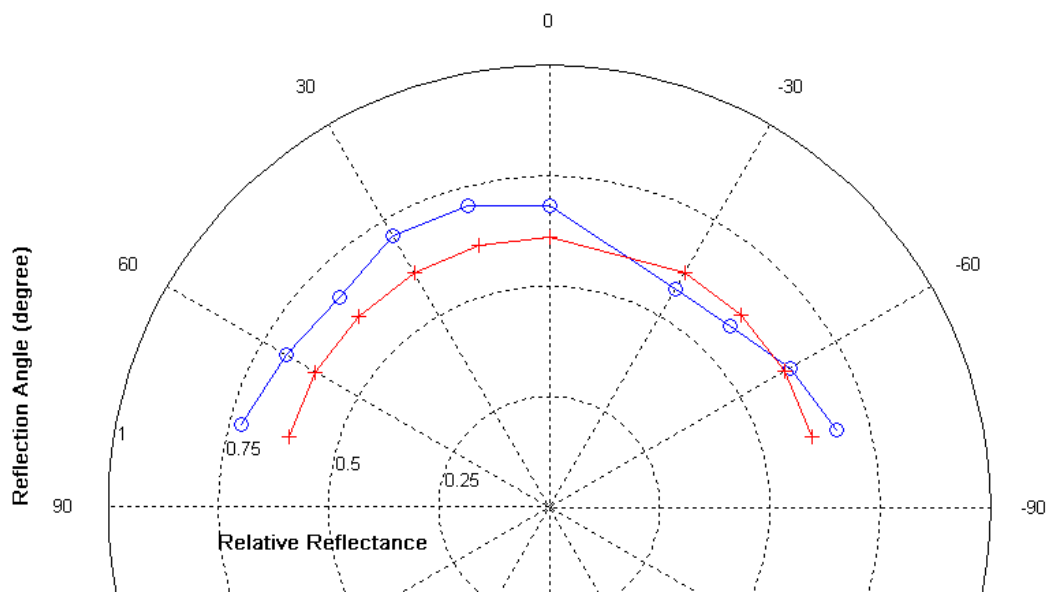
กราฟที่ 89 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



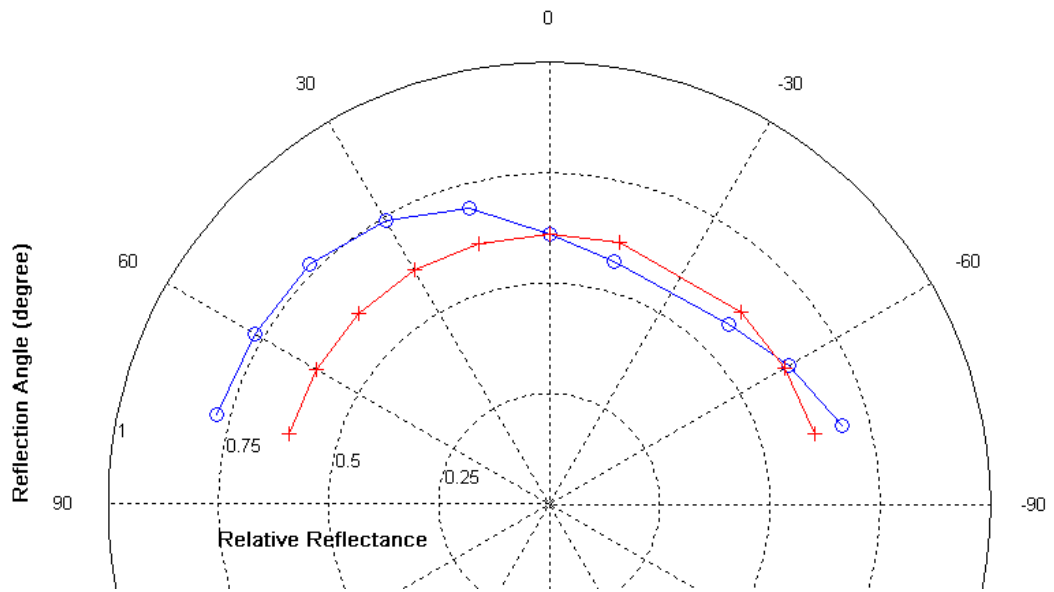
กราฟที่ 90 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



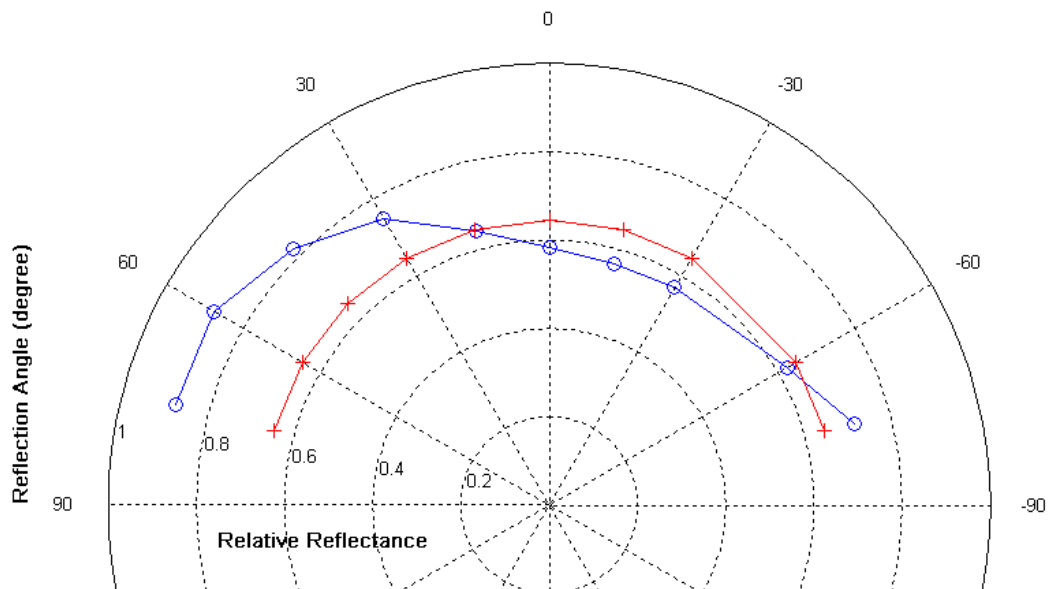
กราฟที่ 91 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



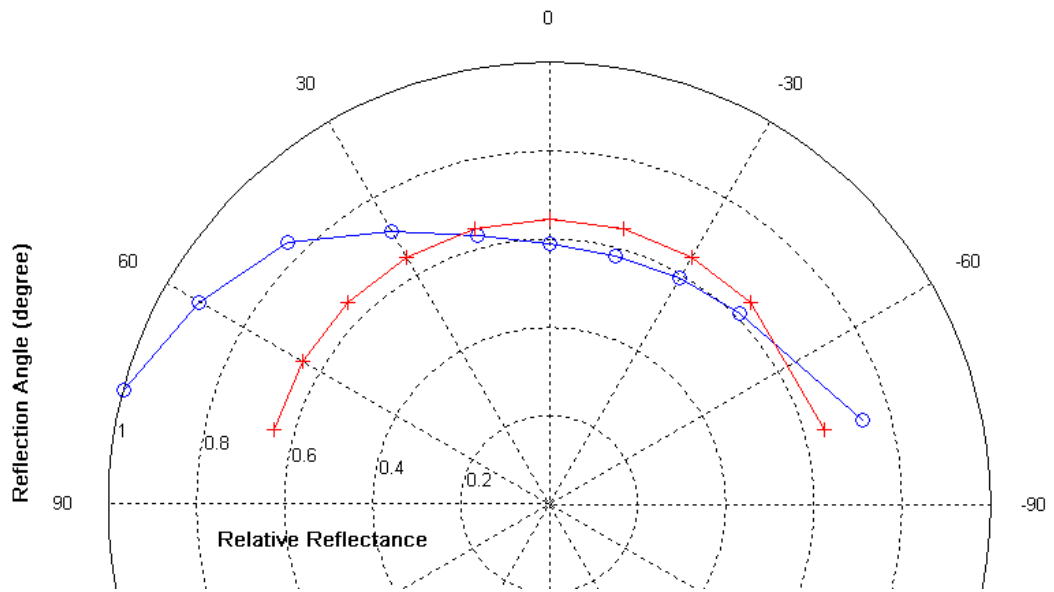
กราฟที่ 92 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



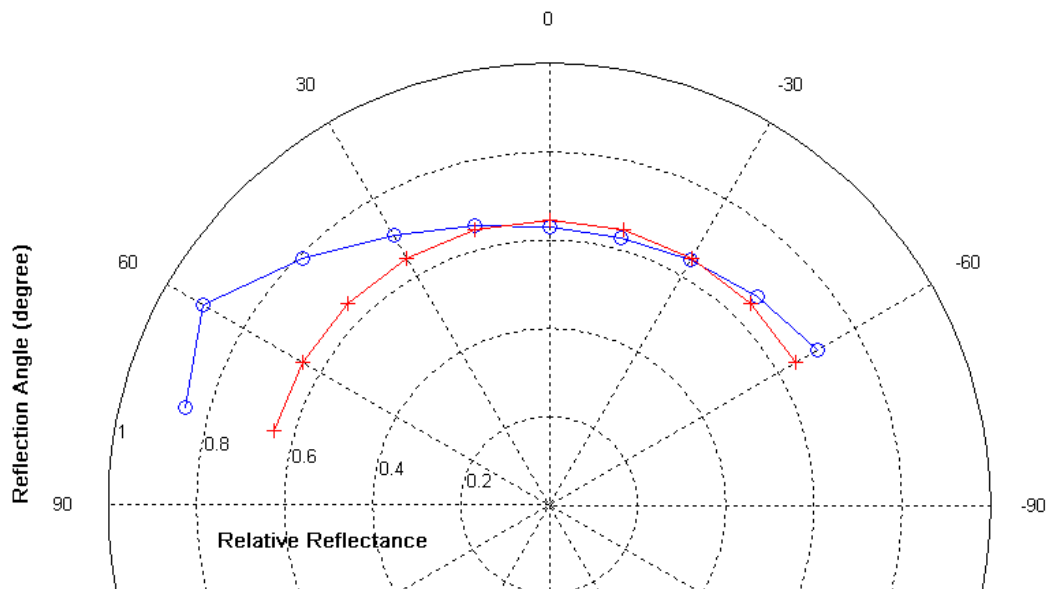
กราฟที่ 93 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



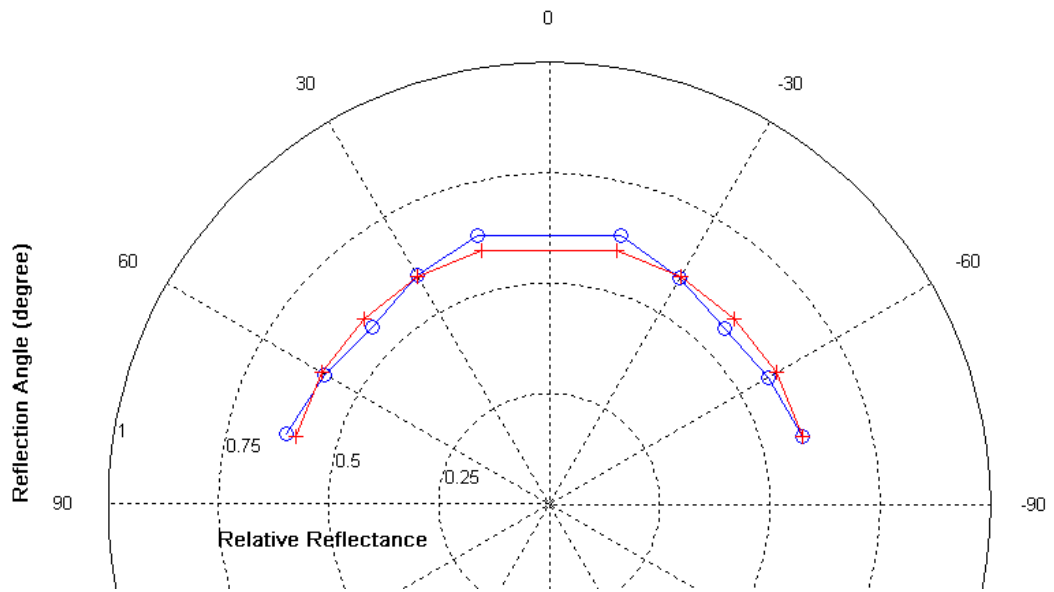
กราฟที่ 94 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



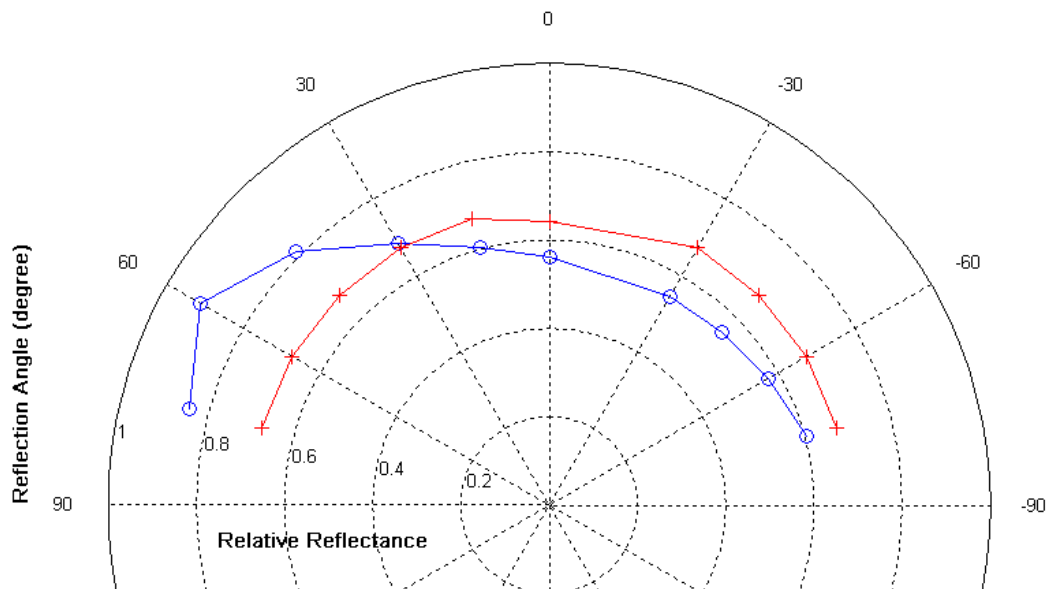
กราฟที่ 95 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



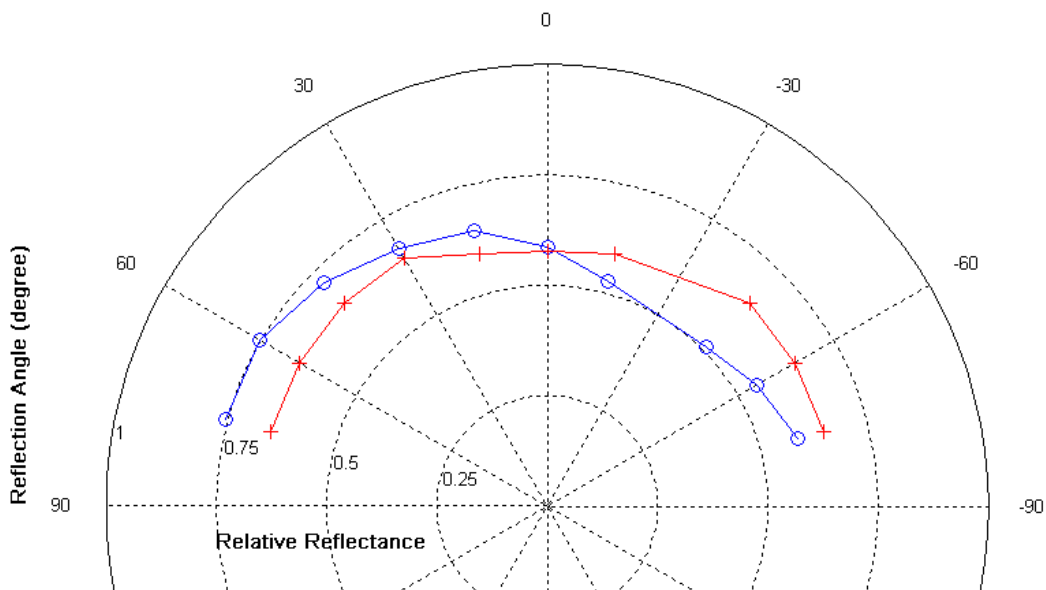
กราฟที่ 96 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Oren - Nayar reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



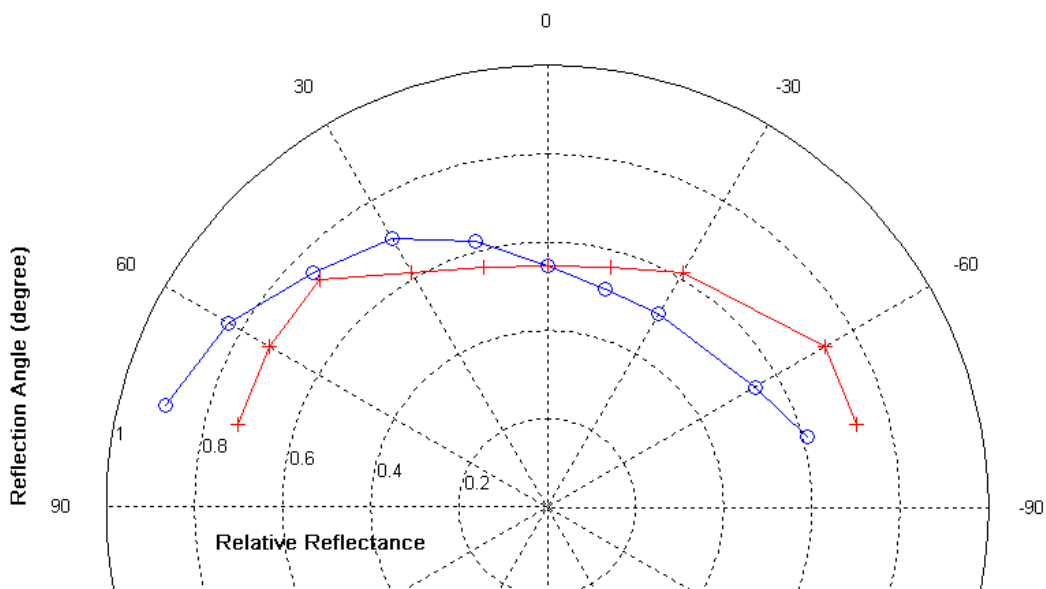
กราฟที่ 97 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



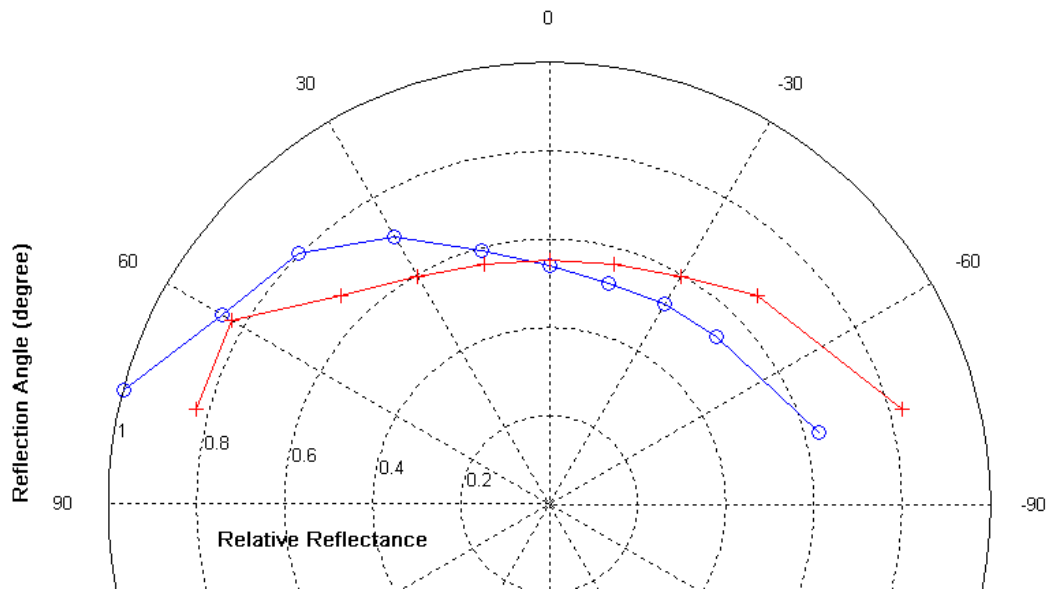
กราฟที่ 98 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



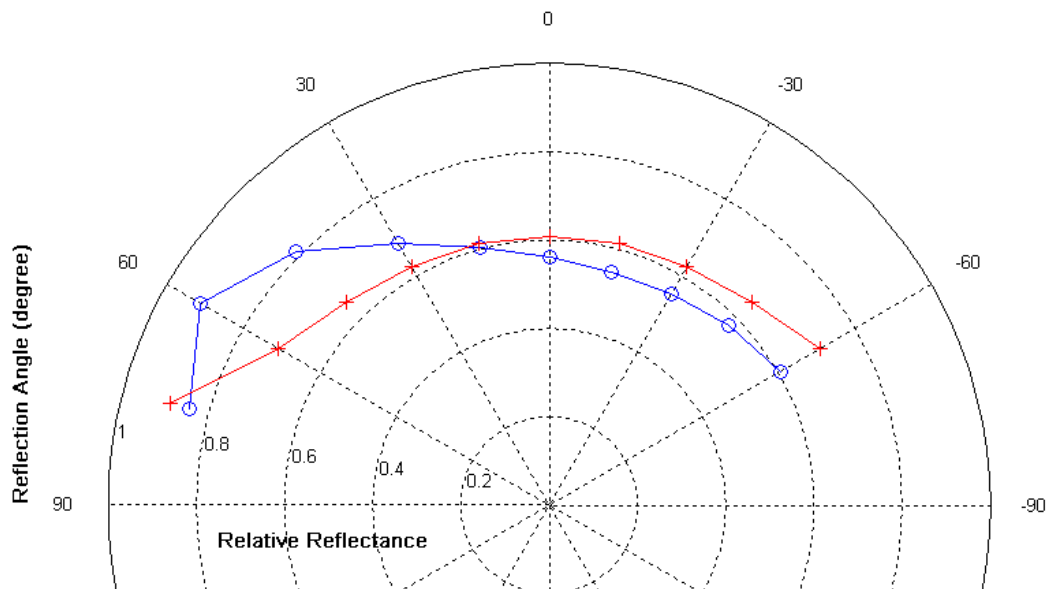
กราฟที่ 99 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



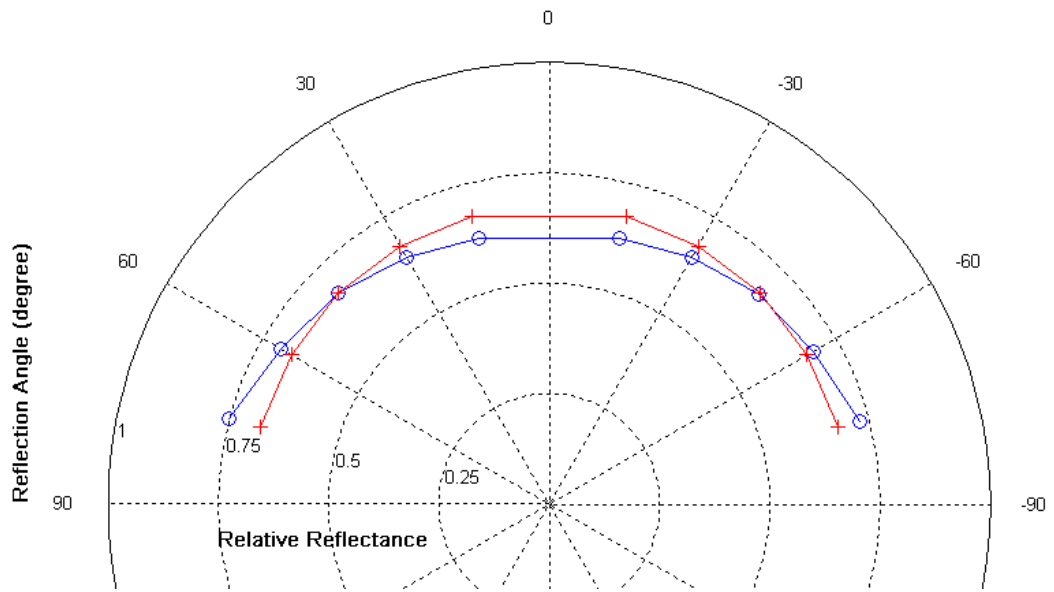
กราฟที่ 100 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



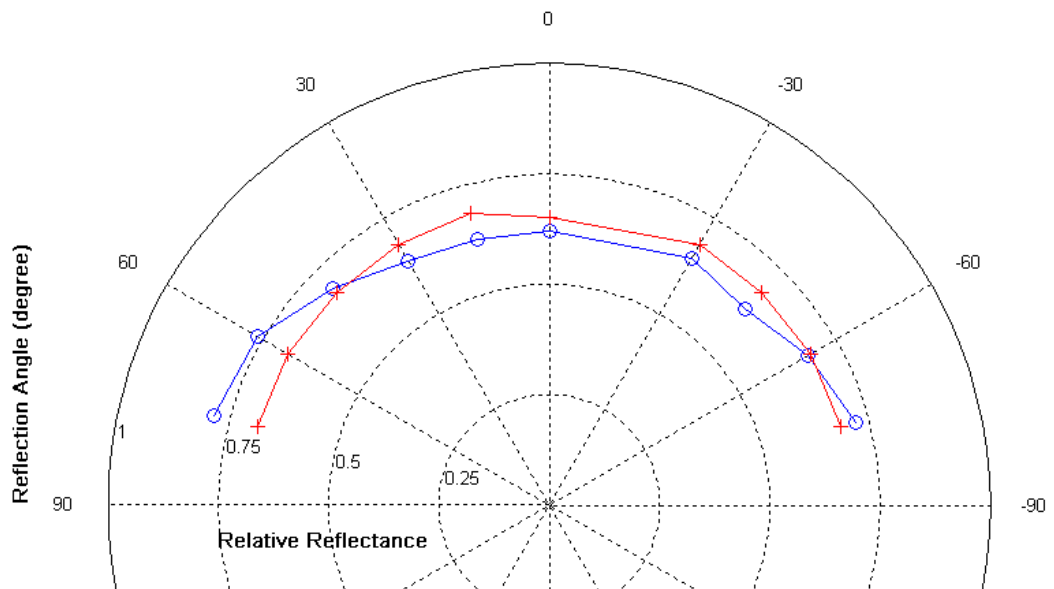
กราฟที่ 101 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



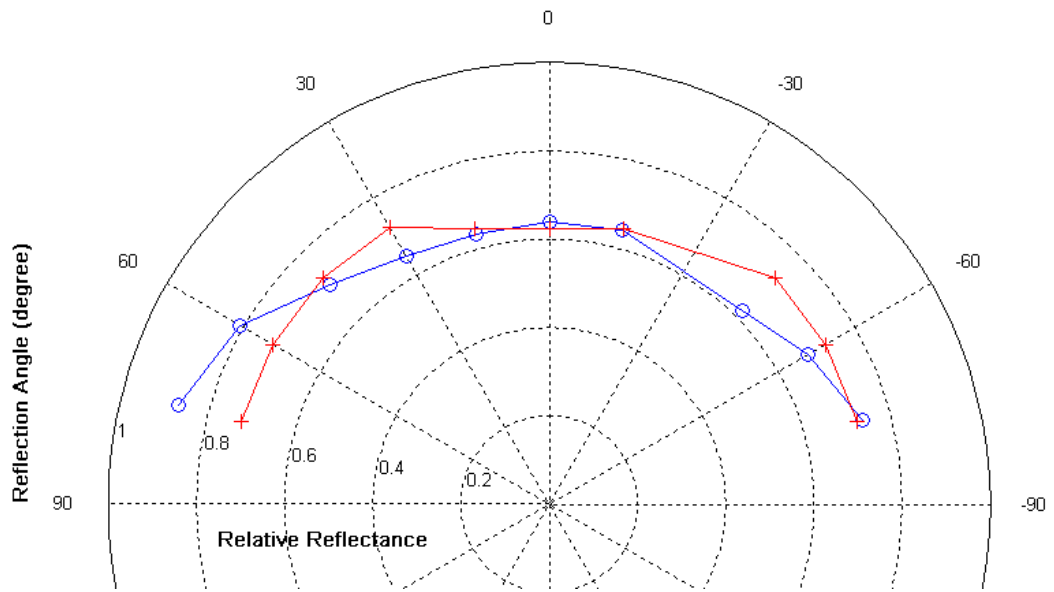
กราฟที่ 102 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



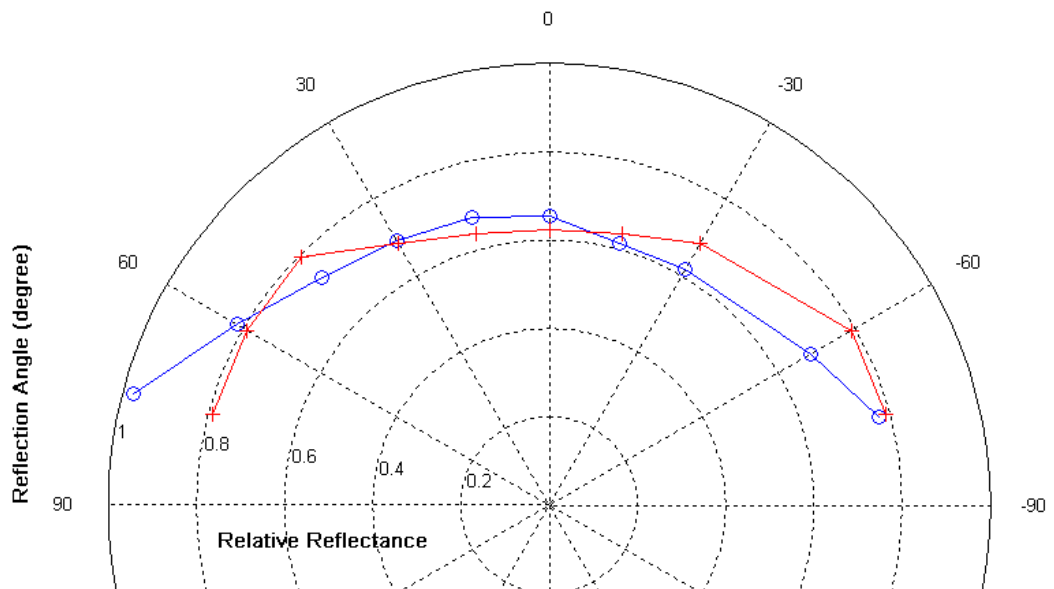
กราฟที่ 103 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



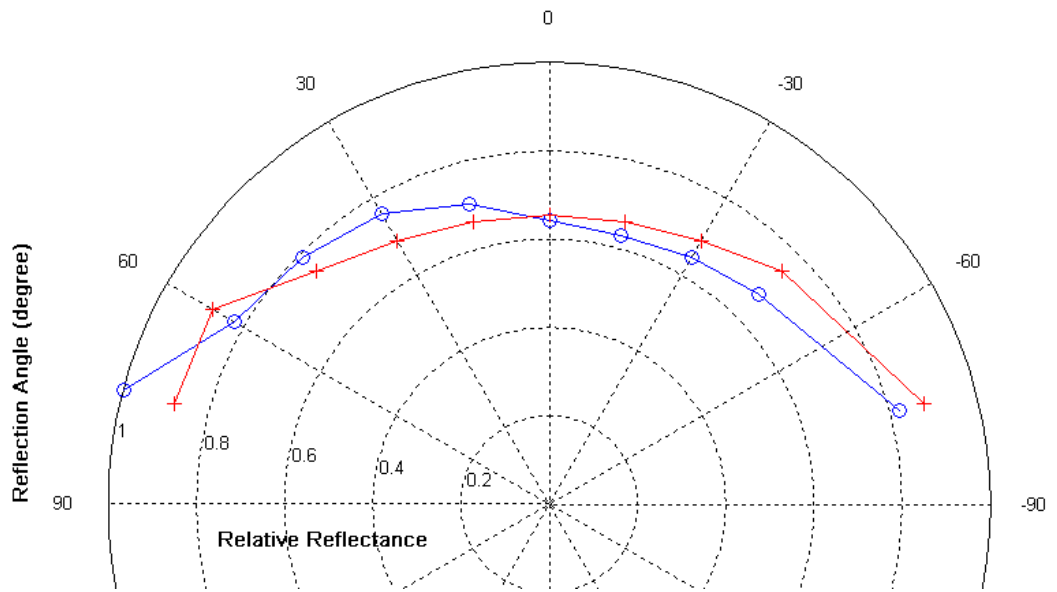
กราฟที่ 104 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



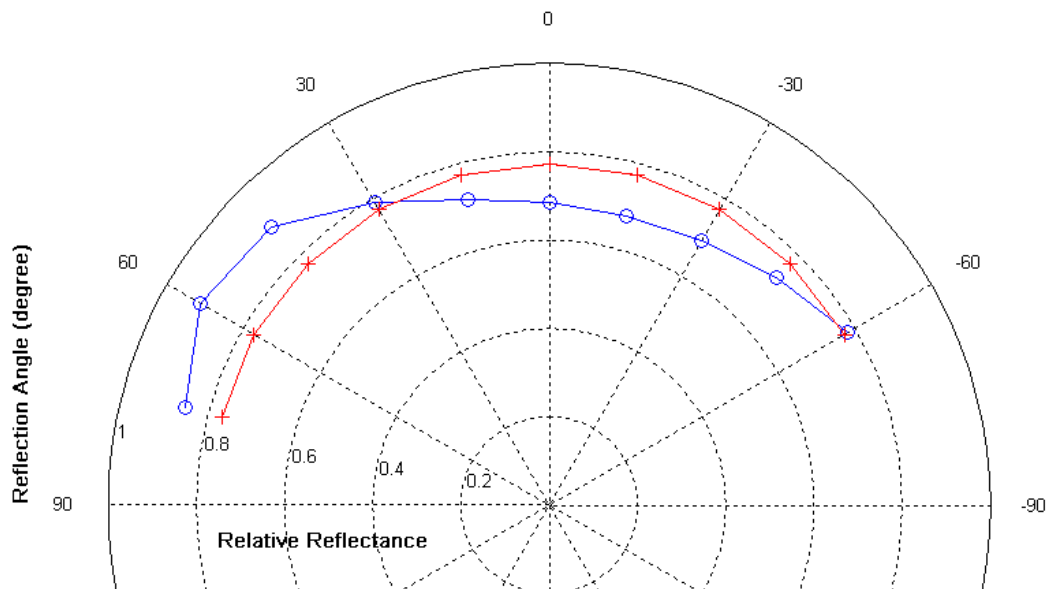
กราฟที่ 105 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



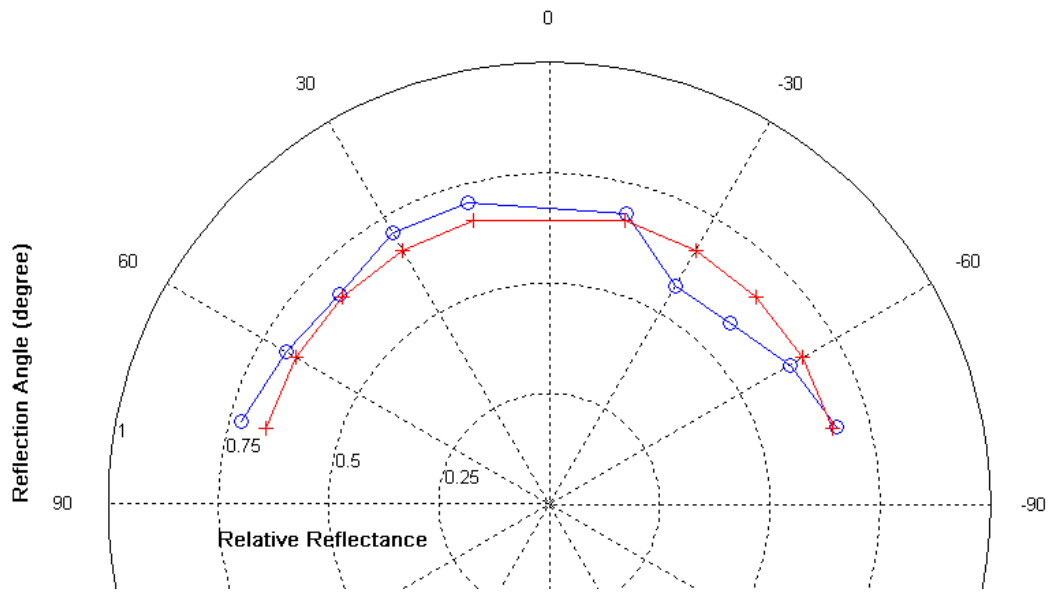
กราฟที่ 106 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



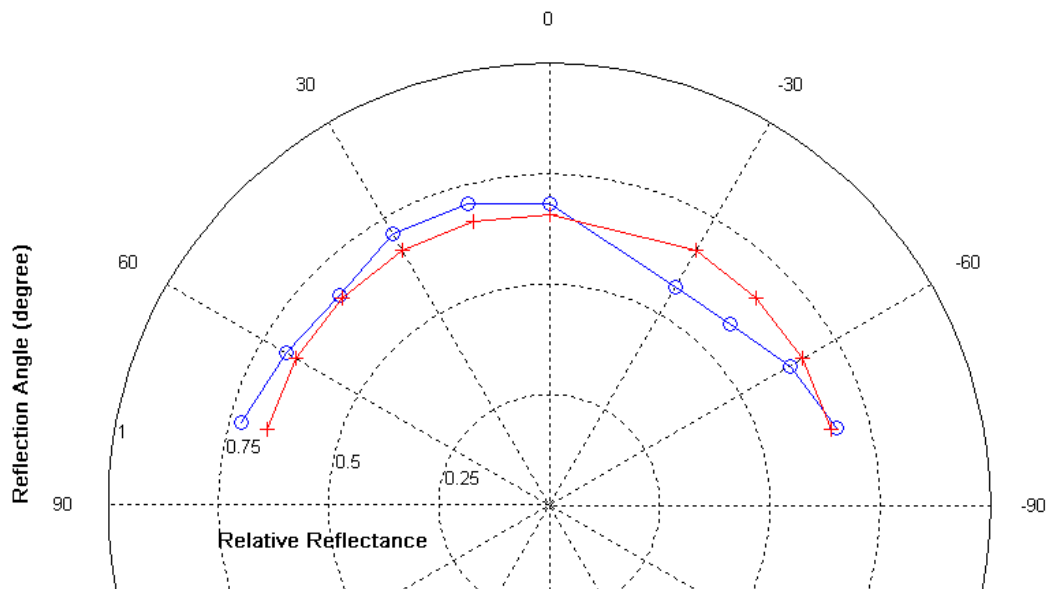
กราฟที่ 107 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



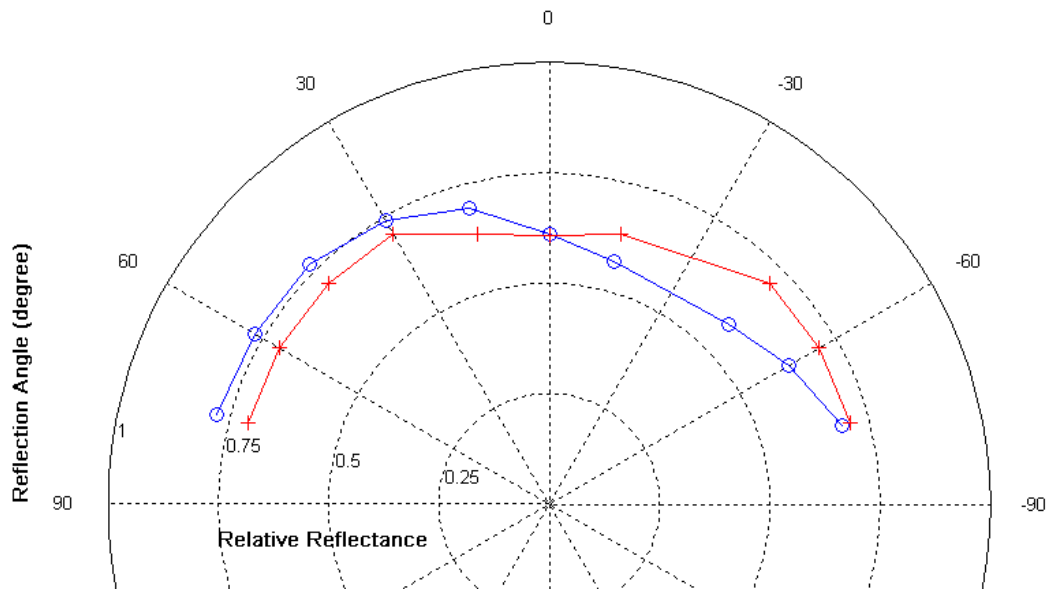
กราฟที่ 108 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



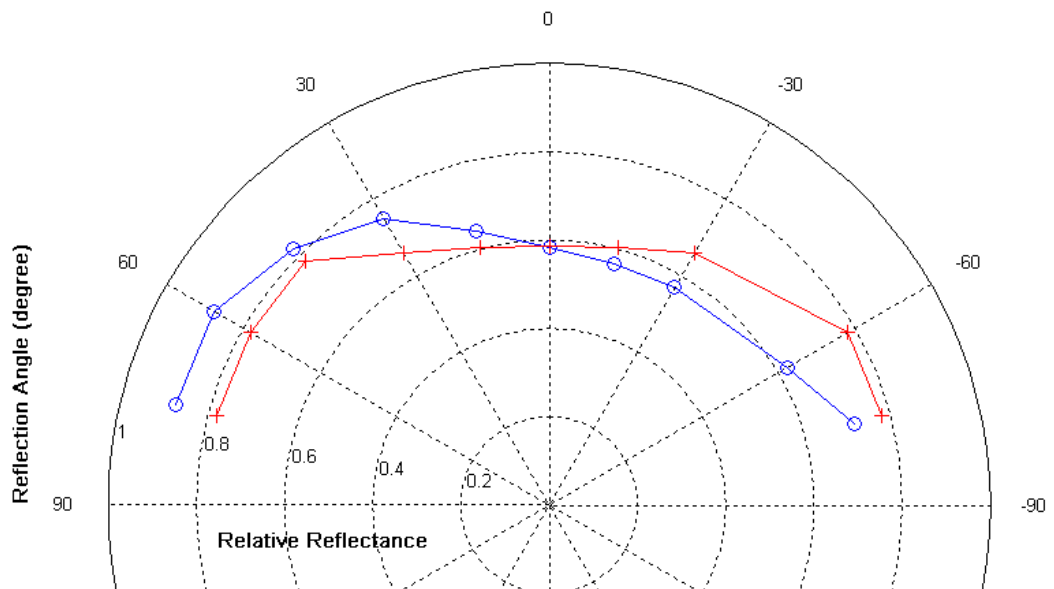
กราฟที่ 109 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



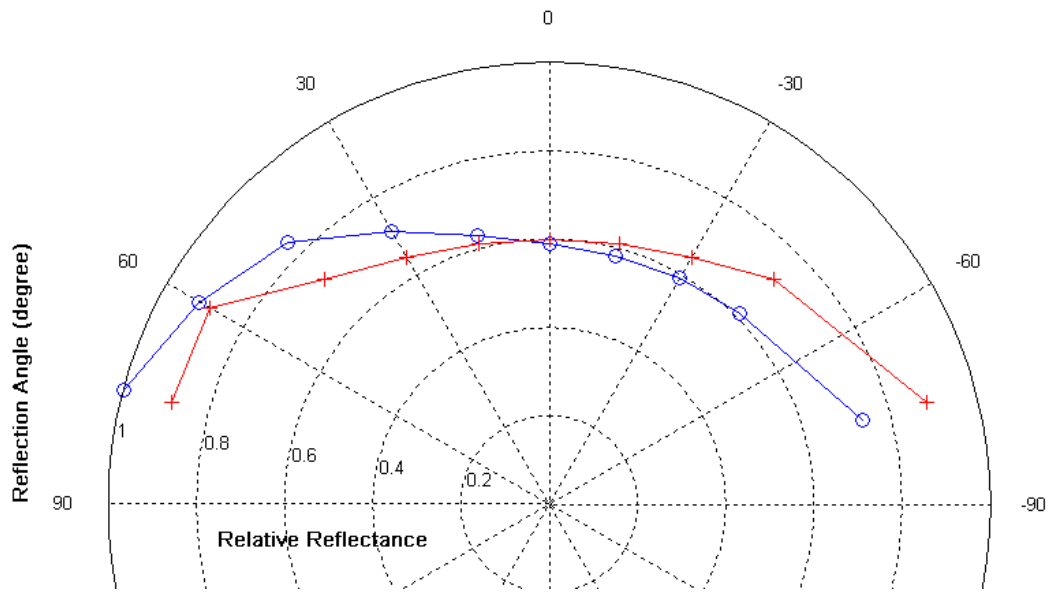
กราฟที่ 110 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



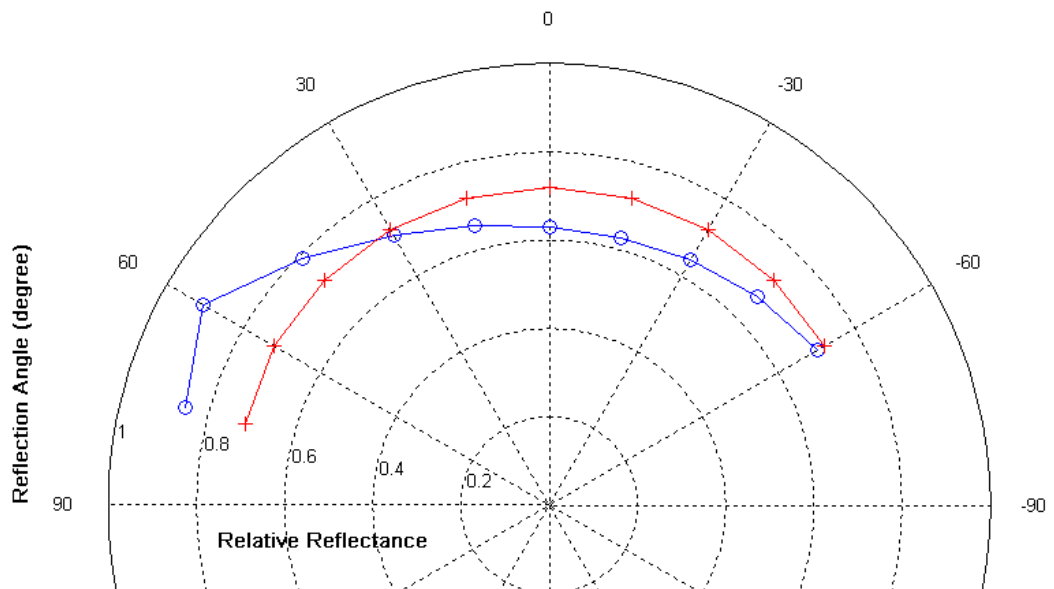
กราฟที่ 111 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



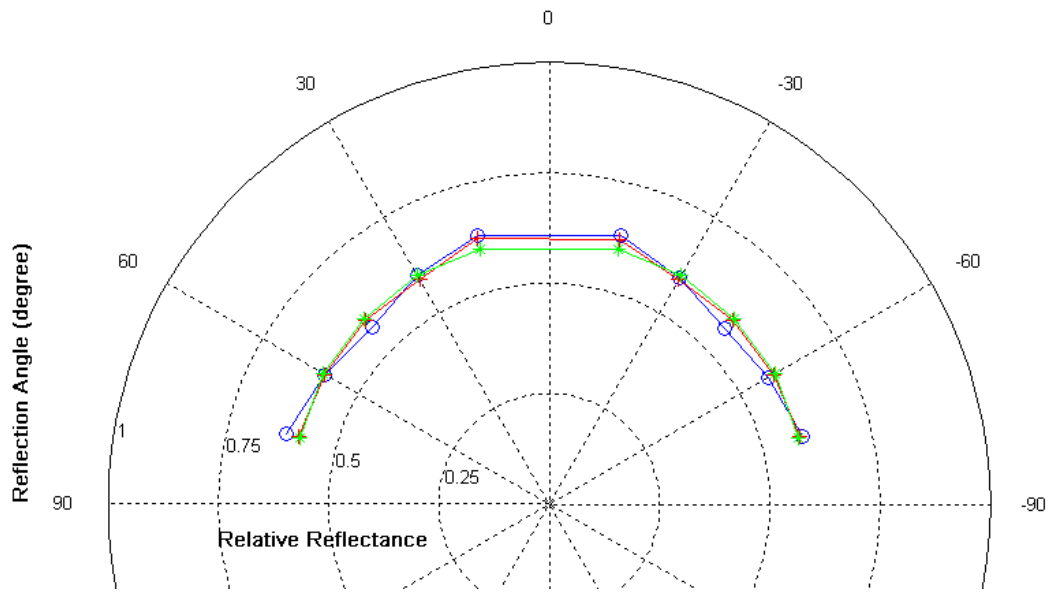
กราฟที่ 112 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



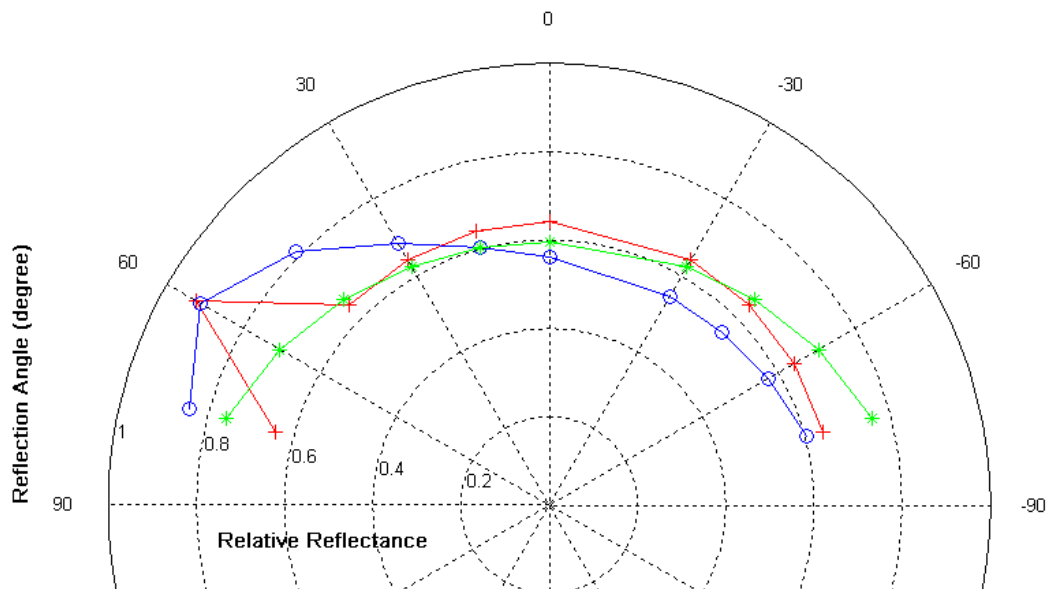
กราฟที่ 113 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



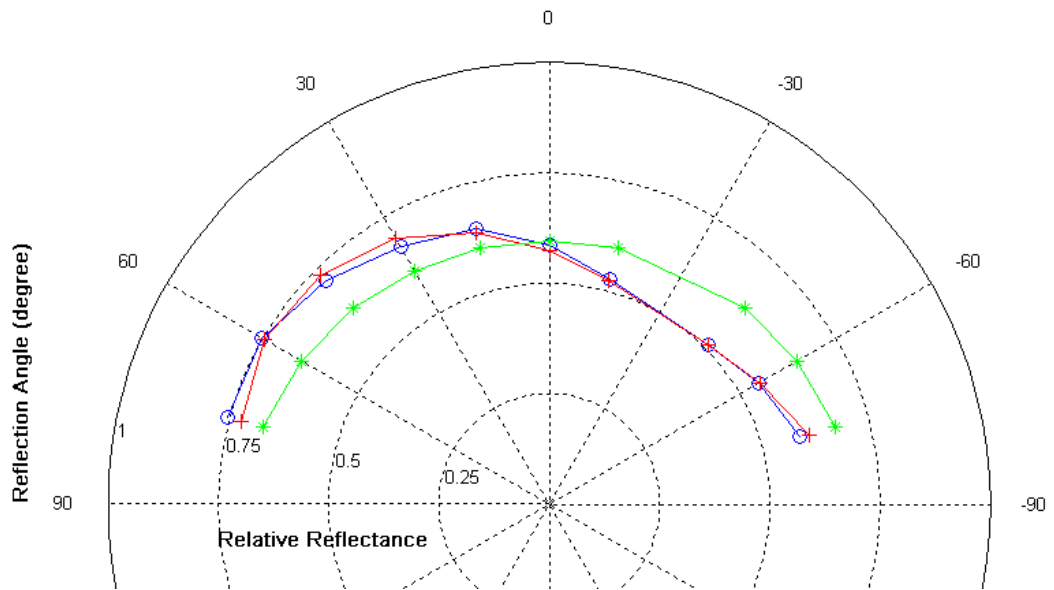
กราฟที่ 114 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) กับค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (+) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



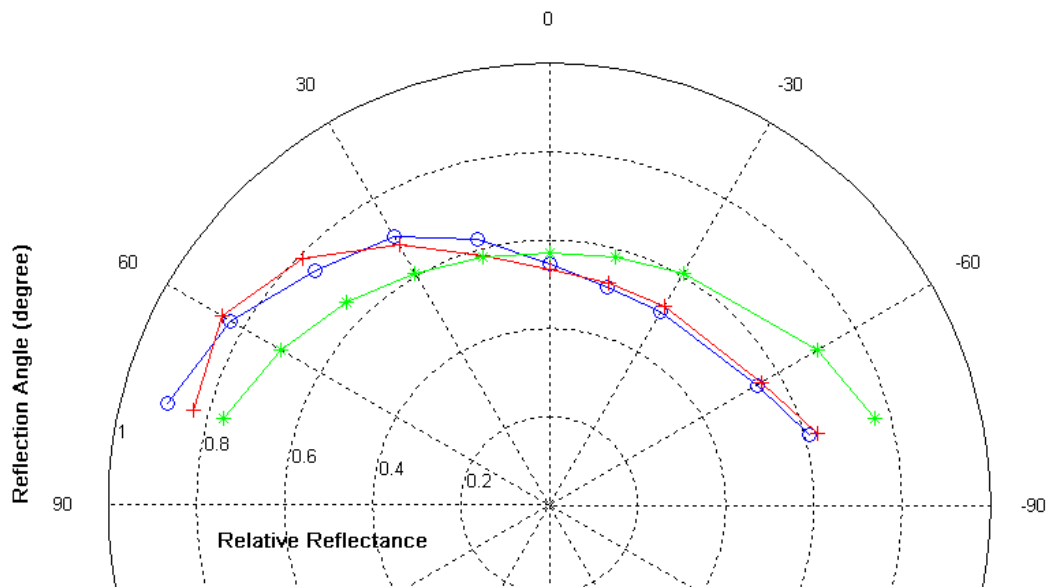
กราฟที่ 115 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมุมตกกระทบ 0 องศา



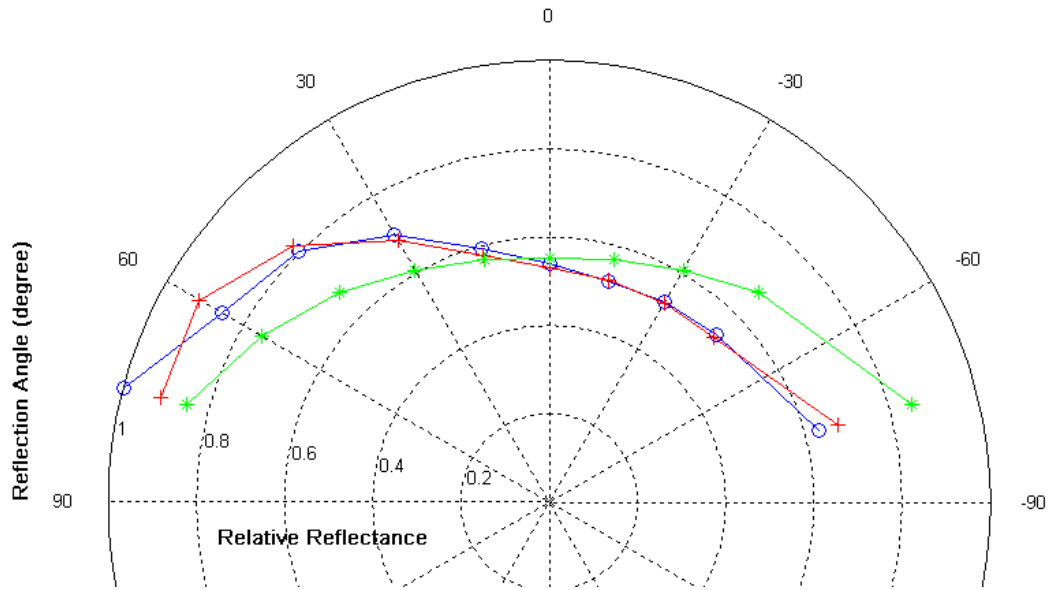
กราฟที่ 116 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมุมตกกระทบ -15 องศา



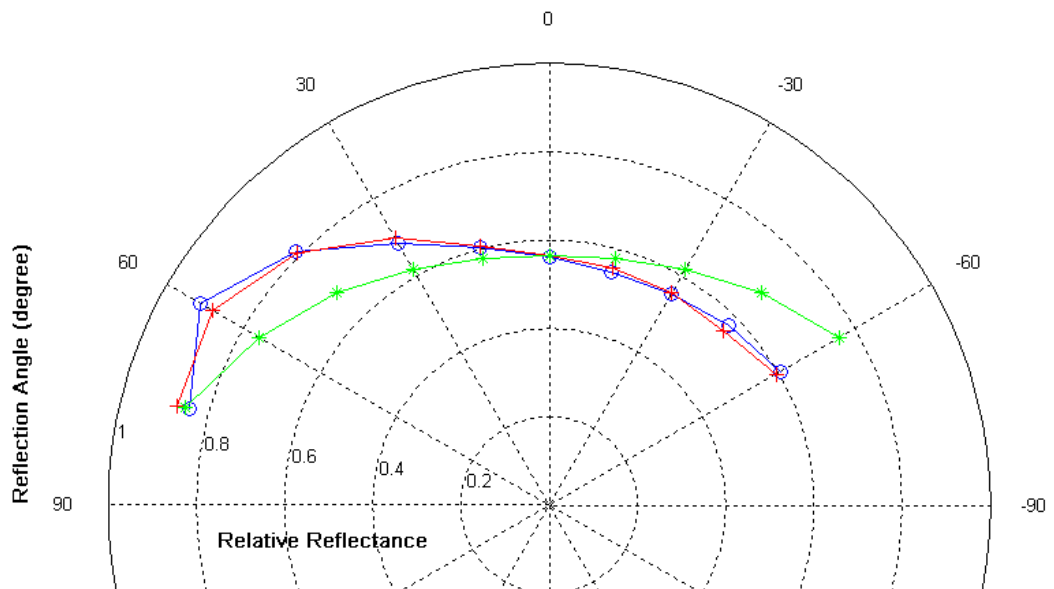
กราฟที่ 117 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



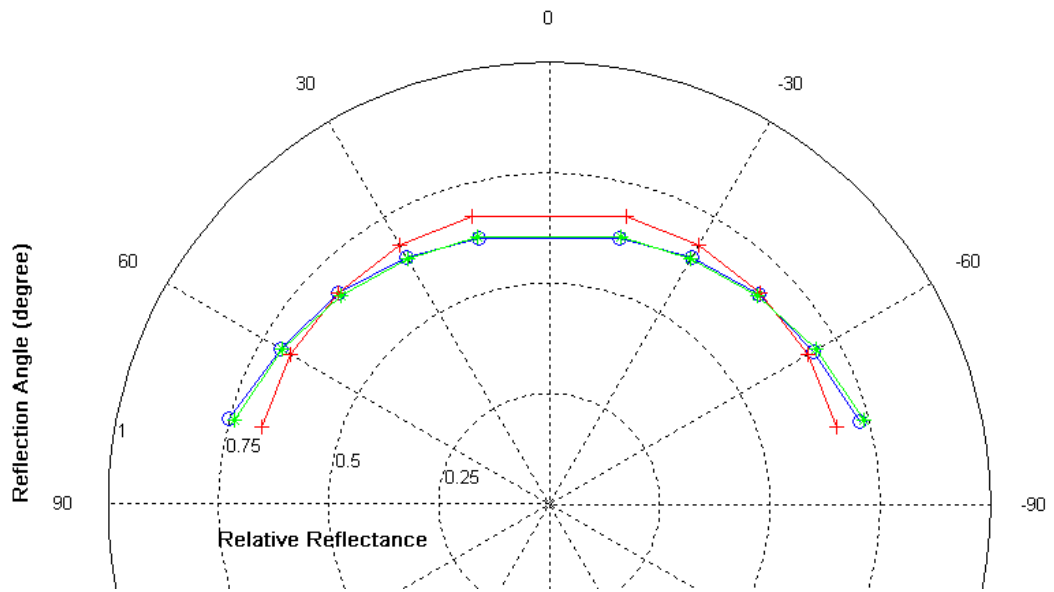
กราฟที่ 118 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



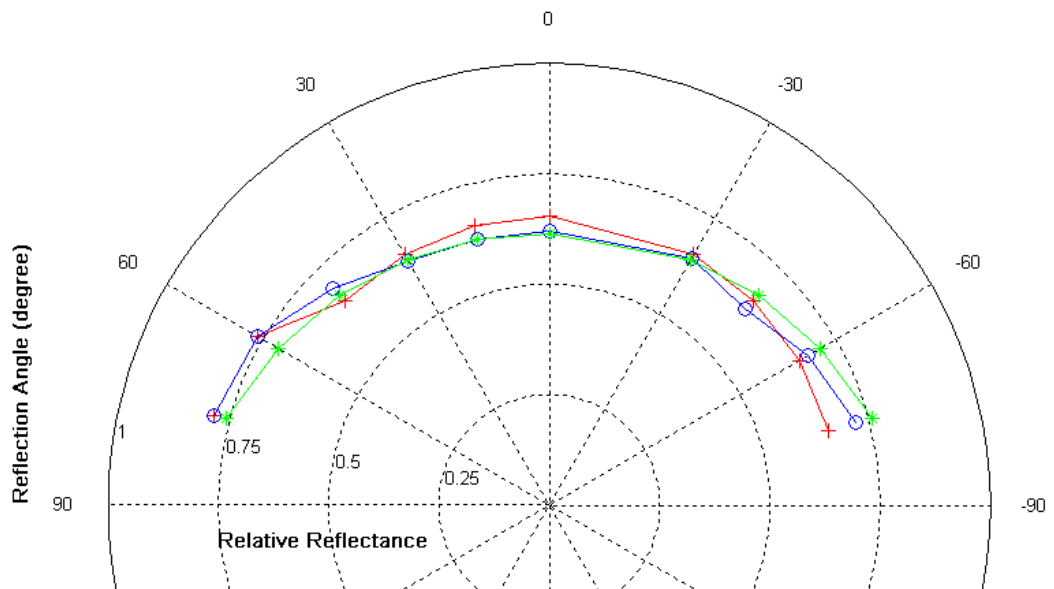
กราฟที่ 119 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



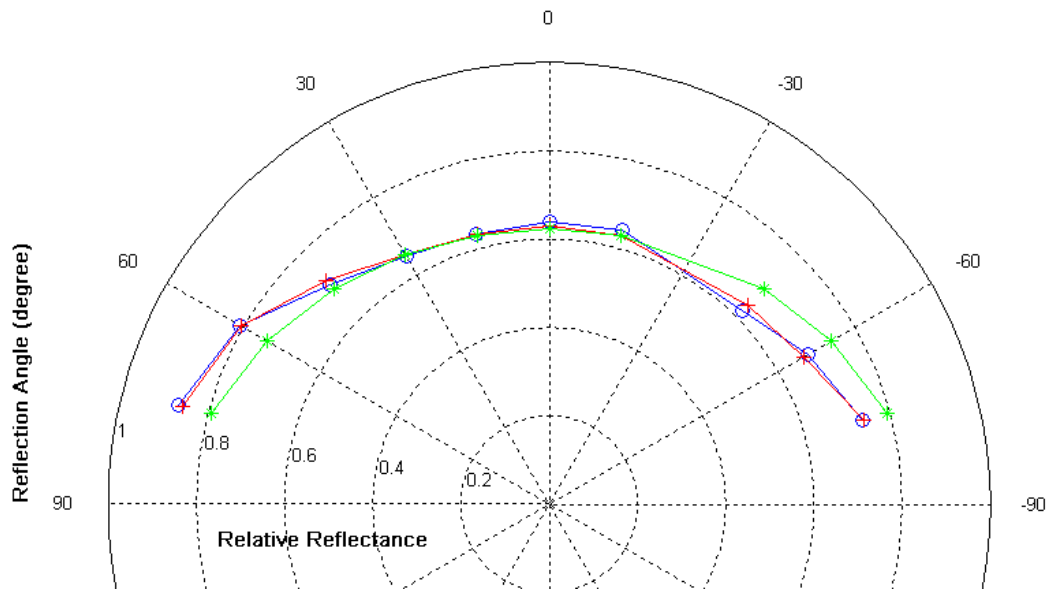
กราฟที่ 120 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



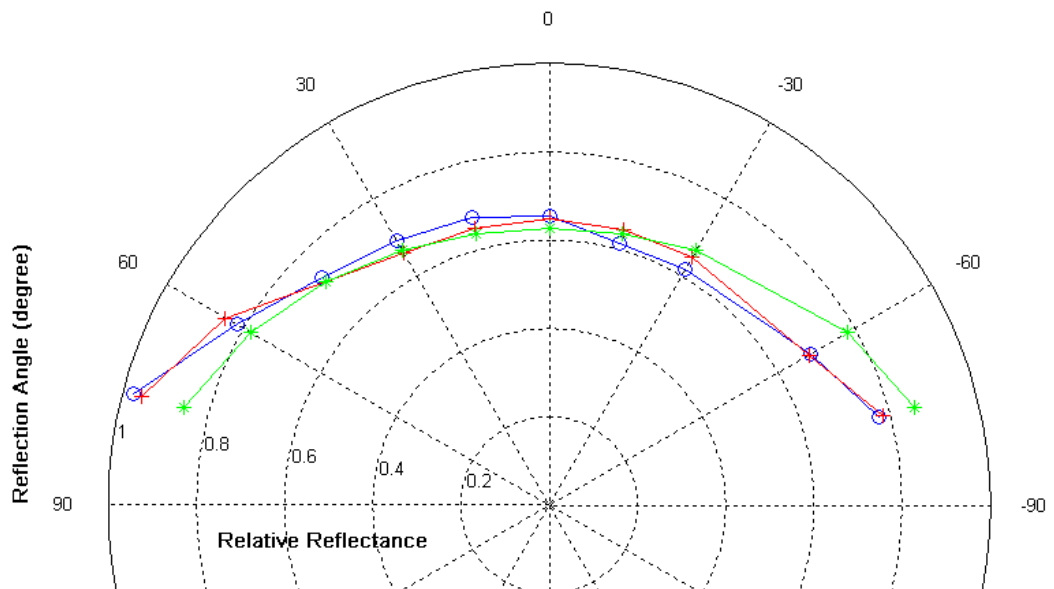
กราฟที่ 121 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



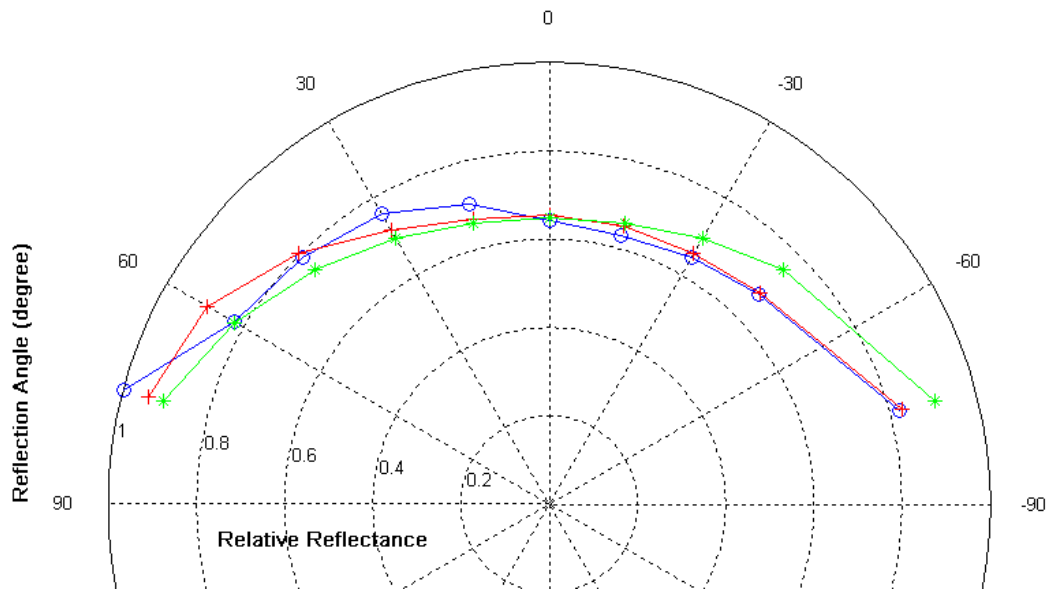
กราฟที่ 122 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



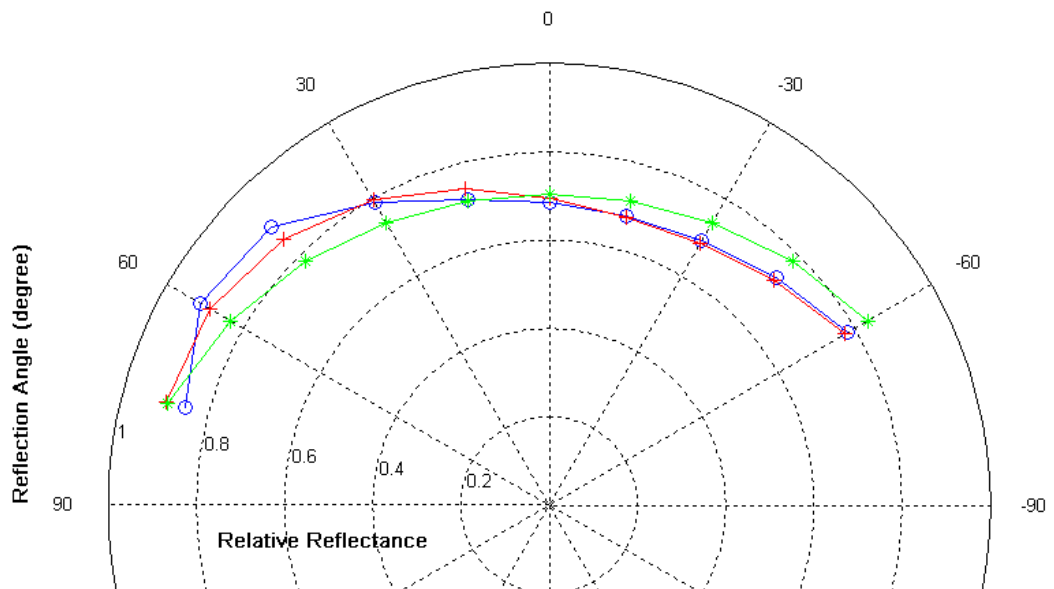
กราฟที่ 123 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



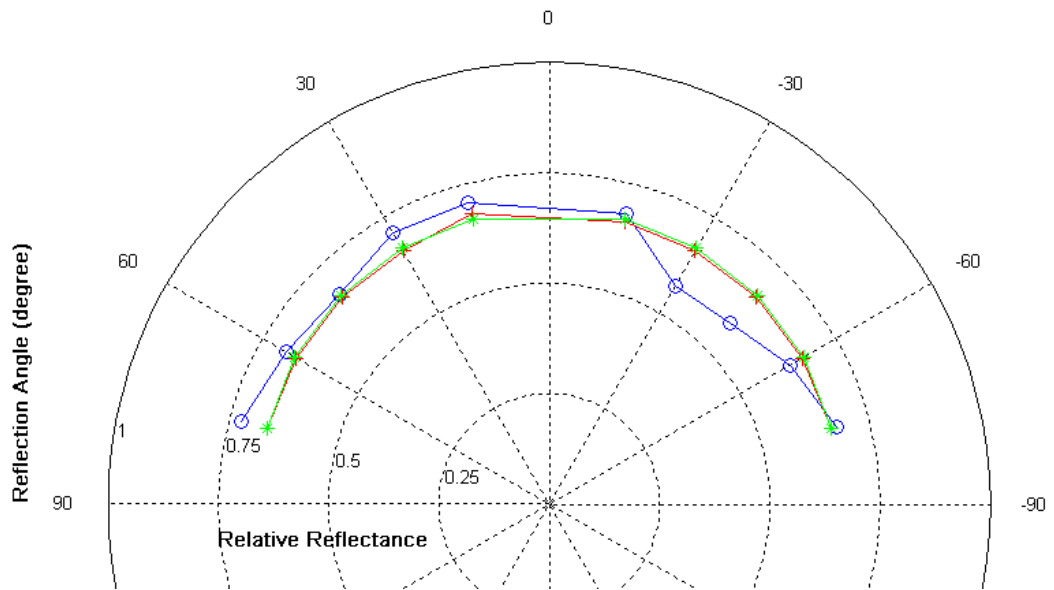
กราฟที่ 124 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



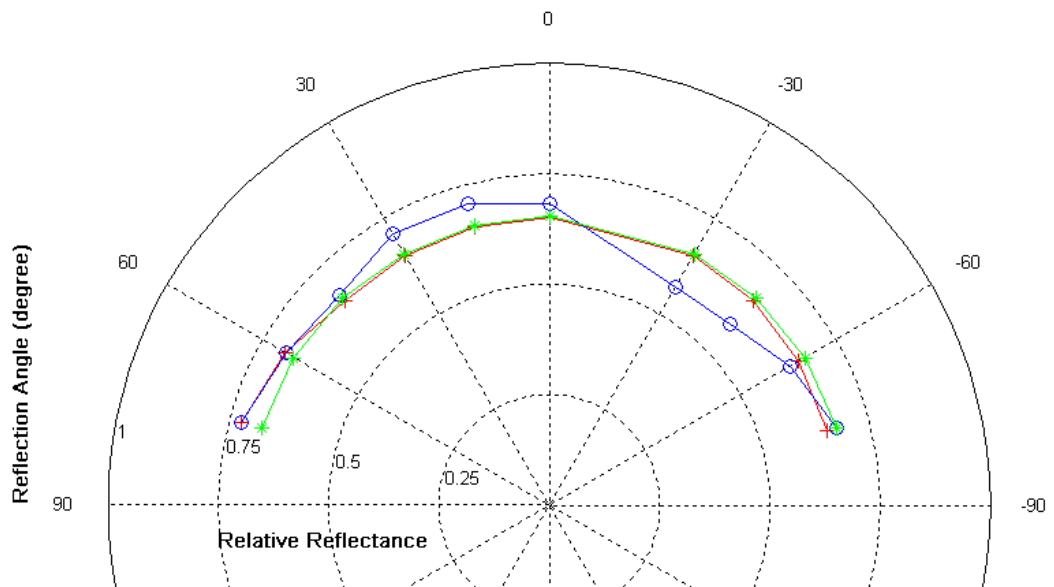
กราฟที่ 125 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



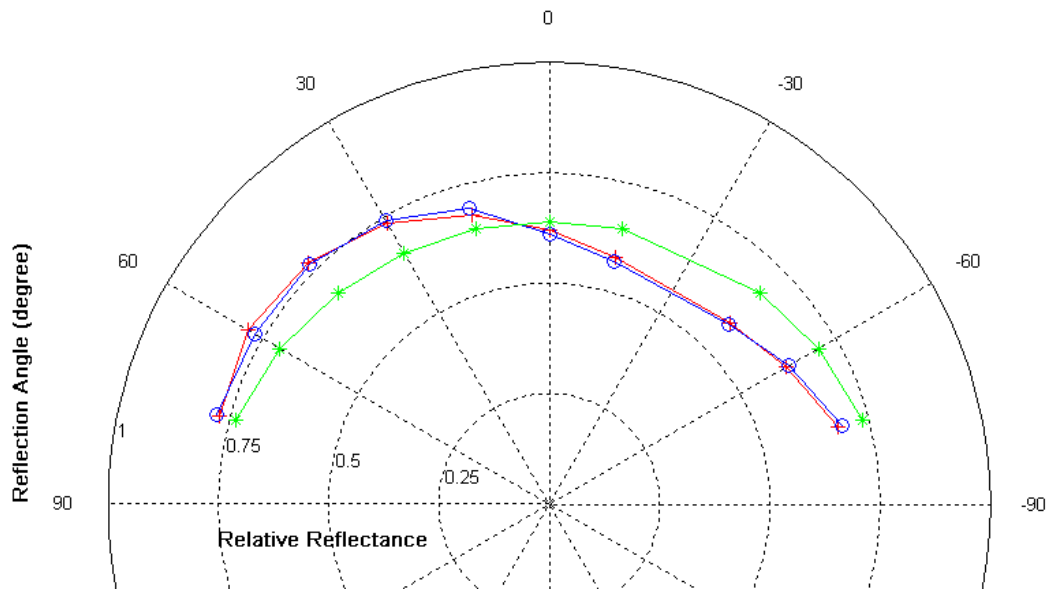
กราฟที่ 126 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



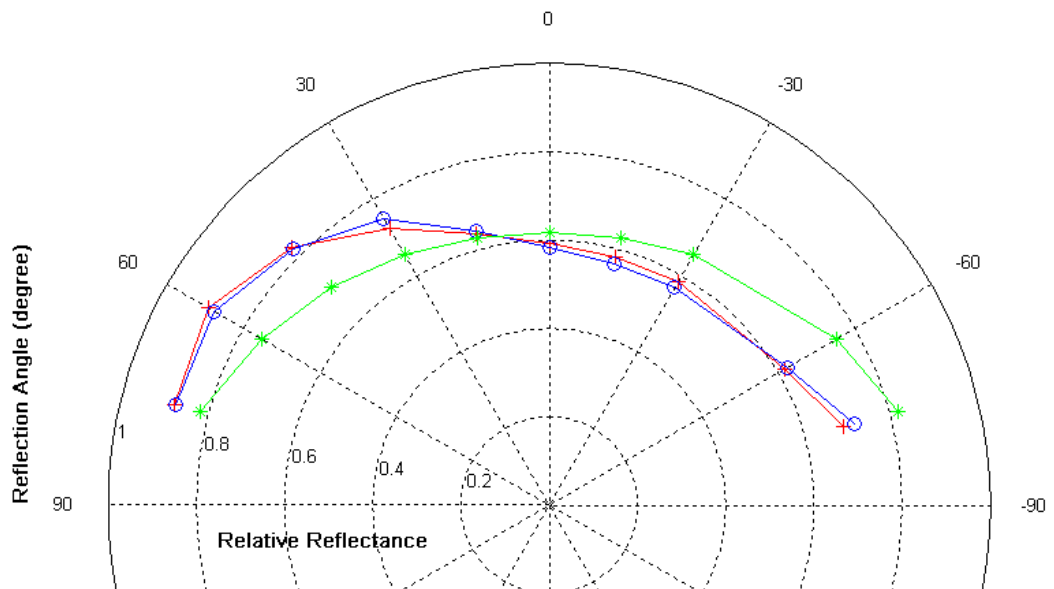
กราฟที่ 127 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มีมุมตกกระทบ 0 องศา



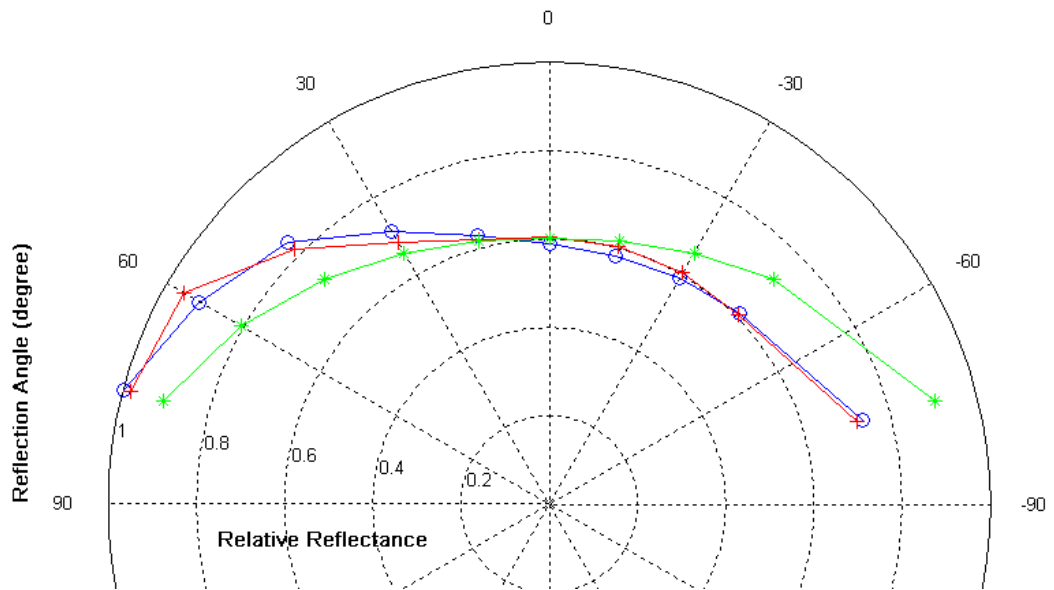
กราฟที่ 128 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มีมุมตกกระทบ -15 องศา



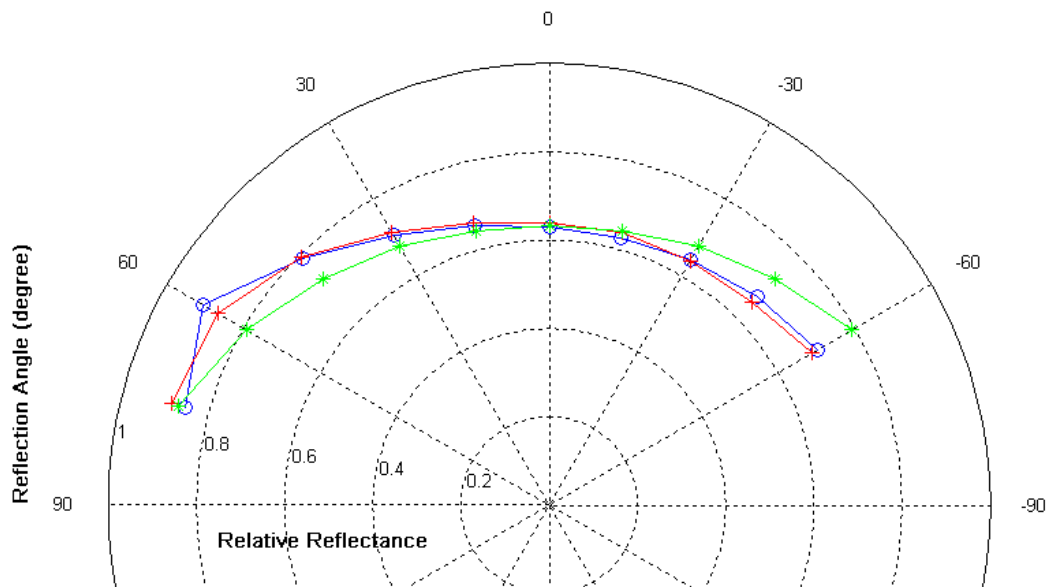
กราฟที่ 129 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



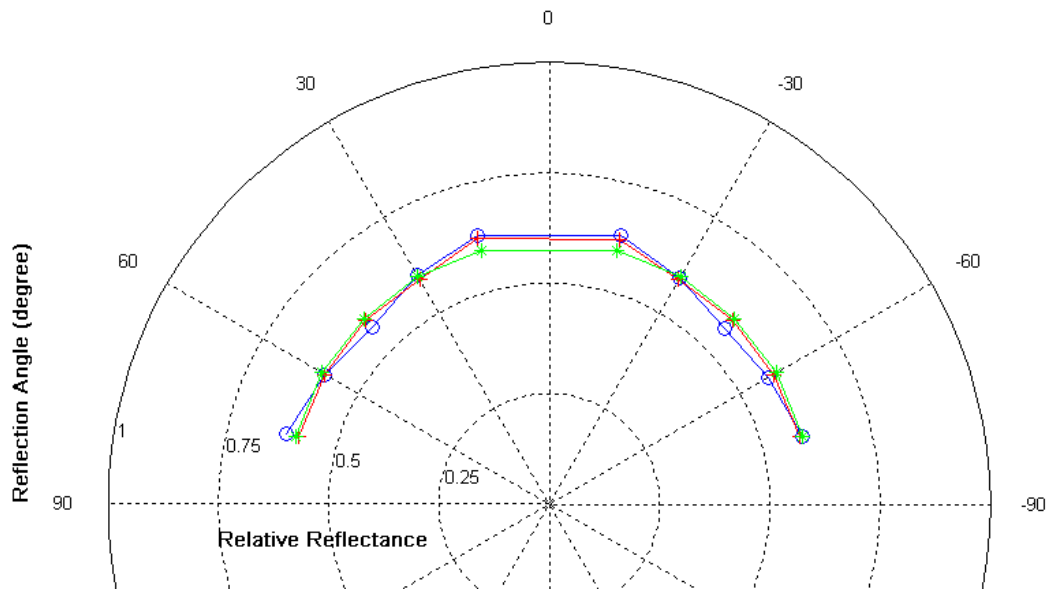
กราฟที่ 130 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



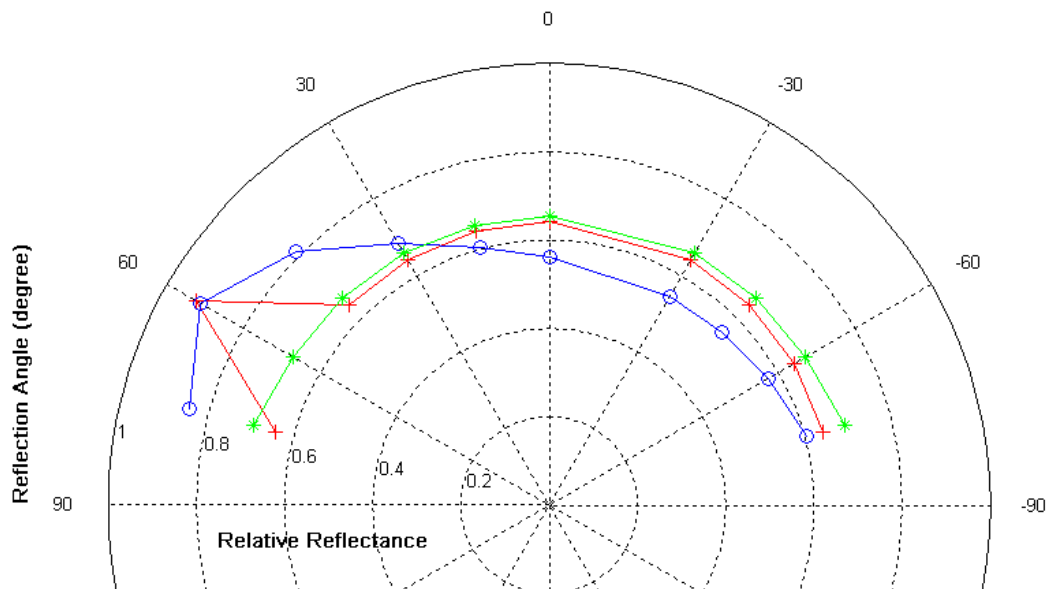
กราฟที่ 131 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



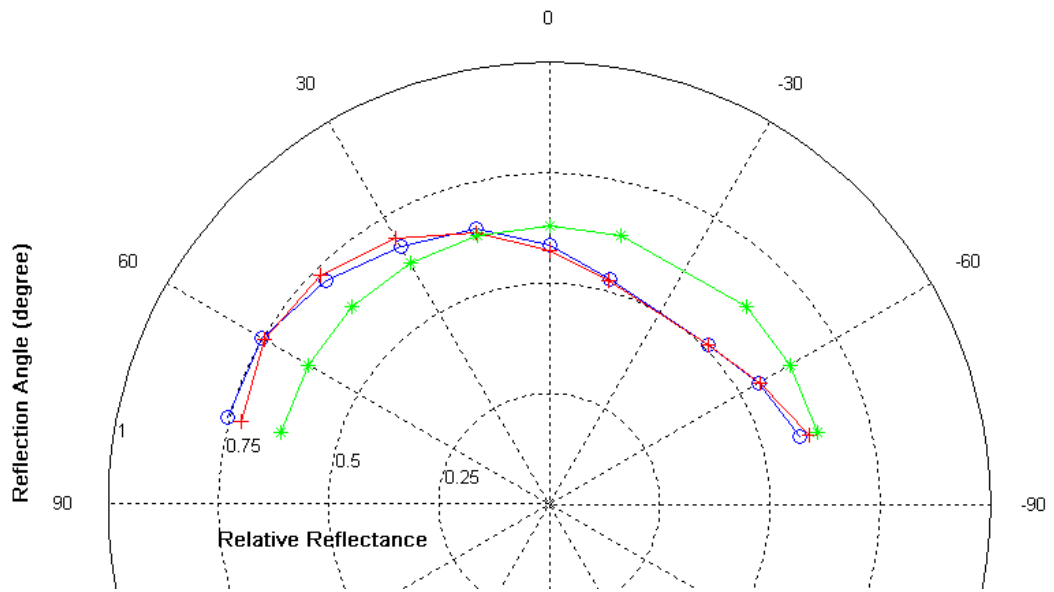
กราฟที่ 132 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Phong reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



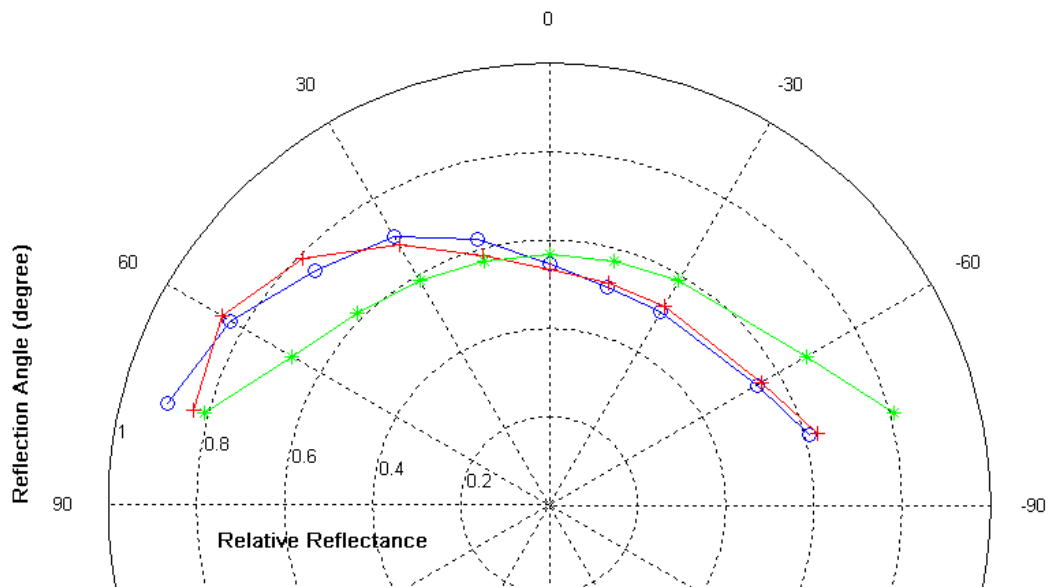
กราฟที่ 133 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



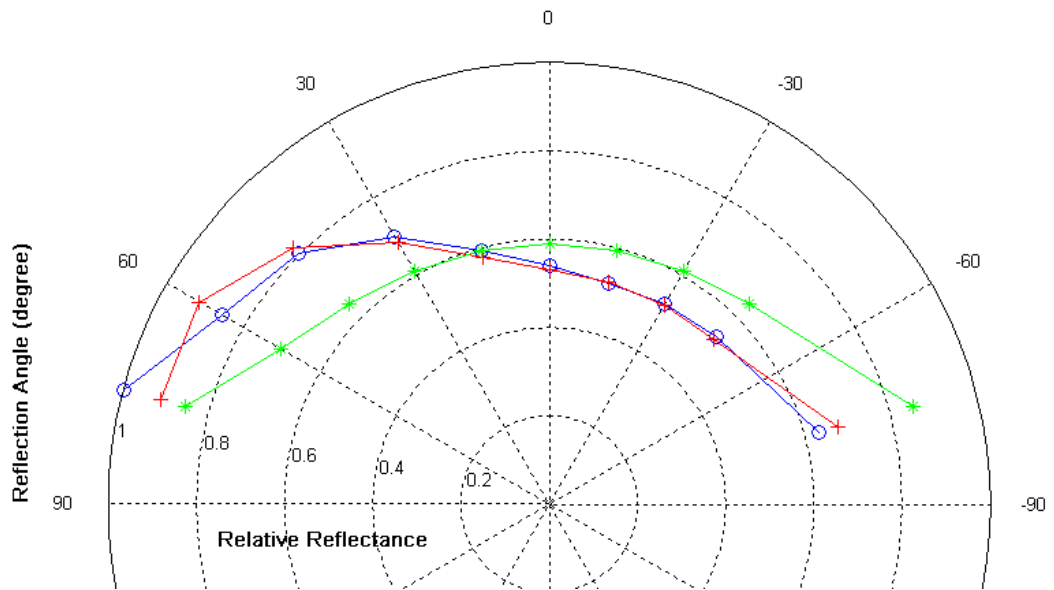
กราฟที่ 134 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



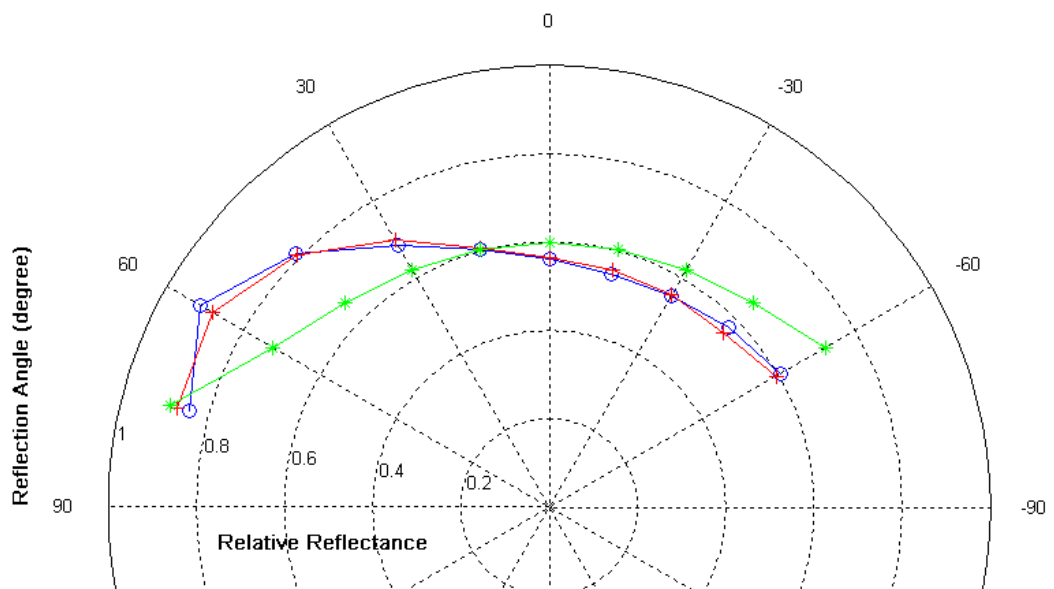
กราฟที่ 135 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



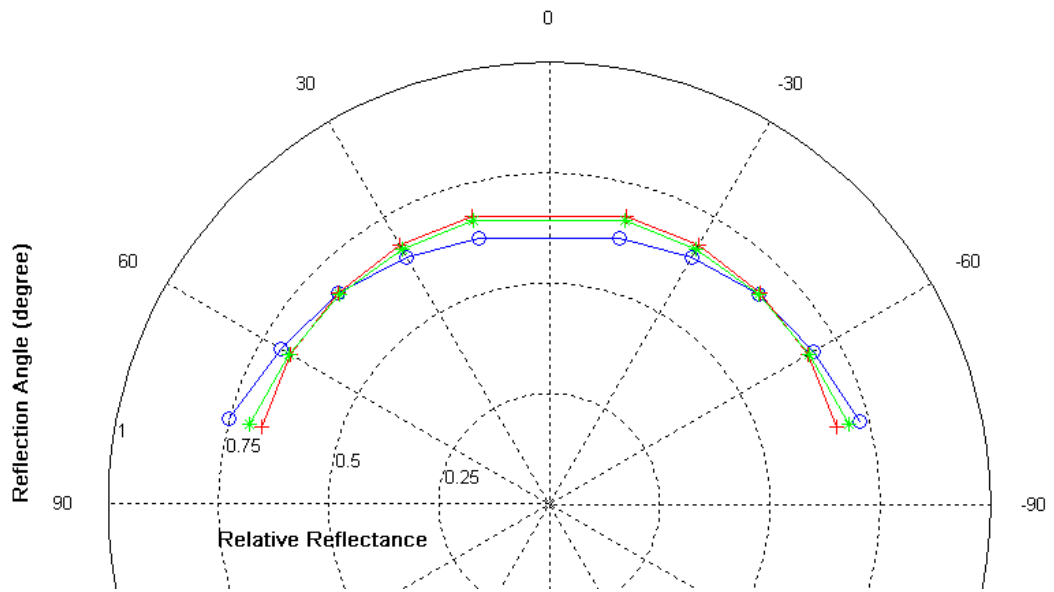
กราฟที่ 136 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



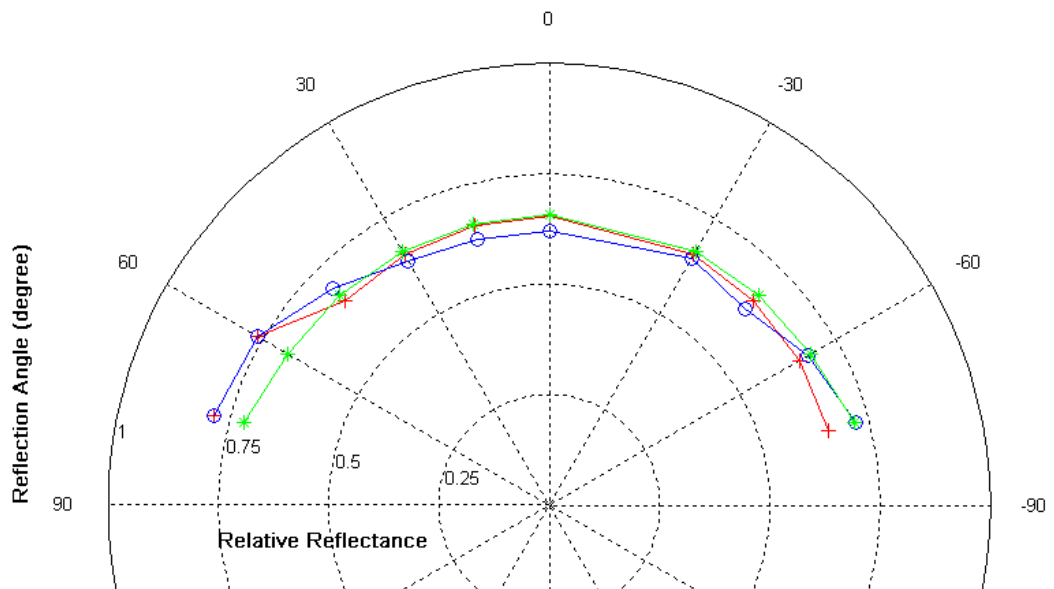
กราฟที่ 137 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมุมตกกระทบ -60 องศา



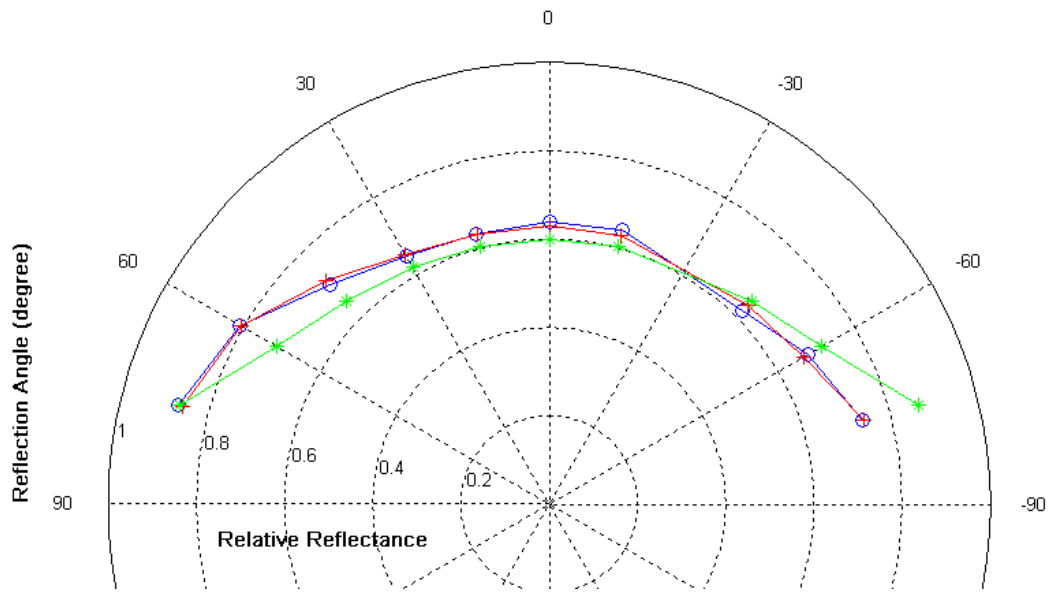
กราฟที่ 138 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมุมตกกระทบ -75 องศา



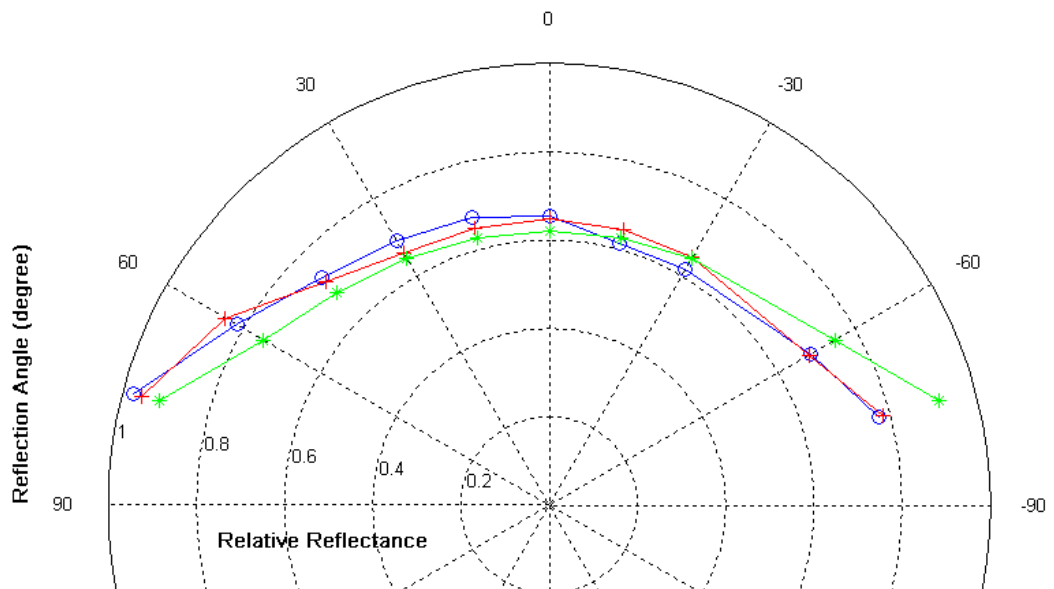
กราฟที่ 139 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมุมตกกระทบ 0 องศา



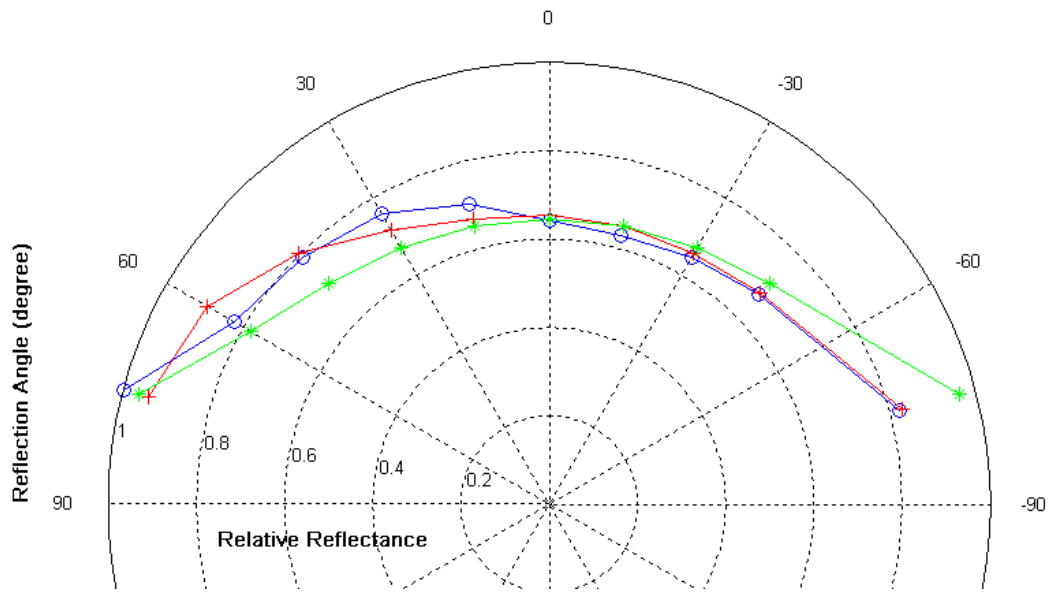
กราฟที่ 140 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มีมุมตกกระทบ -15 องศา



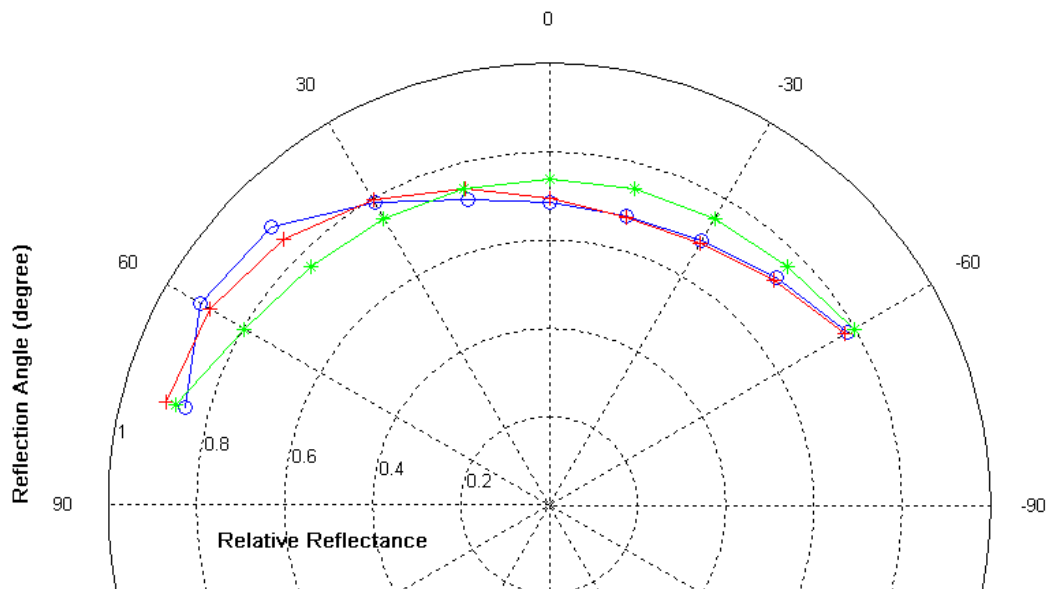
กราฟที่ 141 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



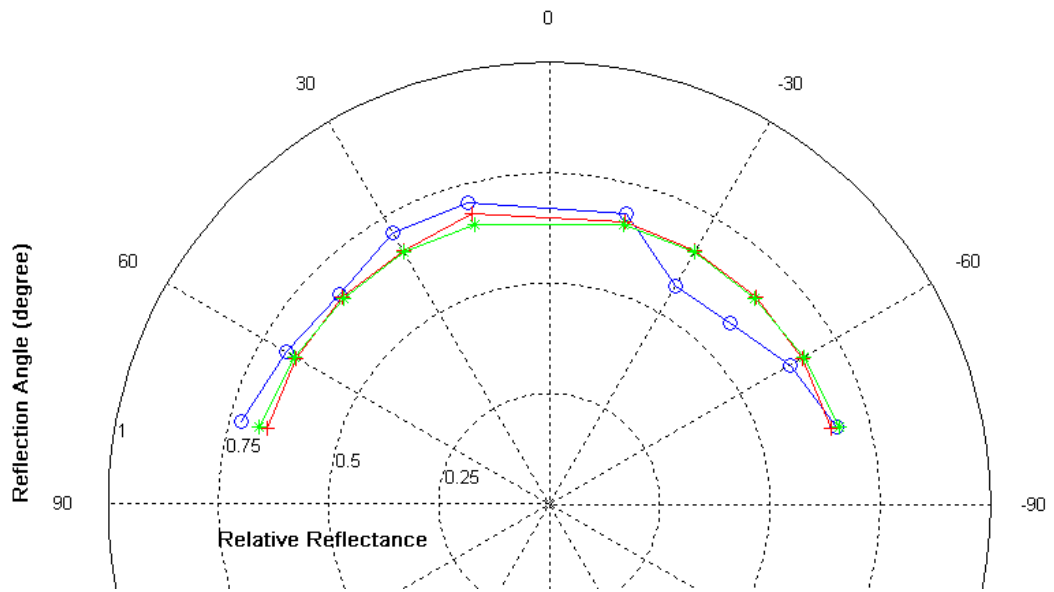
กราฟที่ 142 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



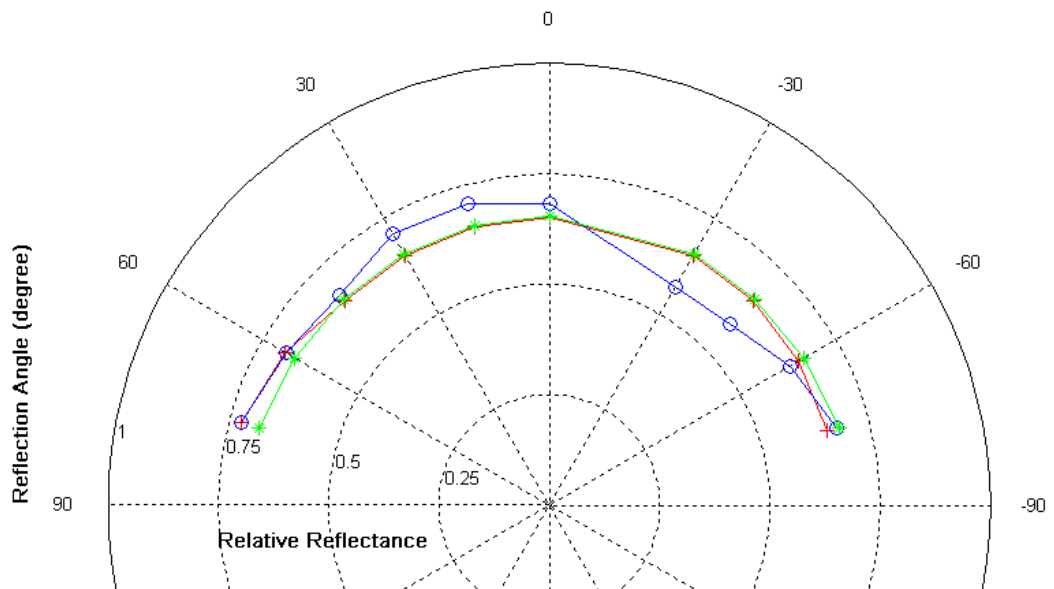
กราฟที่ 143 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



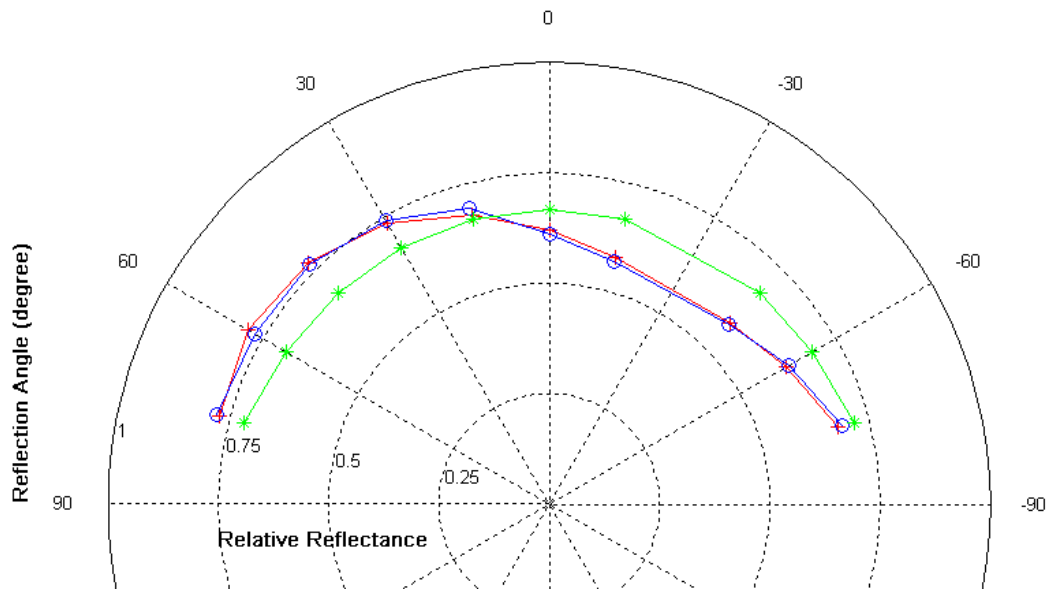
กราฟที่ 144 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



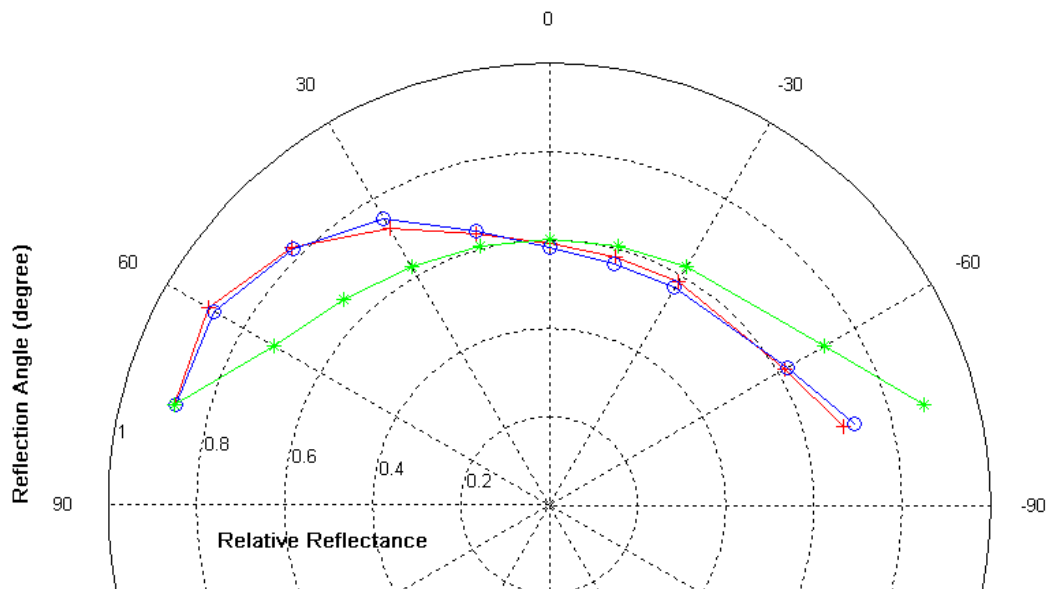
กราฟที่ 145 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มีมุมตกกระทบ 0 องศา



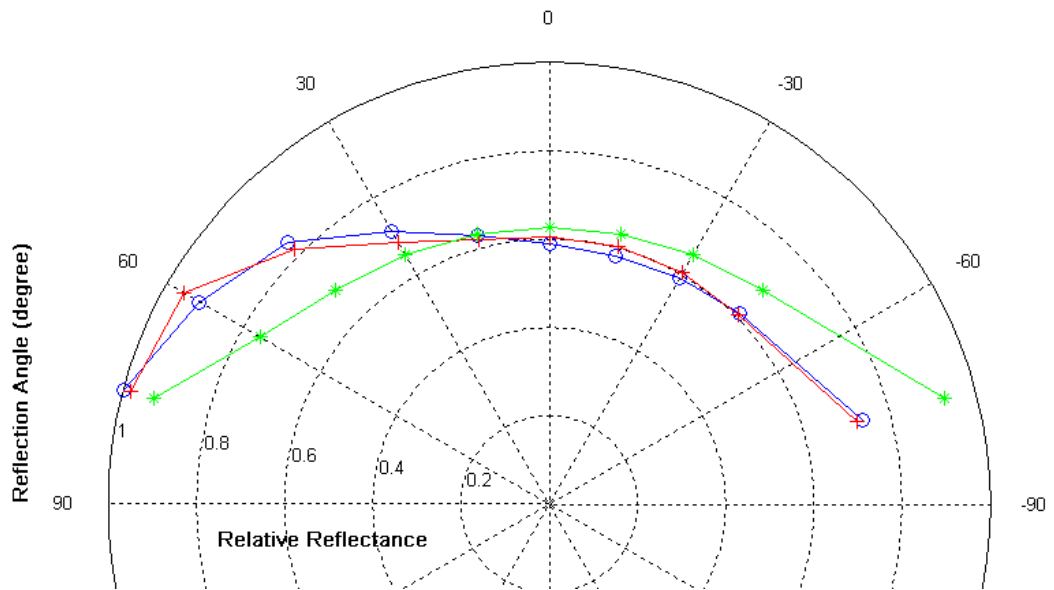
กราฟที่ 146 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มีมุมตกกระทบ -15 องศา



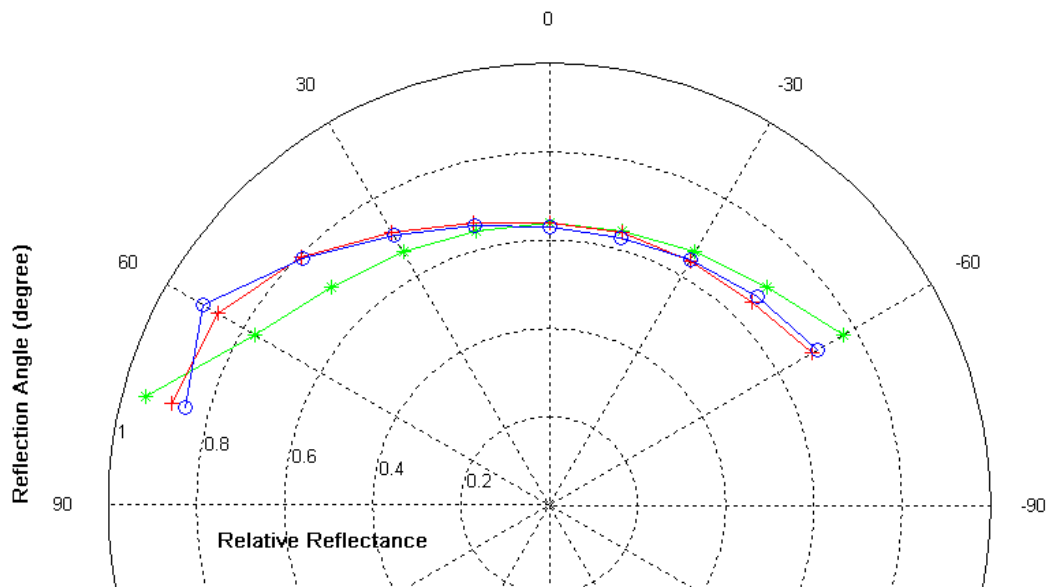
กราฟที่ 147 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



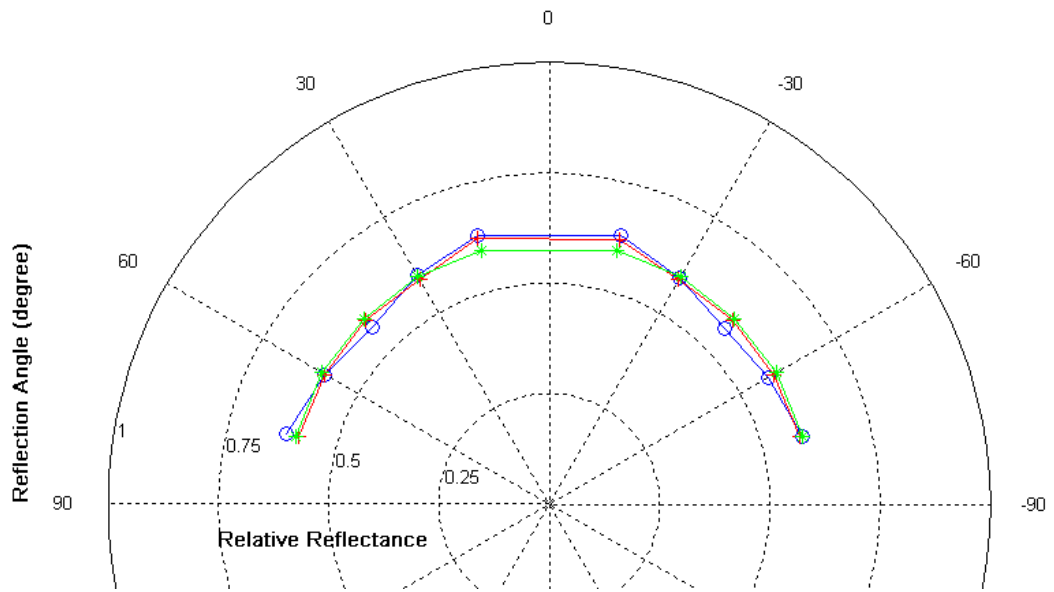
กราฟที่ 148 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



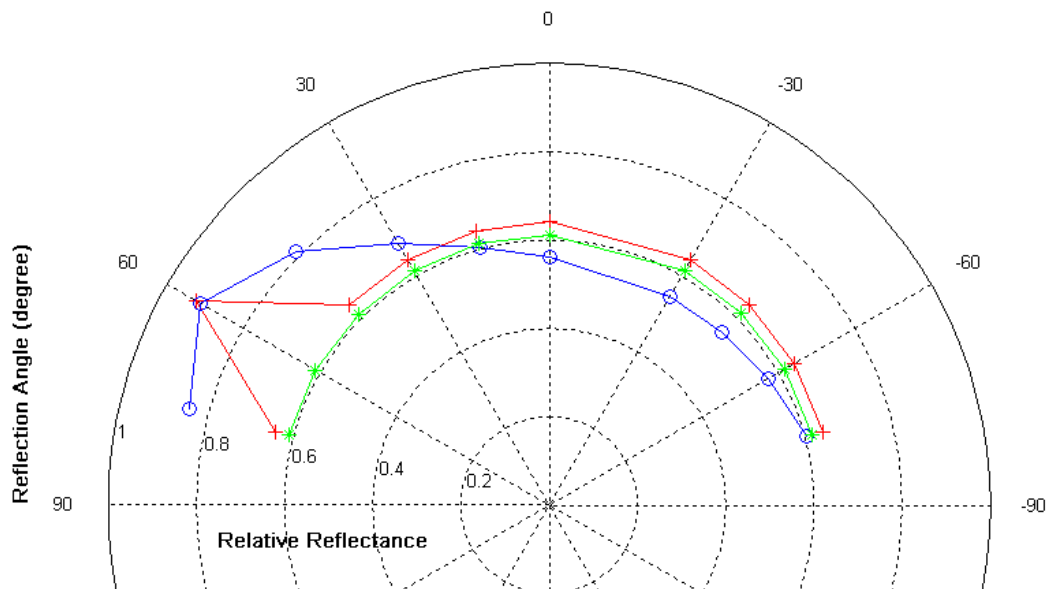
กราฟที่ 149 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



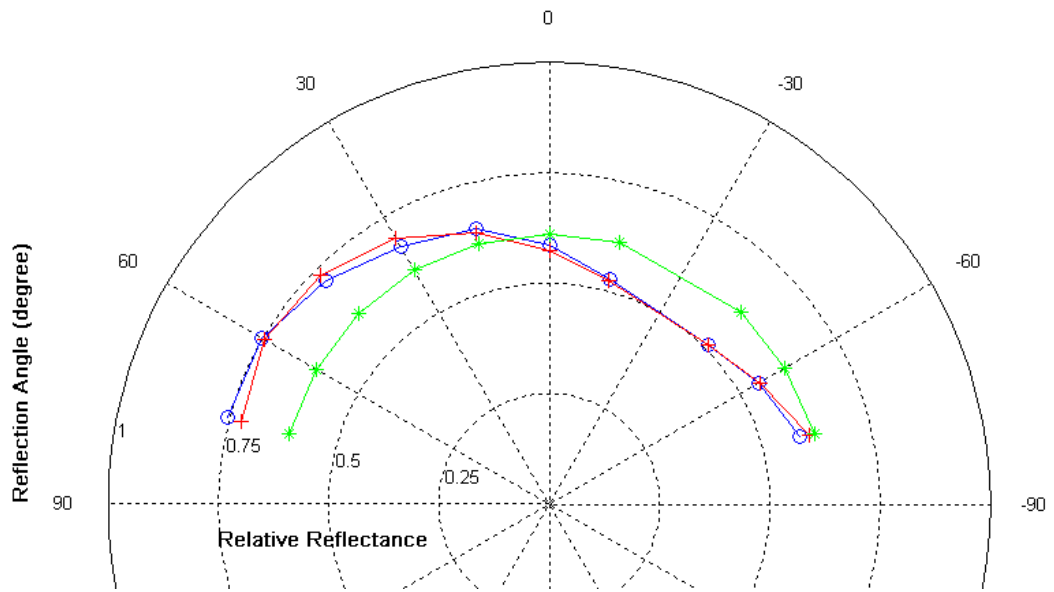
กราฟที่ 150 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ward reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



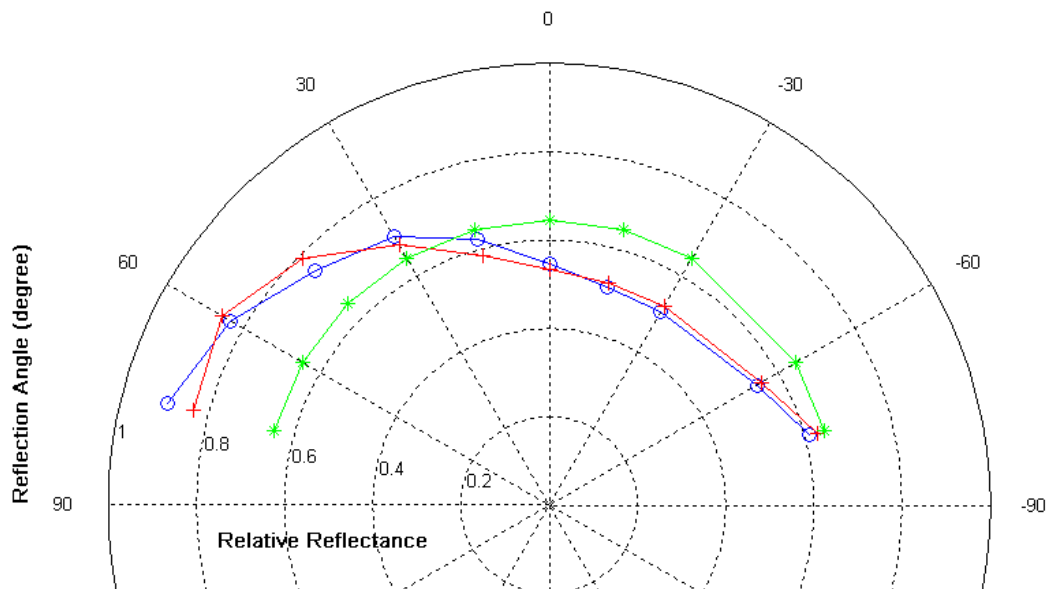
กราฟที่ 151 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมุมตกกระทบ 0 องศา



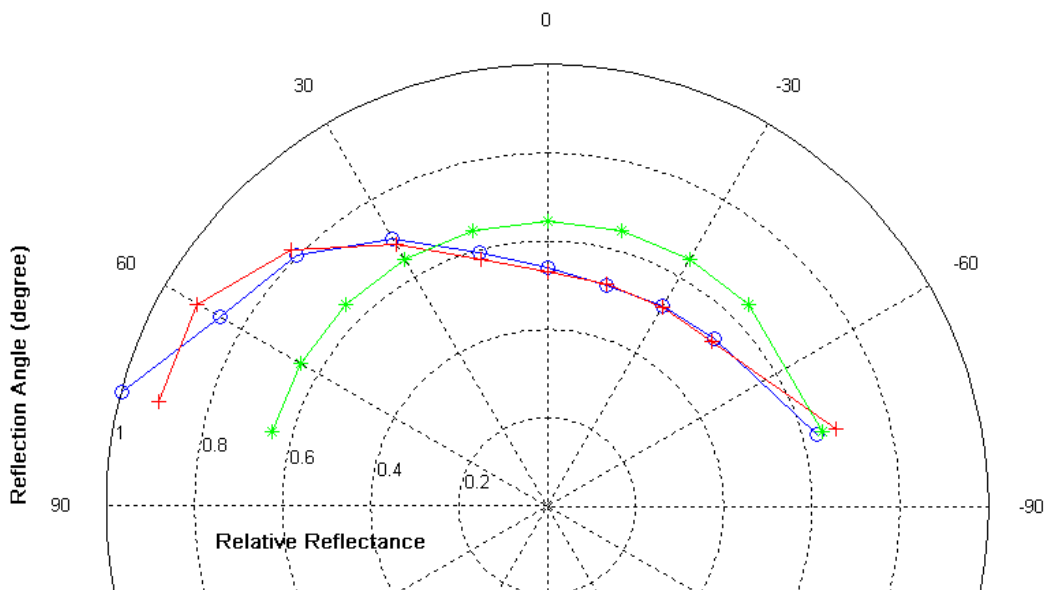
กราฟที่ 152 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีมุมตกกระทบ -15 องศา



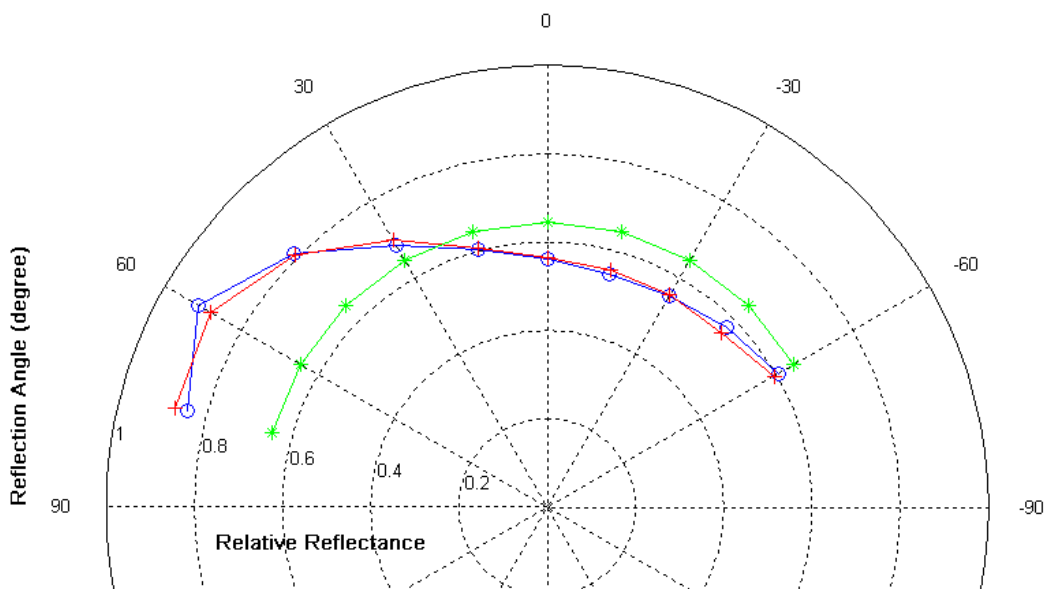
กราฟที่ 153 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



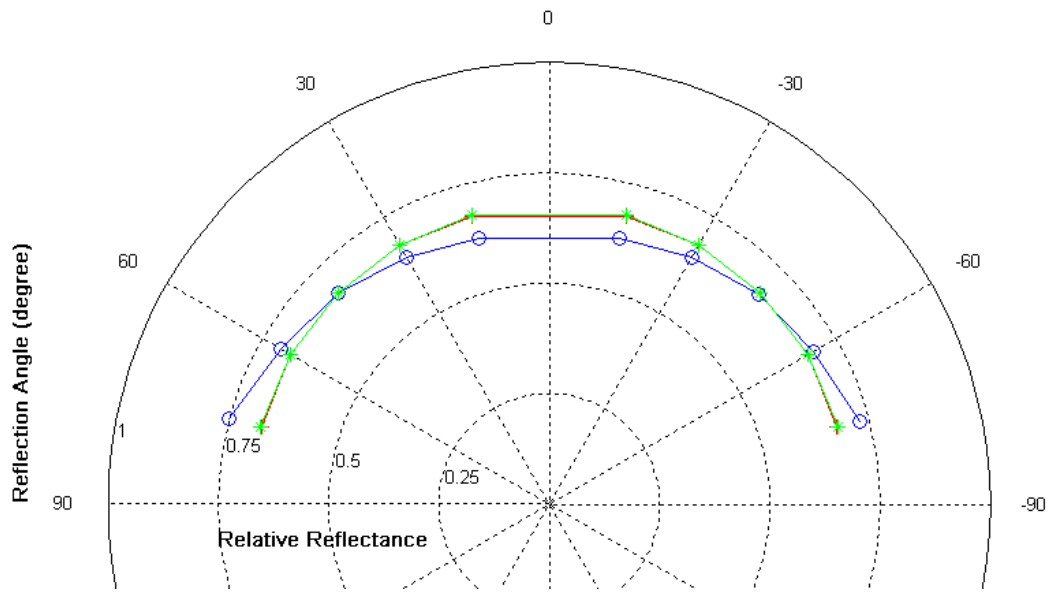
กราฟที่ 154 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



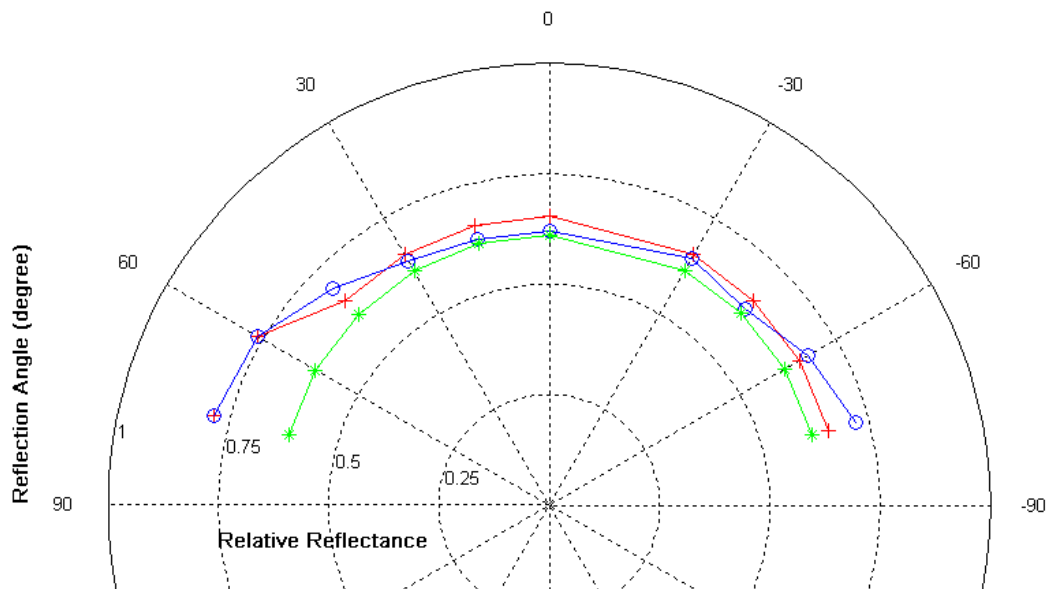
กราฟที่ 155 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



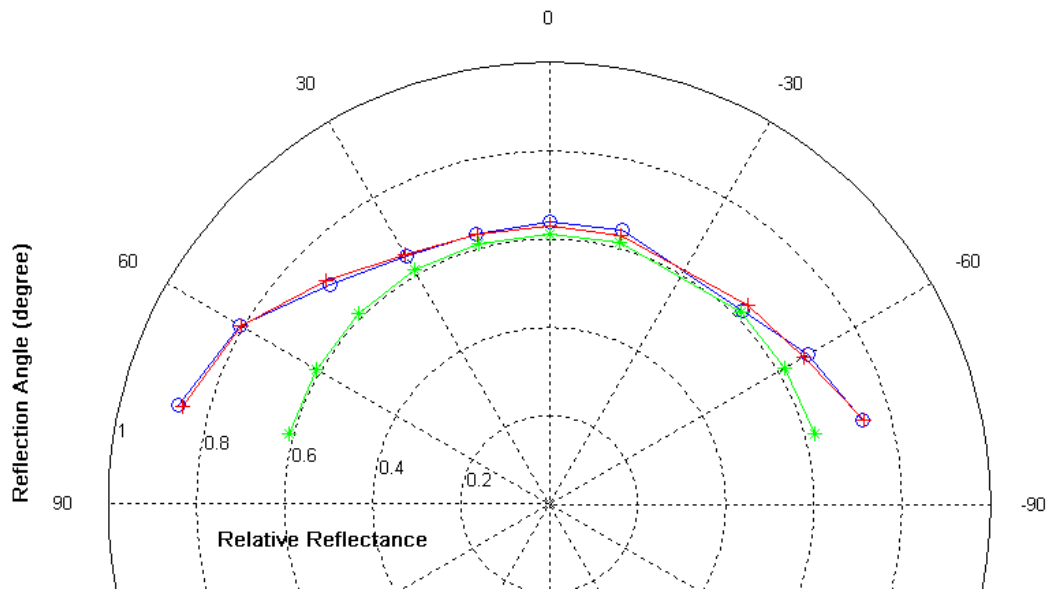
กราฟที่ 156 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



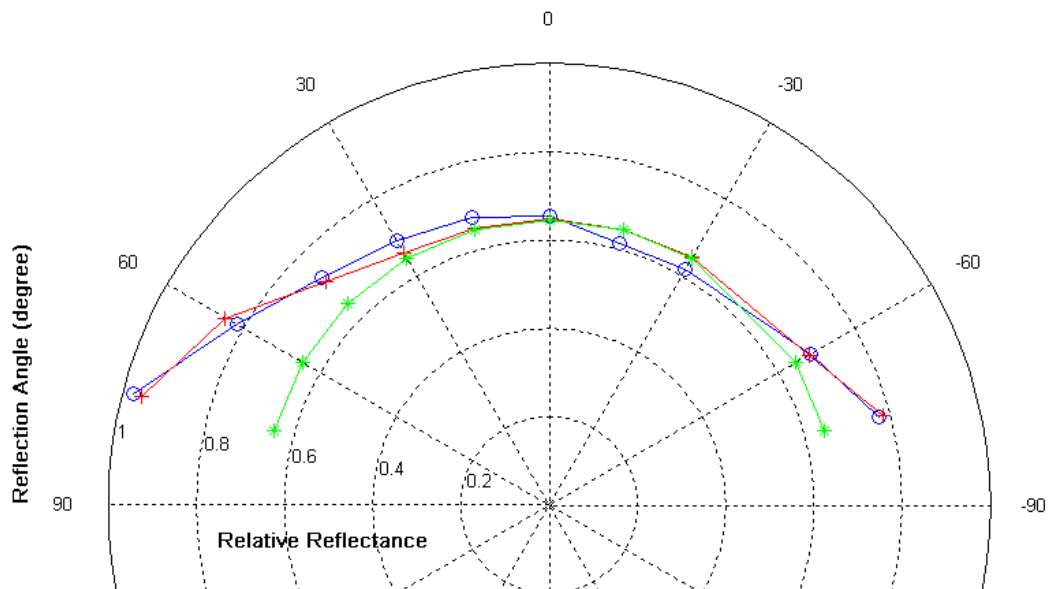
กราฟที่ 157 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



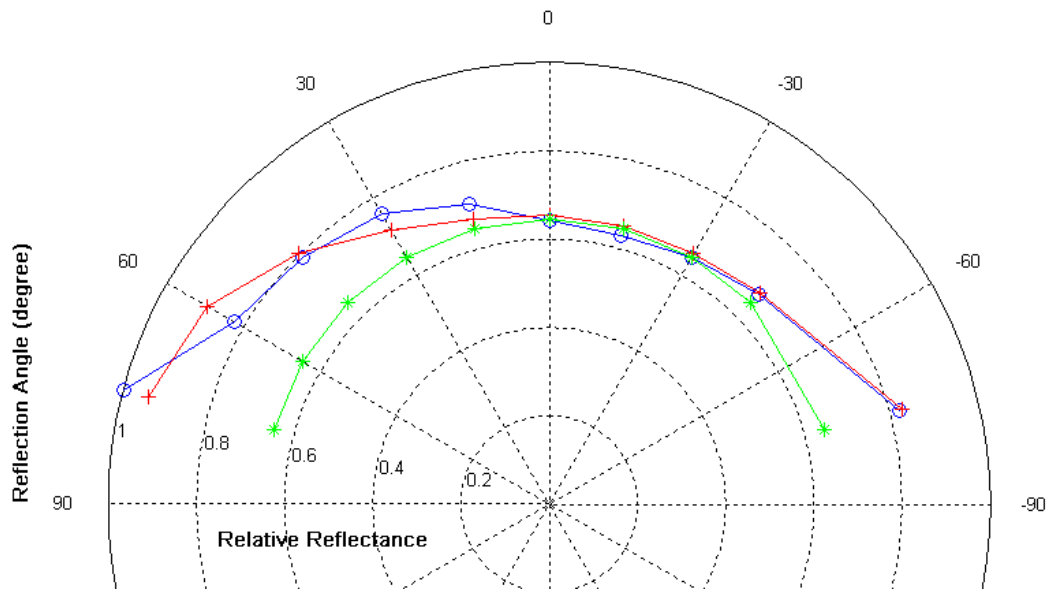
กราฟที่ 158 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



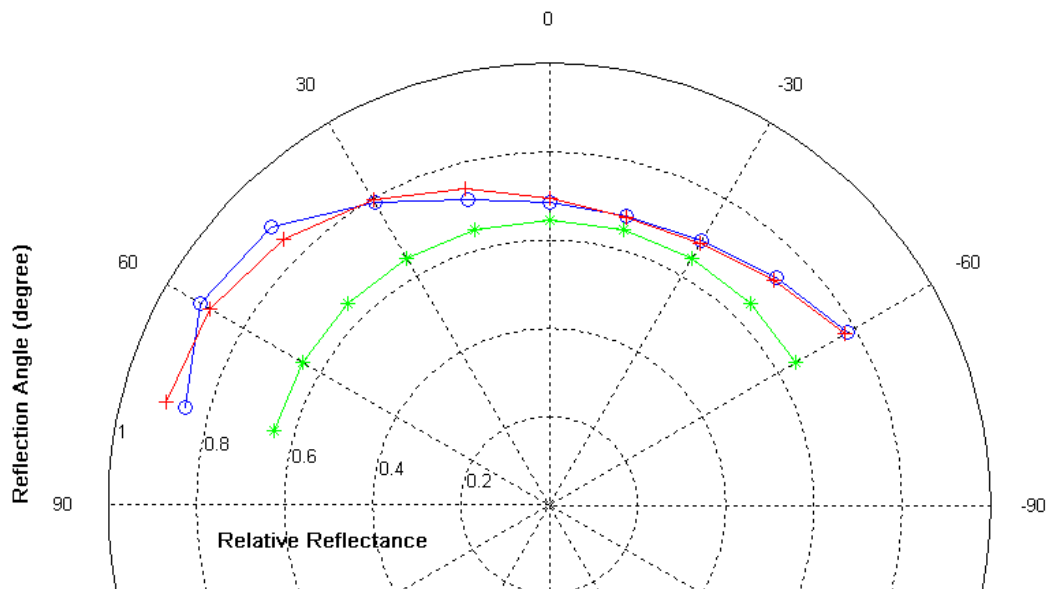
กราฟที่ 159 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



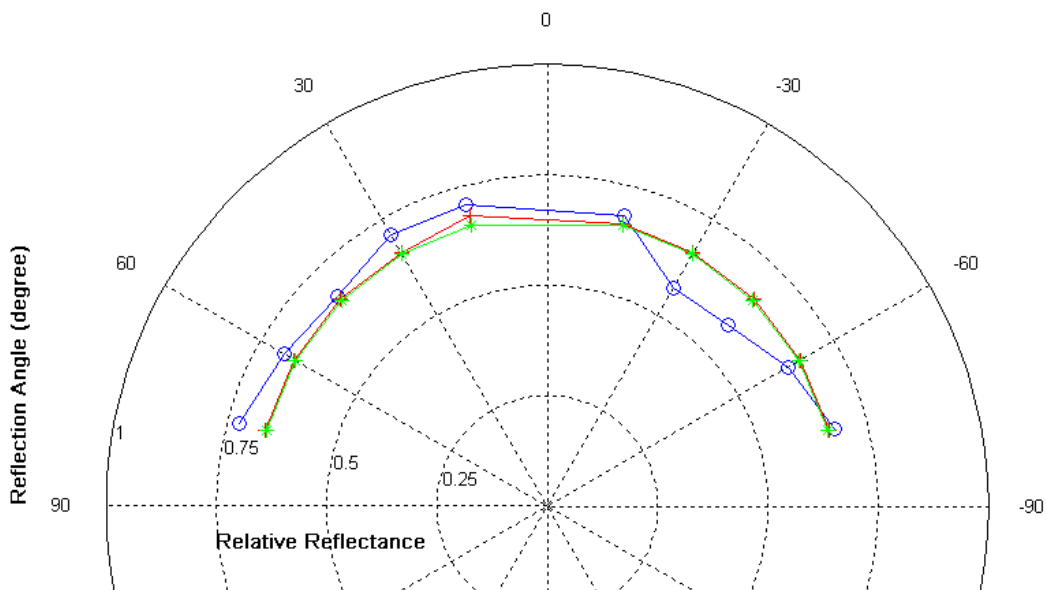
กราฟที่ 160 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



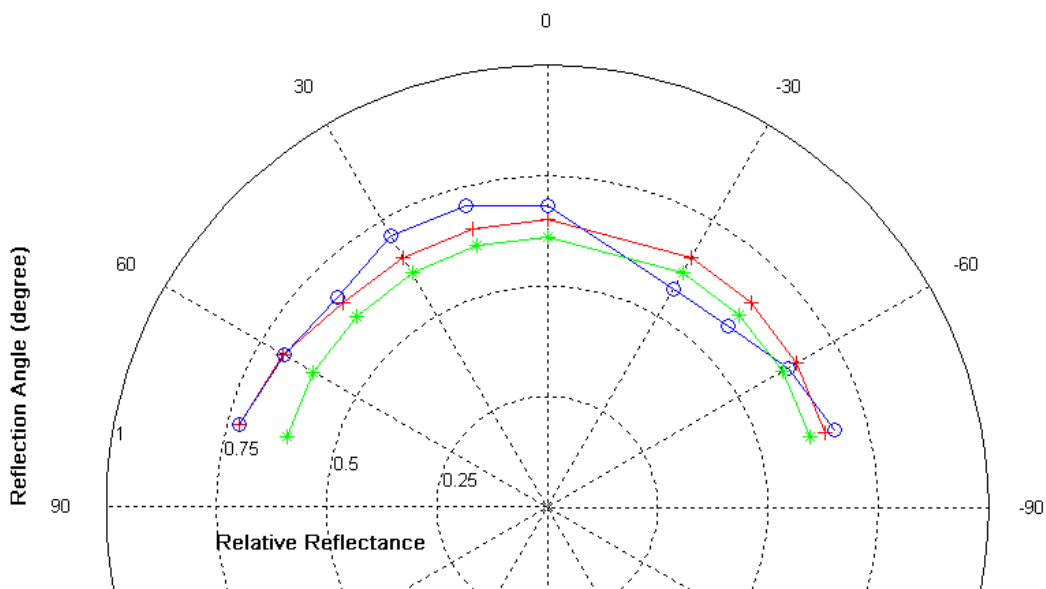
กราฟที่ 161 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



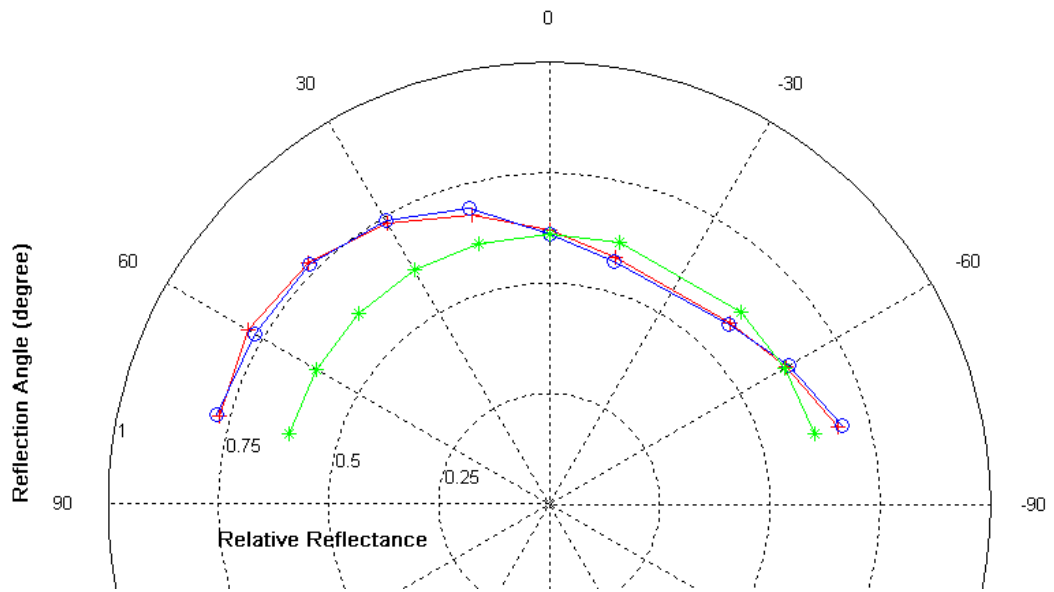
กราฟที่ 162 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



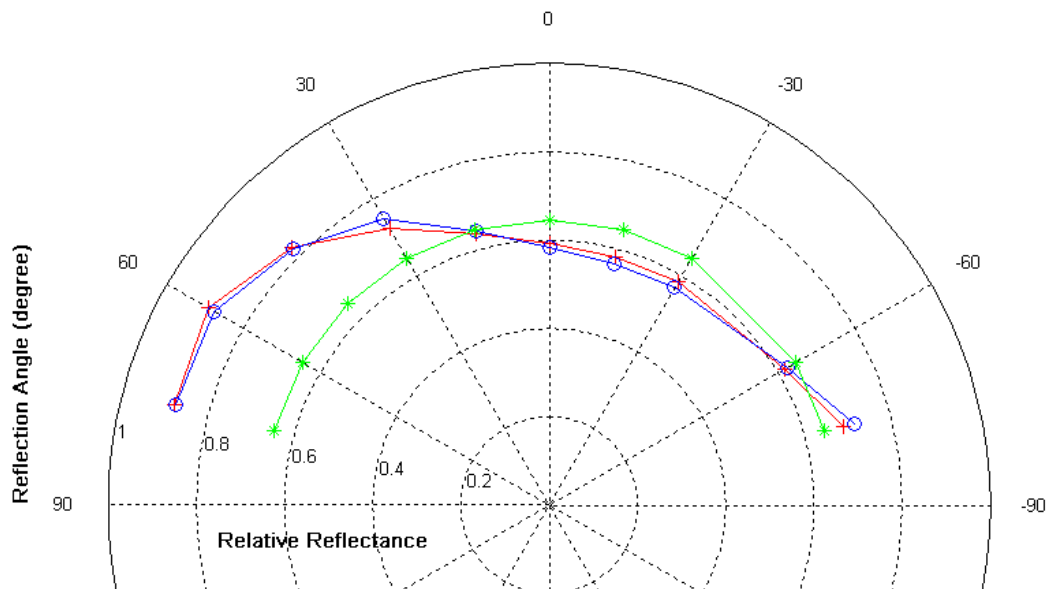
กราฟที่ 163 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



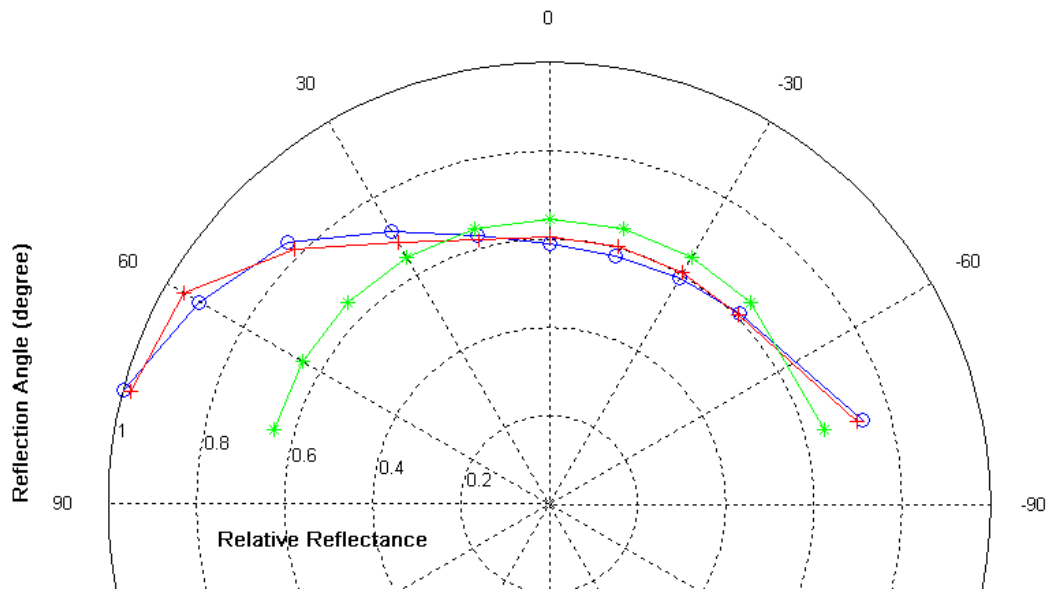
กราฟที่ 164 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



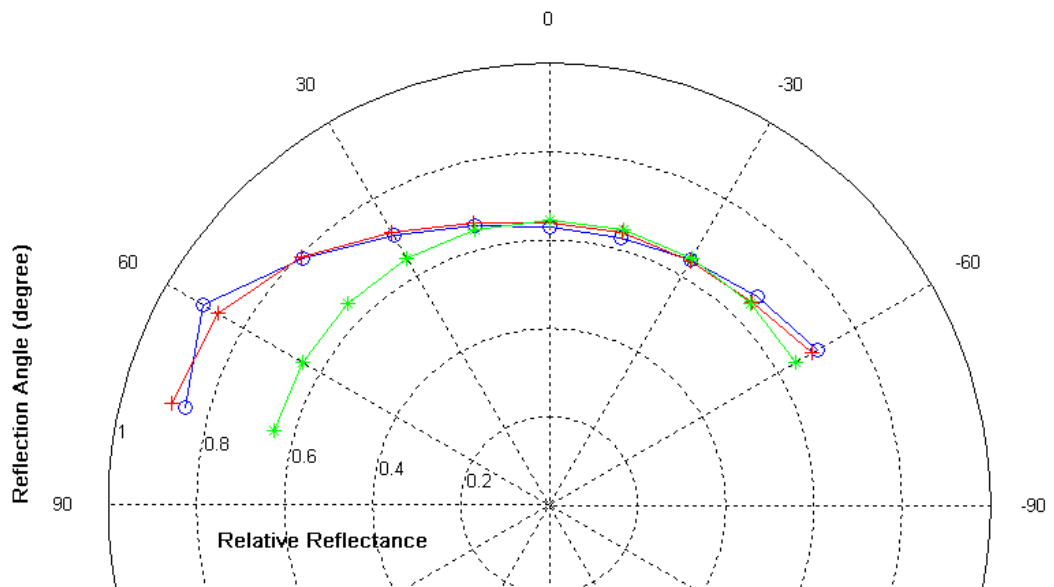
กราฟที่ 165 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



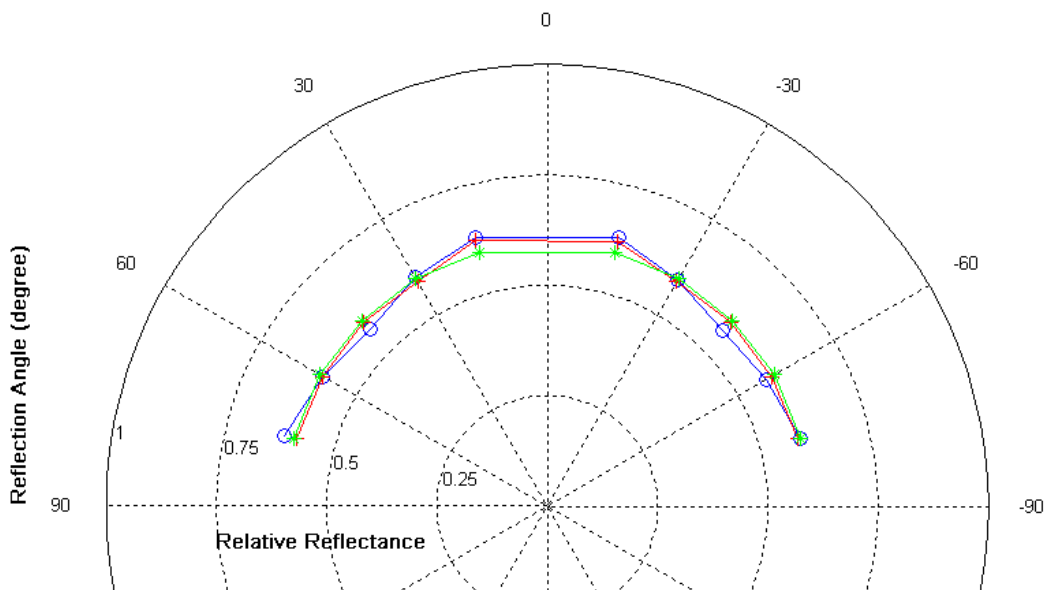
กราฟที่ 166 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



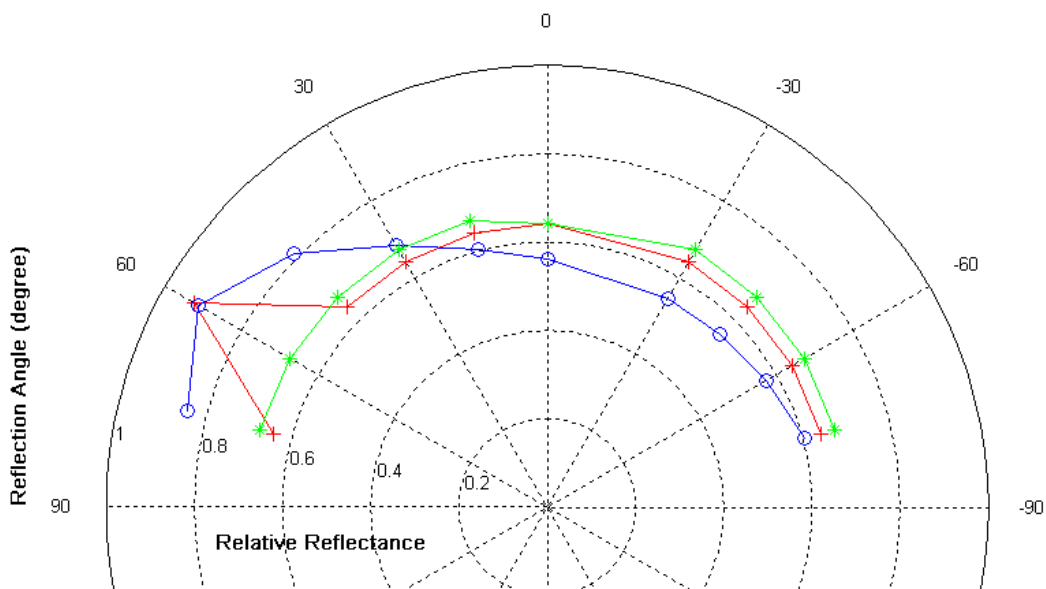
กราฟที่ 167 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



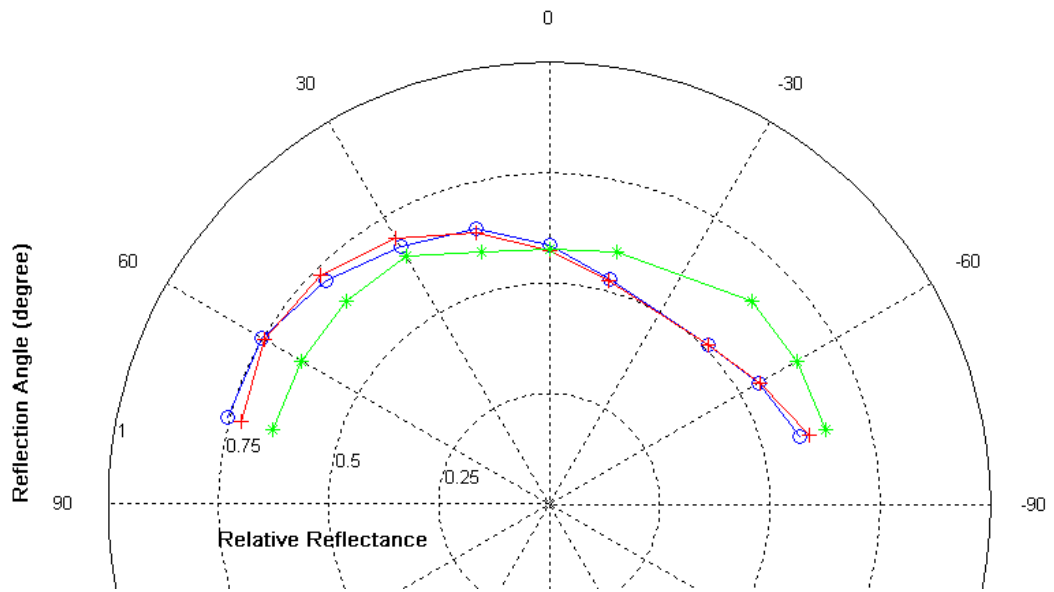
กราฟที่ 168 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Oren – Nayar reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



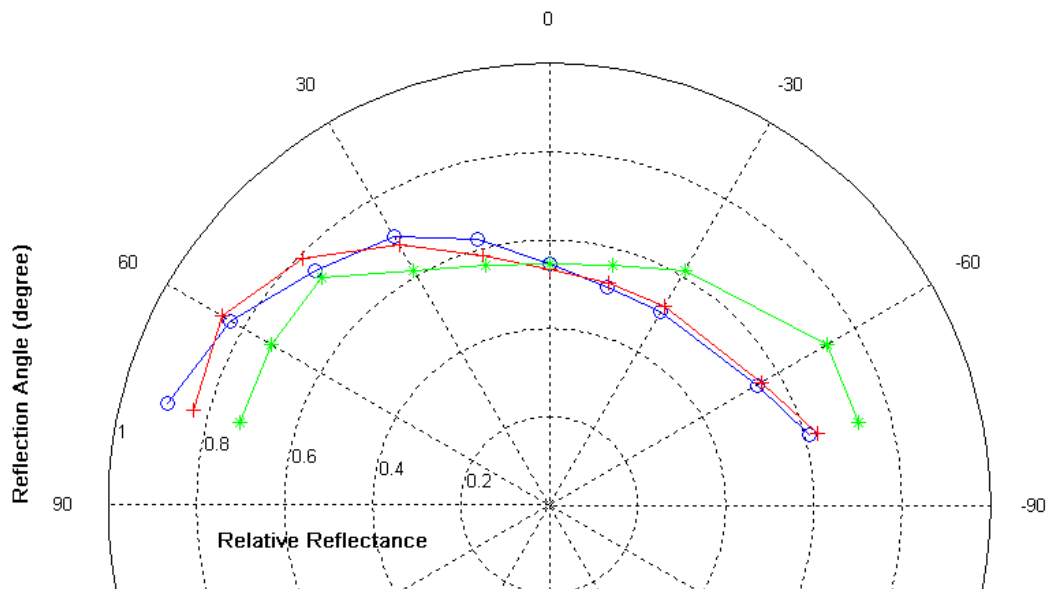
กราฟที่ 169 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



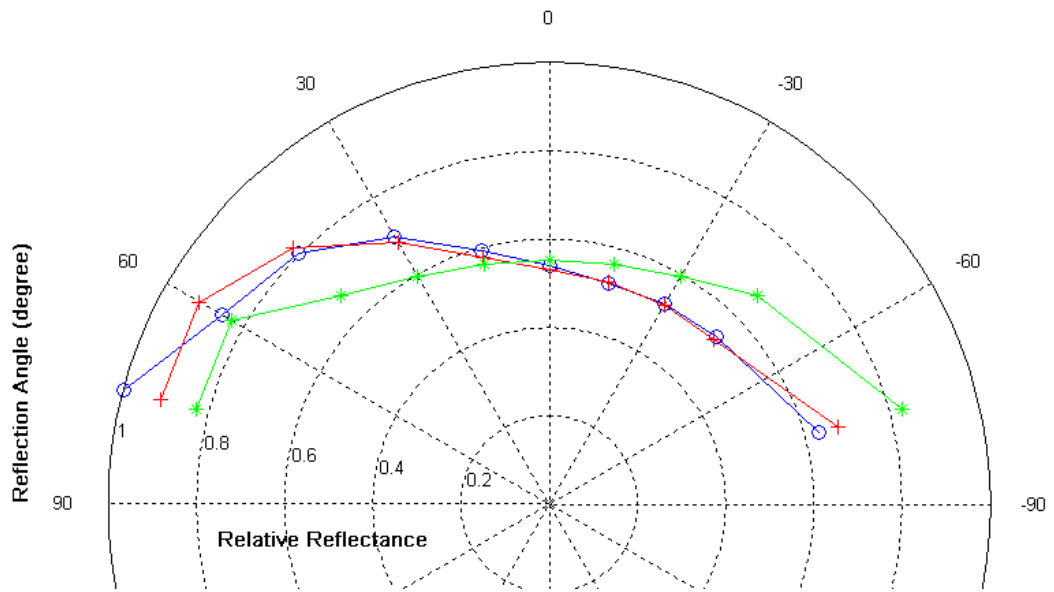
กราฟที่ 170 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



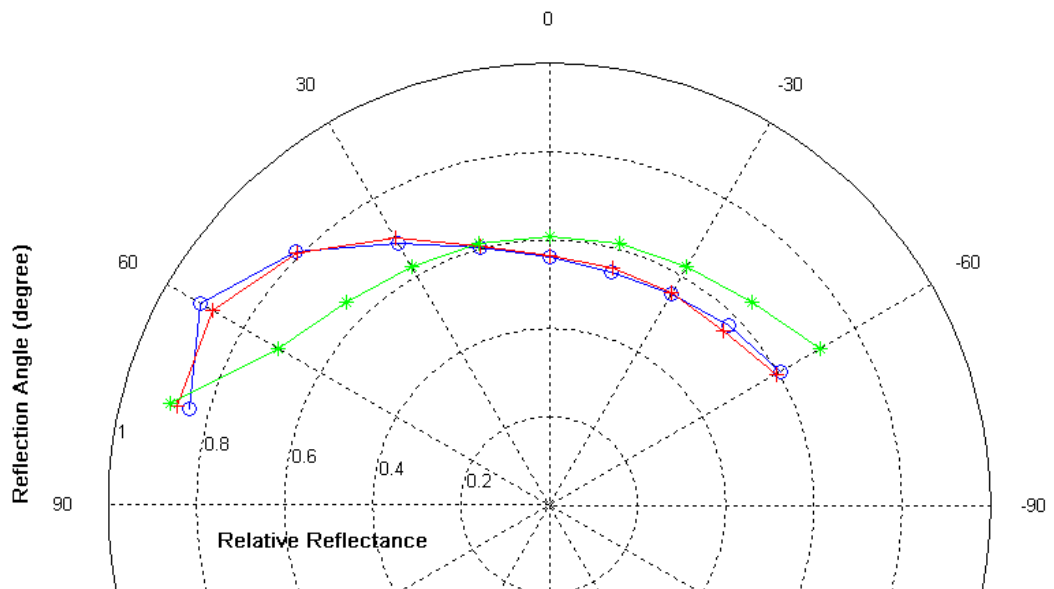
กราฟที่ 171 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



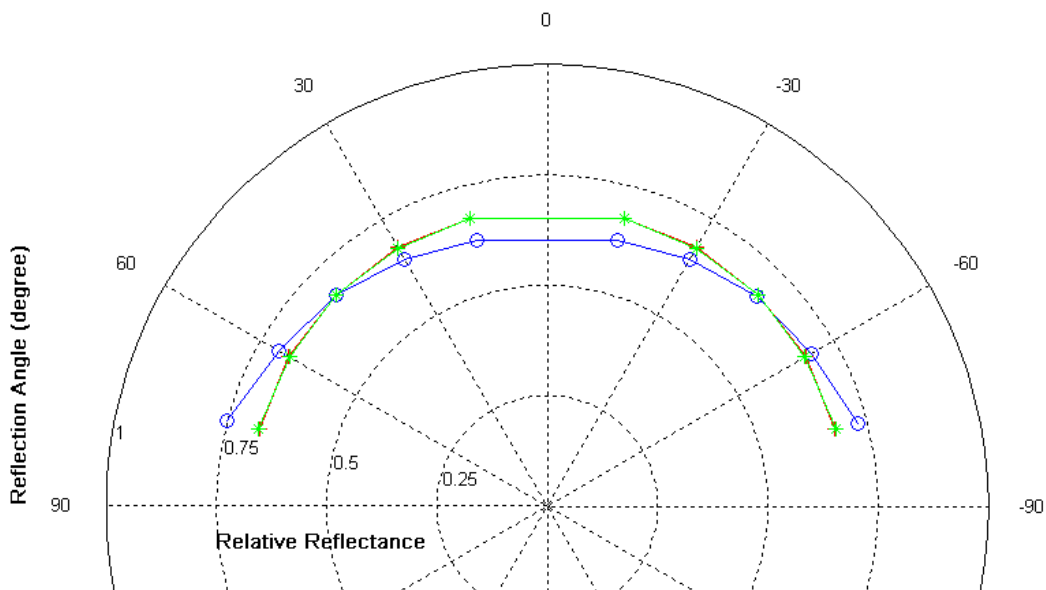
กราฟที่ 172 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



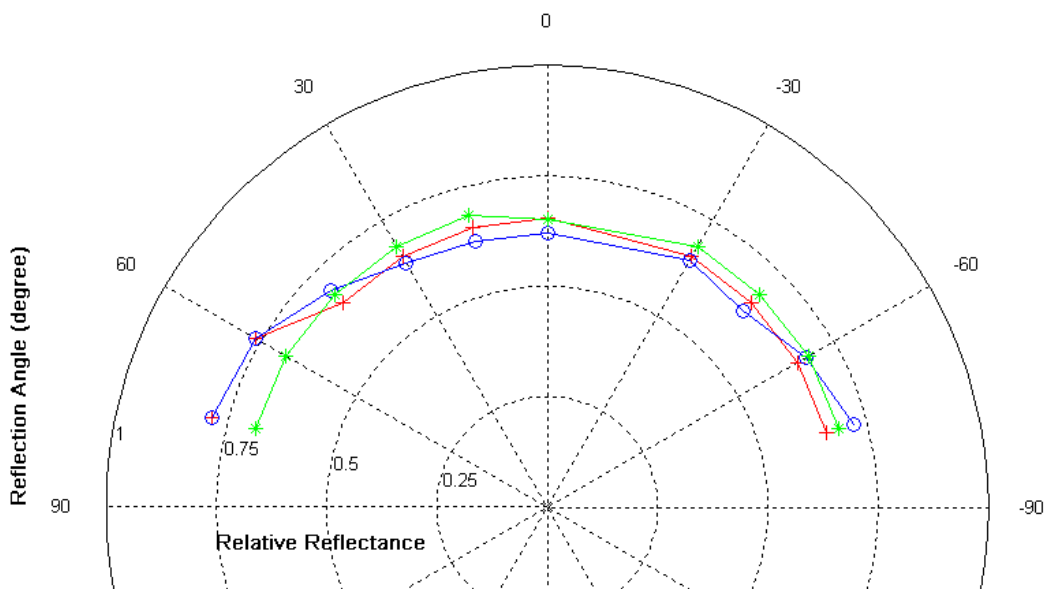
กราฟที่ 173 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



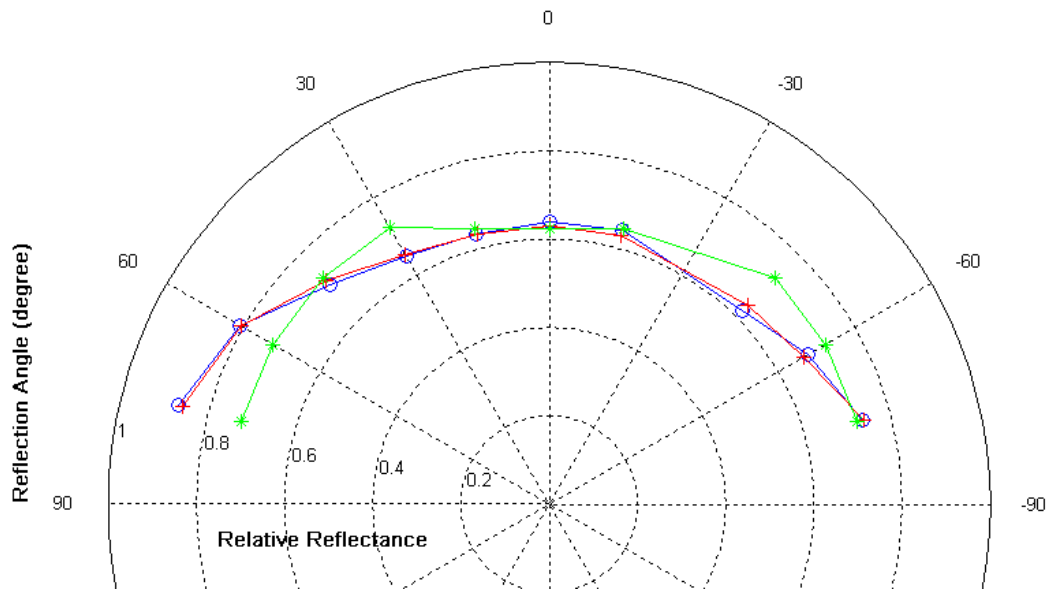
กราฟที่ 174 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



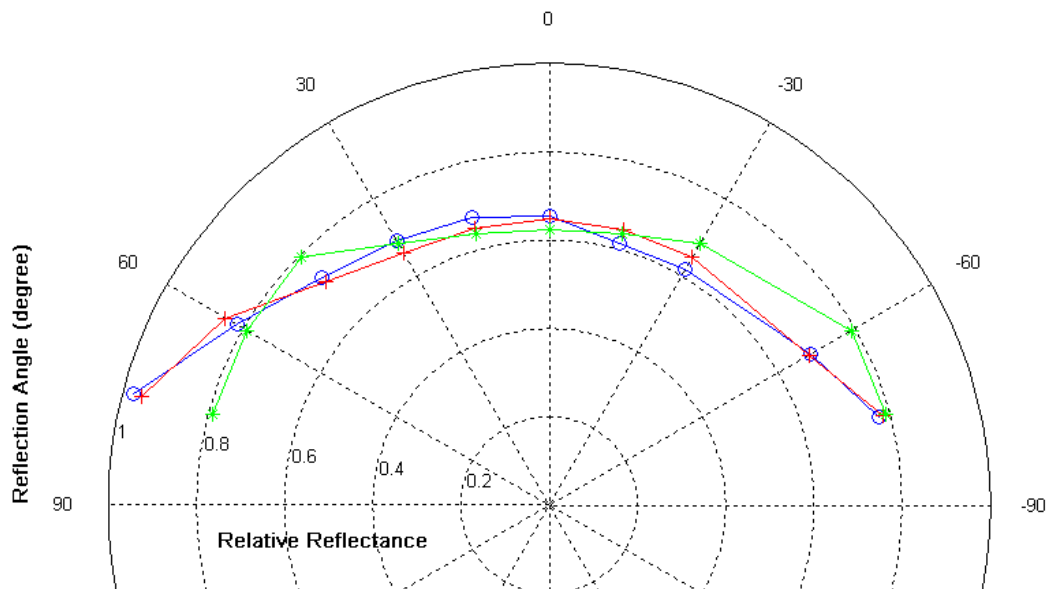
กราฟที่ 175 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



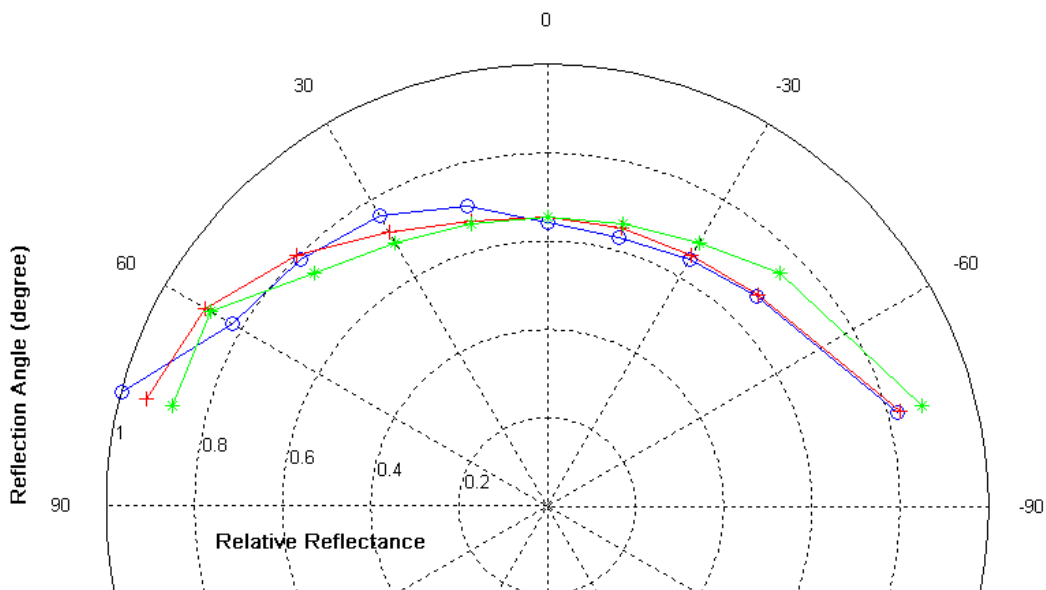
กราฟที่ 176 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



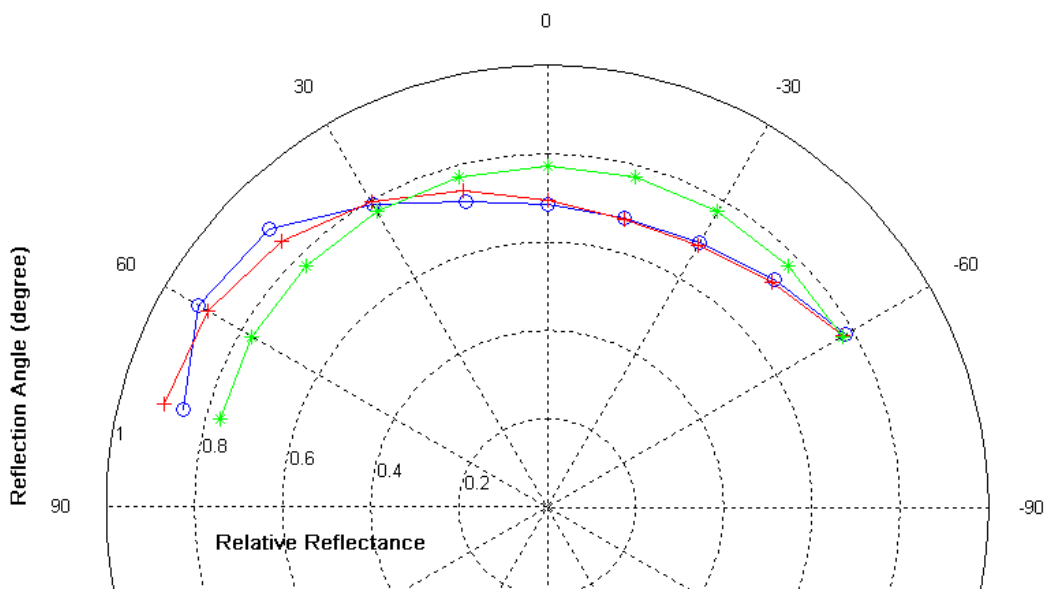
กราฟที่ 177 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



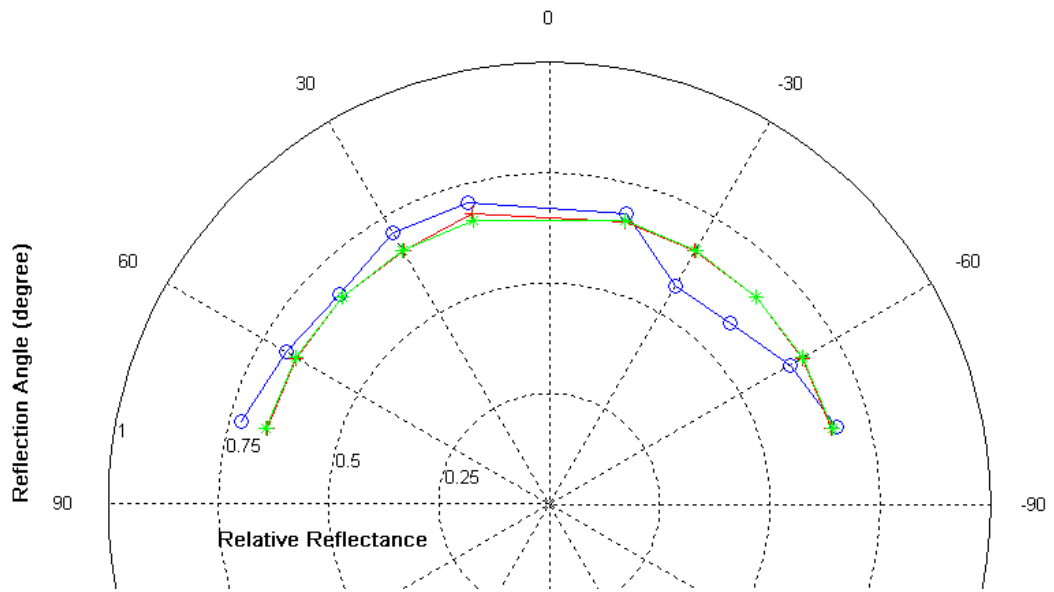
กราฟที่ 178 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



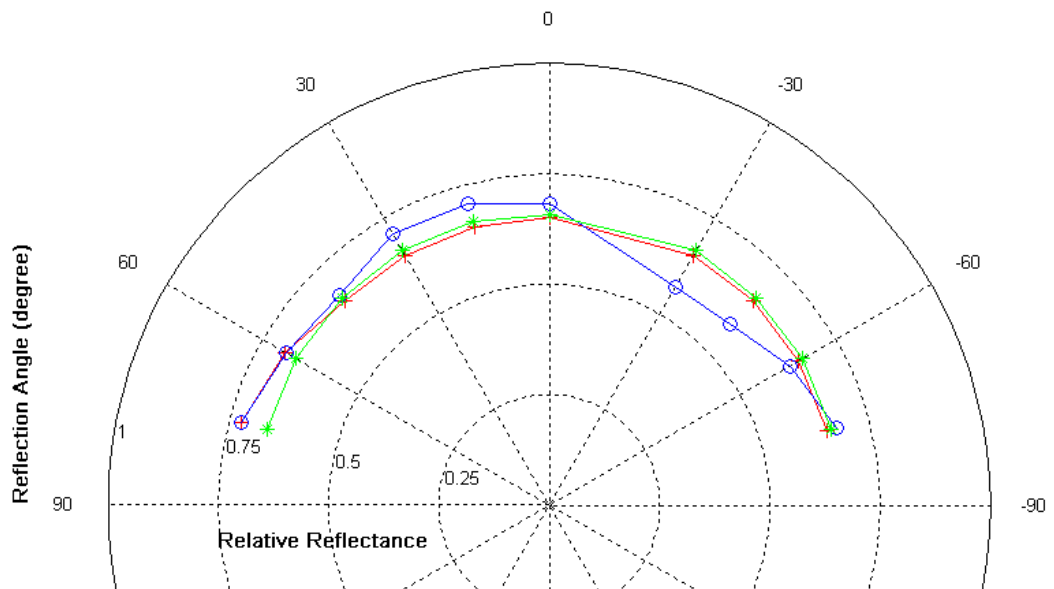
กราฟที่ 179 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



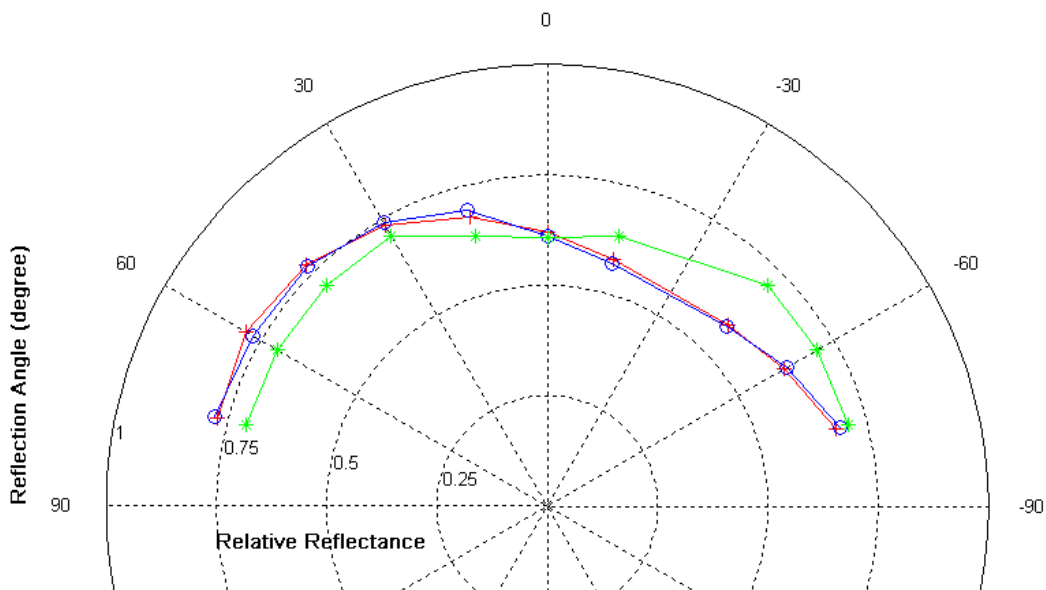
กราฟที่ 180 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา



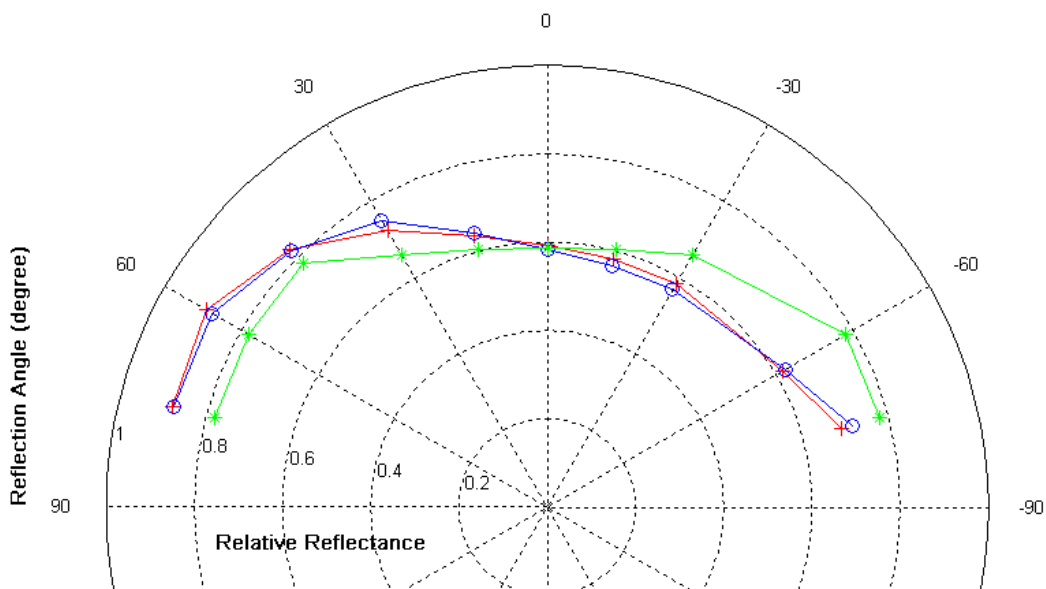
กราฟที่ 181 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ 0 องศา



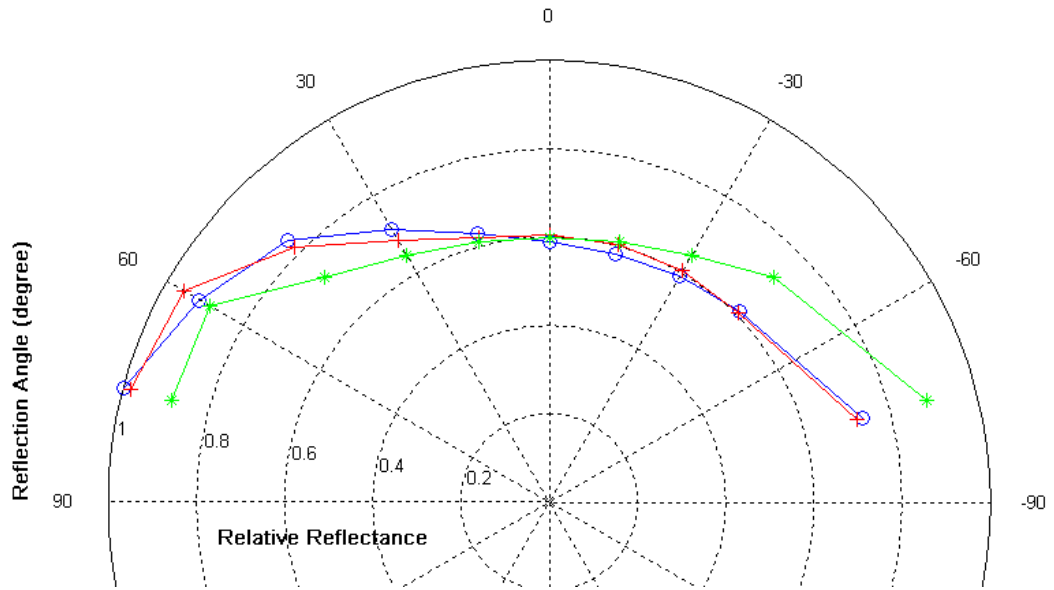
กราฟที่ 182 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -15 องศา



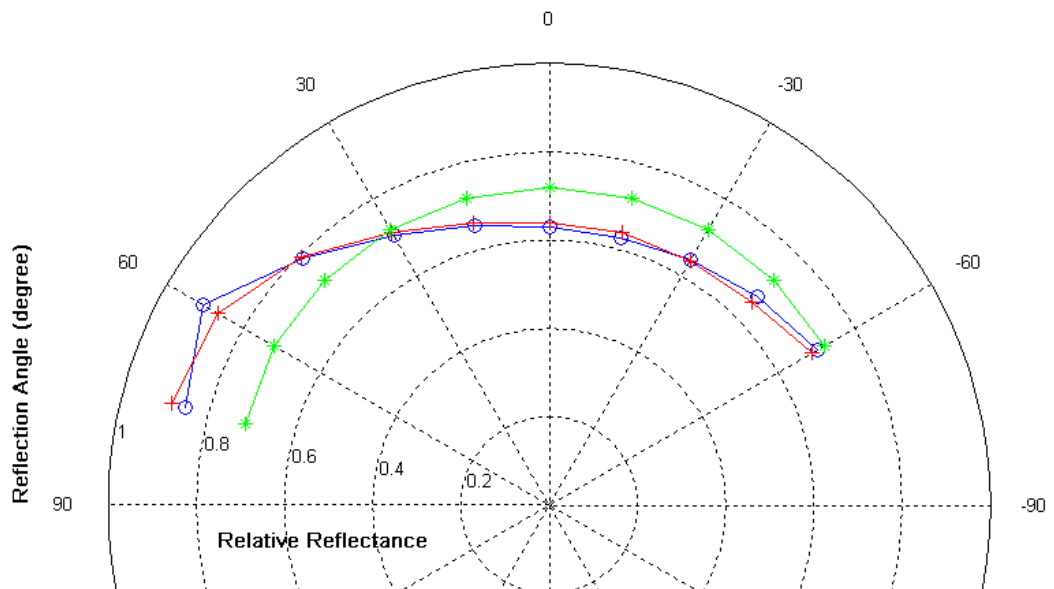
กราฟที่ 183 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -30 องศา



กราฟที่ 184 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -45 องศา



กราฟที่ 185 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -60 องศา



กราฟที่ 186 เส้นโค้งเปรียบเทียบระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่วัดจากผ้าไหม (o) ค่าการสะท้อนแสงจากแบบจำลองที่นำเสนอ (+) และค่าการสะท้อนแสงจาก Ashikhmin – Shirley reflectance model (*) ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตกกระทบ -75 องศา

ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของแบบจำลองการสะท้อนแสงที่นำเสนอ

ตัวอย่าง ที่	θ_i (degree)	θ_{off} (degree)	kd	ks	α	β	error
1	0	0.1	0.5880	0.4120	0.0000	71.8900	0.0023
	-15	46.1	0.6990	0.3010	2.4100	398.1100	0.1025
	-30	26.9	0.7550	0.2450	2.8580	2.0020	0.0028
	-45	19.0	0.6620	0.3380	0.6900	3.9920	0.0088
	-60	7.1	0.5930	0.4070	0.1850	4.0050	0.0144
	-75	-9.1	0.6660	0.3340	0.1350	4.0140	0.0024
2	0	-0.1	0.6760	0.3240	0.0000	1044.9000	0.0168
	-15	52.9	0.7000	0.3000	1.8660	108.8900	0.0094
	-30	47.1	0.7700	0.2300	1.3900	6.0010	0.0010
	-45	34.1	0.6840	0.3160	0.1600	8.0010	0.0055
	-60	17.1	0.7110	0.2890	0.1210	4.0000	0.0126
	-75	-2.9	0.7750	0.2250	0.1030	2.0000	0.0047
3	0	8.1	0.6620	0.3380	0.0000	399.8900	0.0234
	-15	53.1	0.7000	0.3000	2.0150	200.1100	0.0198
	-30	30.1	0.7740	0.2260	2.2010	1.9950	0.0012
	-45	20.1	0.6860	0.3140	0.4700	3.9900	0.0022
	-60	10.1	0.6140	0.3860	0.0200	5.9920	0.0046
	-75	-2.9	0.7500	0.2500	0.1190	3.9940	0.0035

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของแบบจำลองการสะท้อนแสงฟอง

ตัวอย่างที่	θ_i (degree)	k_d	k_s	p	error
1	0	0.02	0.5800	0.0000	0.005
	-15	-0.22	0.8600	1.5300	0.1363
	-30	-0.1	1.0600	2.9100	0.0679
	-45	-0.26	0.9300	0.3200	0.121
	-60	-0.4	1.2500	0.3900	0.1349
	-75	-0.39	1.7800	0.4600	0.086
2	0	-0.16	0.7800	0.0000	0.0005
	-15	-0.19	0.8400	1.2000	0.0088
	-30	-0.23	1.3000	2.9300	0.0237
	-45	-0.31	1.4100	1.1800	0.0378
	-60	-0.35	1.0400	0.0600	0.0332
	-75	-0.26	2.0000	0.5400	0.0321
3	0	0.01	0.6600	0.0000	0.0003
	-15	-0.03	0.7000	0.6800	0.024
	-30	-0.13	0.9100	1.1600	0.05
	-45	-0.27	1.2700	1.0300	0.0831
	-60	-0.41	1.2200	0.2700	0.0843
	-75	-0.32	1.5500	0.3600	0.0309

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของแบบจำลองการสะท้อนแสงวาร์ด

ตัวอย่างที่	θ_i (degree)	k_d	k_s	α	error
1	0	1.88	-0.0200	0.7900	0.0052
	-15	1.93	32.0000	8.0000	0.1571
	-30	1.98	22.0000	76.0000	0.0753
	-45	1	65.0300	4.9600	0.1352
	-60	1	86.8600	5.9900	0.1546
	-75	0.94	88.1200	6.7800	0.0959
2	0	1.96	85.0000	13.0000	0.0080
	-15	1.88	12.0000	4.0000	0.0172
	-30	1	81.7400	5.0000	0.0371
	-45	1	79.8500	4.9900	0.0414
	-60	1	72.6600	4.9900	0.0431
	-75	1.88	73.0000	9.0000	0.0433
3	0	1.98	39.0000	11.0000	0.0230
	-15	1.98	45.0000	12.0000	0.0231
	-30	1.93	22.0000	6.0000	0.0530
	-45	1	74.1500	4.9600	0.1091
	-60	1	10.5600	1.9600	0.1073
	-75	1	99.8700	6.9900	0.0433

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลองการสะท้อนแสงโอเรน – นายาร์

ตัวอย่างที่	θ_i (degree)	ρ	α	error
1	0	2.9230	0.9010	0.0052
	-15	1.9120	0.0000	0.2029
	-30	1.9120	0.0000	0.0822
	-45	2.0220	0.0000	0.1727
	-60	2.0220	0.0000	0.2541
	-75	2.0220	0.0000	0.1739
2	0	3.9340	1.9120	0.0168
	-15	1.9120	0.0000	0.0767
	-30	1.9120	0.0000	0.1357
	-45	2.0220	0.0000	0.1675
	-60	2.0220	0.0000	0.2262
	-75	2.0220	0.0000	0.2299
3	0	3.9900	2.9400	0.0249
	-15	1.9120	0.0000	0.0508
	-30	1.9120	0.0000	0.1117
	-45	2.0220	0.0000	0.1699
	-60	2.0220	0.0000	0.2592
	-75	2.0220	0.0000	0.1400

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของแบบจำลองการสะท้อนแสงแอซิกมิน – เซอร์ลีย์

ตัวอย่างที่	θ_i (degree)	P_u	P_v	R_d	R_s	error
1	0	1.2	1.3800	5.1100	0.2100	0.0052
	-15	10.3	4.1200	5.1100	0.2100	0.1624
	-30	11.2	-4.5400	4.0400	-0.1100	0.0676
	-45	11.2	7.8100	2.4000	-0.2000	0.1138
	-60	10.89	-4.3000	2.3900	-0.5100	0.1236
	-75	9.3	-9.0400	1.6400	-1.9900	0.1016
2	0	10.6000	5.1100	5.1100	0.2100	0.0164
	-15	11	-0.4000	6.1000	0.1900	0.0291
	-30	10.5	-8.0000	7.6000	0.1000	0.0482
	-45	11.15	0.7000	2.7700	-0.3100	0.0586
	-60	9.4	-2.9300	1.9600	-1.1500	0.0387
	-75	-11.2	-11.2000	0.0000	2.0100	0.0698
3	0	10.8200	-0.2900	6.0600	0.1600	0.0244
	-15	9.13	-2.2000	1.4900	-2.1100	0.0253
	-30	10.85	1.8200	4.1000	0.0800	0.0469
	-45	11.2	-4.0400	3.9600	-0.1300	0.0691
	-60	9.78	-4.2000	2.6000	-0.4800	0.0710
	-75	-11.2	-11.2000	0.0000	1.8700	0.0900

ตารางที่ 6 ค่าความผิดพลาดจากค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย

ตัวอย่างที่	θ_i (degree)	ค่า RMS ของแบบจำลองการสะท้อนแสง				
		แบบจำลอง ที่นำเสนอ	Phong	Ward	Oren – Nayar	Ashikhmin – Shirley
1	0	0.0153	0.0223	0.0229	0.0229	0.0228
	-15	0.1012	0.1167	0.1253	0.1424	0.1274
	-30	0.0168	0.0824	0.0868	0.0906	0.0822
	-45	0.0296	0.1100	0.1163	0.1314	0.1067
	-60	0.0380	0.1161	0.1243	0.1594	0.1112
	-75	0.0154	0.0927	0.0979	0.1319	0.1008
2	0	0.0409	0.0073	0.0283	0.0409	0.0405
	-15	0.0307	0.0296	0.0415	0.0876	0.0540
	-30	0.0100	0.0487	0.0609	0.1165	0.0694
	-45	0.0235	0.0615	0.0643	0.1294	0.0765
	-60	0.0355	0.0577	0.0656	0.1504	0.0622
	-75	0.0217	0.0566	0.0658	0.1516	0.0835
3	0	0.0483	0.0058	0.0480	0.0499	0.0494
	-15	0.0444	0.0490	0.0480	0.0713	0.0503
	-30	0.0109	0.0707	0.0728	0.1057	0.0685
	-45	0.0148	0.0912	0.1044	0.1303	0.0831
	-60	0.0214	0.0918	0.1036	0.1610	0.0843
	-75	0.0188	0.0556	0.0658	0.1183	0.0949

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย บุญเกียรติ ฉายเทพประสิทธิ์ เกิดวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ. 2526 ณ กรุงเทพมหานคร
 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต ในสาขา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ จากภาควิชา
 วิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
 มหาวิทยาลัย ได้รับรางวัลการเสนอผลงานวิชาการ senior project สาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์
 และเทคโนโลยี ประเภทดีเด่น ในการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 15 ประจำปี 2550 ของ คณะ
 วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขา
 เทคโนโลยีทางภาพ ที่ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะ
 วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2550

บทความ เรื่อง “การวัดบีอาร์ดีเอฟและจำลองแบบการสะท้อนแสงของผ้าไหม
 (MEASUREMENT OF BRDF AND REFLECTANCE MODELING OF SILK FABRICS) ซึ่งเป็น
 ส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ เรื่องนี้ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารราชบัณฑิตยสถานปี
 ที่ 35 ฉบับ 1 (มกราคม-มีนาคม 2553)

นาย บุญเกียรติ ฉายเทพประสิทธิ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีมหาบัณฑิตในเดือน
 พฤษภาคม พ.ศ. 2553