

การสร้างแบบจำลองความสะท้อนแสงของผ้าไหม
ด้วยฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง

นายวรพจน์ นิลพัทธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

REFLECTANCE MODELLING OF SILK FABRIC
USING BIDIRECTIONAL REFLECTANCE DISTRIBUTION FUNCTION

Mr.Worapoj Nilaphat

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างแบบจำลองความสะท้อนแสงของผ้าไหมด้วย

ฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง

โดย

นายวรพจน์ นิลพัทธ์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คุรุชีพวัฒน์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวาล คุรุชีพวัฒน์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ พรทวี พึ่งรัมย์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชลิดา ลิปิกรณ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ สุณี ภูสีม่วง)

วรวพจน์ นิลพัทธ์: การสร้างแบบจำลองความสะท้อนแสงของผ้าไหมด้วยฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง (REFLECTANCE MODELLING OF SILK FABRIC USING BIDIRECTIONAL REFLECTANCE DISTRIBUTION FUNCTION)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ชวาล คุร์พิพัฒน์, 87 หน้า.

ในการสร้างภาพสามมิติของผ้าไหมที่มีความโดดเด่นที่ลักษณะความมันวาว จำเป็นต้องใช้แบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง (บีอาร์ดีเอฟ) โดยเฉพาะในการสร้างแสงเงาให้กับภาพผ้าไหม งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาค่าความสะท้อนแสงของผ้าไหมลายขัดธรรมดาเพื่อสร้างแบบจำลองประมาณค่าความสะท้อนแสงของผ้าไหม โดยใช้ข้อมูลค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องโกนิโอสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมเป็นการสะท้อนแสงแบบผสมที่มีลักษณะการสะท้อนแสงแบบพิเศษร่วมอยู่ด้วยคือ การสะท้อนแสงกล่าแบบออสเปคคูลาร์ และการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับ จากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดกับค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองที่มีอยู่ โดยเลือกใช้แบบจำลองของฟอง แบบจำลองของวาร์ด แบบจำลองของวาร์ด-ดูเออร์ แบบจำลองของบลินน์-ฟอง แบบจำลองของคูก-ทอร์เรนซ์ และแบบจำลองของฮอเรน-นaylor โดยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม พบว่าแบบจำลองของวาร์ดให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด (E_{min}) จึงใช้แบบจำลองของวาร์ดเป็นต้นแบบและทำการปรับปรุงสมการแบบจำลองของวาร์ดในส่วนของการสะท้อนแสงพุ่งโดยการเพิ่มพารามิเตอร์ซึ่งควบคุมการกระจายตัวของแสงพุ่ง ทำให้แบบจำลองที่นำเสนอมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีอยู่ทั้งหมด และการสะท้อนแสงของผ้าไหมได้ถูกจำลองขึ้นโดยใช้แบบจำลองที่นำเสนอ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและลายมือชื่อนิสิต.....
เทคโนโลยีทางการพิมพ์..... ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....
 สาขาวิชาเทคโนโลยีทางภาพ.....
 ปีการศึกษา2555.....

5372318123 : MAJOR IMAGING TECHNOLOGY

KEYWORDS : BRDF, REFLECTANCE MODEL, SILK, FABRIC

WORAPOJ NILAPHAT : REFLECTANCE MODELLING OF SILK FABRIC USING
 BIDIRECTIONAL REFLECTANCE DISTRIBUTION FUNCTION. ADVISSOR :
 ASST. PROF. CHAWAN KOOPIPAT, Ph.D., 87 pp.

Simulation of 3D graphics of silk fabric whose shininess is an essential characteristic needs a specific model of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) as shader. In this research, we studied reflection of plain weave silk fabric and developed the specific model for silk fabric reflection by measuring its BRDFs with a goniospectrophotometer. We observed that the reflection characteristic of silk fabric has mixed reflection which includes special reflection characteristics such as off-specular reflection and retro-reflection. Then we compared between measured BRDFs and predicted BRDFs which were calculated from existing models - Phong model, Ward model, Ward-Duer model, Blinn-Phong, Cook-Torrance model and Oren-Nayar model – by using Genetic algorithm as optimization technique. The results show that Ward model gave the lowest error-values (E_{min}). We thus based our proposed model on Ward model and modified it by adding new parameters to control the shape of diffuse reflection distribution in diffuse reflection term. The proposed model gave the lowest error- values comparing to the existing models. The reflection of silk was simulated by the proposed model.

Department : ...Imaging and printing technology..... Student's Signature

Field of Study : ...Imaging Technology..... Advisor's Signature

Academic Year : ...2012.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวาล คูร์พิพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่เสียสละเวลาให้คำแนะนำ ชี้แนวทางและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. โนมิชิ ซึ่มูระ ภาควิชาสารสนเทศและวิทยาศาสตร์ทางภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยชิบะ ประเทศญี่ปุ่น ที่เอื้อเพื่อเครื่องโกลิโอสเปคโทรโฟโตมิเตอร์สำหรับใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสืบสาย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ พรทวิ พึ่งรัศมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชลิดา ลิปิกรณ์ และรองศาสตราจารย์ สุณี ภูสีม่วง คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่สละเวลามาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บุคลากรและเพื่อนนิสิตปริญญาโท-เอก ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญกราฟ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
1.5 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ฟ้าใหม่.....	6
2.2 การสะท้อนแสง.....	7
2.2.1 ฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง (Bidirectional Reflectance Distribution Function).....	10
2.3 การวัดค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง.....	12
2.3.1 การวัดบีอาร์ดีเอฟแบบดั้งเดิม.....	12
2.3.2 การวัดบีอาร์ดีเอฟจากภาพ.....	14
2.4 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm).....	15
2.4.1 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) และฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function).....	18

	หน้า
2.4.2 โครโมโซม (chromosome).....	19
2.4.3 การสร้างประชากรเริ่มต้น (initial population).....	20
2.4.4 การคัดเลือก (selection).....	20
2.4.5 การไขว้สลับ (crossover).....	22
2.4.6 การกลายพันธุ์ (mutation).....	24
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	34
3.2.1 วัดค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางของผ้าไหม ด้วยเครื่องโกนนิโอสเปคโตรโฟโตมิเตอร์.....	34
3.2.2 สร้างแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง ที่เหมาะสมกับการสะท้อนแสงของตัวอย่างผ้าไหม.....	35
3.2.3 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อน แสงสองทิศทางที่นำเสนอโดยการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด.....	36
3.3 การคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	37
3.3.1 การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และฟังก์ชันความเหมาะสม.....	37
3.3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	37
3.3.3 การสร้างประชากรเริ่มต้น (initial population)	38
3.3.4 การคัดเลือก (selection)	38
3.3.5 การไขว้สลับ (crossover).....	38
3.3.6 การกลายพันธุ์ (mutation).....	39
3.3.7 การประเมินค่าความเหมาะสม (evaluation)	40
3.3.8 เงื่อนไขการหยุด (termination)	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	41
4.1 การสะท้อนแสงของผ้าไหม.....	41

4.1.1	ลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมเมื่อเปลี่ยนมุมแหล่งแสง.....	41
4.1.2	ลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมเมื่อเปลี่ยนมุมตัวอย่าง.....	47
4.1.3	ลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมในรูปแบบกราฟพื้นผิวสามมิติ.....	51
4.1.4	ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการสะท้อนแสงกับโครงสร้างของผ้าไหม.....	54
4.2	เปรียบเทียบแบบจำลองความสะท้อนแสง.....	58
4.3	การปรับปรุงแบบจำลองของวาร์ด.....	61
4.3.1	แบบจำลองลักษณะการสะท้อนแสงกล้า.....	61
4.3.2	แบบจำลองลักษณะการสะท้อนแสงฟู.....	63
4.4	เปรียบเทียบแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่น.....	67
4.5	เปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอกับค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัด.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....		76
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....		79
ภาคผนวก.....		83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		87

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1-1	มูลค่าการส่งออกกุ้งไหม, เส้นไหม, ฝ้ายไหมและผลิตภัณฑ์ไหม ในช่วงปี พ.ศ. 2544-2554.....	2
ตารางที่ 2-1	รูปแบบการสะท้อนบนพื้นผิวแบบต่าง ๆ	9
ตารางที่ 4-1	ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของแต่ละแบบจำลองในผ้าไหม ตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3.....	60
ตารางที่ 4-2	เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอกับ แบบจำลองทั่วไป.....	67
ตารางที่ 4-3	ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด.....	68
ตารางที่ 4-4	เวลาที่ใช้ในการคำนวณแสดงเป็นจำนวนเท่าของเวลาที่ใช้น้อยที่สุด.....	70

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2-1	(a) ภาพตัดขวางของเส้นใยไหมก่อนกำจัดกาไหม (b) ภาพตัดขวางของเส้นใยไหมที่มีเฉพาะโปรตีนไฟโบรอิน.....	7
ภาพที่ 2-2	ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงกับวัตถุ: การสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่าน...	8
ภาพที่ 2-3	(a) การสะท้อนแสงฟูง (b) การสะท้อนแสงกล้า (c) การสะท้อนแสงผสม....	8
ภาพที่ 2-4	การระบุมุมในการวัดค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง.....	11
ภาพที่ 2-5	หลักความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน.....	11
ภาพที่ 2-6	สมบัติการอนุรักษ์พลังงาน.....	12
ภาพที่ 2-7	ส่วนประกอบของเครื่องโกนอิรีเฟลกโตมิเตอร์.....	13
ภาพที่ 2-8	แผนผังแสดงการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่อง.....	16
ภาพที่ 2-9	การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต.....	21
ภาพที่ 2-10	(a) ปรัชญาการบั้ง (masking) (b) ปรัชญาการเกิดเงา (shadowing)	28
ภาพที่ 2-11	(c) ภาพที่ได้จากแบบจำลองของออเรน-นาร์เรียมเปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากการ (b) สะท้อนแบบแลมเบิร์ตเซียน และ (a) ภาพถ่าย.....	29
ภาพที่ 2-12	ลักษณะพื้นผิวระดับไมโครที่ประกอบด้วยแท่งทรงกระบอกขนาดเล็ก.....	30
ภาพที่ 3-1	ตัวอย่างผ้าไหมแบบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา).....	33
ภาพที่ 3-2	ส่วนประกอบของเครื่องโกนอิรีเฟลกโตมิเตอร์ รุ่น GSP-2S.....	34
ภาพที่ 4-1	ภาพจำลองการสะท้อนแสงบนไหมเส้นยืนและไหมเส้นฟูงในบริเวณต่างๆ ที่มุมแหล่งแสง 0° และ 40°	54
ภาพที่ 4-2	ภาพจำลองลักษณะพื้นผิวและลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหม ตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ.....	56
ภาพที่ 4-3	ภาพถ่ายขยายของผ้าไหมตัวอย่าง 1, 2 และ 3 ตามลำดับ.....	57
ภาพที่ 4-4	ทรงกลมสามมิติจำลองการสะท้อนแสงที่ได้จากแต่ละแบบจำลองโดยใช้พารามิเตอร์ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1	75

สารบัญกราฟ

		หน้า
กราฟที่ 1-1	มูลค่าการส่งออกรวมของไทยและผลิตภัณฑ์ใหม่ในช่วงปี พ.ศ.2544-2554...	3
กราฟที่ 4-1	กราฟค่าความสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 มุมแหล่งแสง 0 และ 60 องศา มุมของตัวอย่าง 0 องศา โดยแกน x, y และ z เป็นมุมแหล่งแสง ความยาวคลื่นและค่าบีอาร์ดีเอฟ ตามลำดับ.....	42
กราฟที่ 4-2	ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่1 มุมตัวอย่าง 0° มุมแหล่งแสง 0° ถึง 80°.....	44
กราฟที่ 4-3	ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่2 มุมตัวอย่าง 0° มุมแหล่งแสง 0° ถึง 80 °.....	45
กราฟที่ 4-4	ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่3 มุมตัวอย่าง 0° มุมแหล่งแสง 0° ถึง 80 °.....	46
กราฟที่ 4-5	ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่1 มุมแหล่งแสง 0° มุมตัวอย่าง 0° ถึง 60 °.....	48
กราฟที่ 4-6	ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่2 มุมแหล่งแสง 0° มุมตัวอย่าง 0° ถึง 60 °.....	49
กราฟที่ 4-7	ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่3 มุมแหล่งแสง 0° มุมตัวอย่าง 0° ถึง 60 °.....	50
กราฟที่ 4-8	กราฟพื้นผิวสามมิติค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 มุมแหล่งแสง 0°.....	52
กราฟที่ 4-9	กราฟพื้นผิวสามมิติค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 มุมแหล่งแสง 60°.....	53
กราฟที่ 4-10	(a) การสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมแหล่งแสง 0 องศา (b) การสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเซียน (การสะท้อนแสงฟุ้งอุดมคติ).....	63
กราฟที่ 4-11	ผลของค่าพารามิเตอร์ β_x , β_y และ β_z ในการควบคุมการกระจายตัวของ การสะท้อนแสงฟุ้ง.....	66

กราฟที่ 4-12	กราฟเชิงเชิงชี้เปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณ และค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตัวอย่าง 0°	71
กราฟที่ 4-13	กราฟเชิงเชิงชี้เปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณ และค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดในผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตัวอย่าง 0°	72
กราฟที่ 4-14	กราฟเชิงเชิงชี้เปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณ และค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดในผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตัวอย่าง 0°	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตไหมและผลิตภัณฑ์ไหมที่มีคุณภาพและมีชื่อเสียงแห่งหนึ่งของโลก ไหมและผลิตภัณฑ์ไหมของไทยมีเอกลักษณ์ที่สีสันและ ลวดลายอันงดงาม รวมถึงฝีมือและความชำนาญในการทอผ้าของคนไทย ทำให้ไหมและผลิตภัณฑ์ไหมของไทยได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั้งจากชาวไทยและชาวต่างประเทศ มูลค่าการส่งออกไหมและผลิตภัณฑ์ไหมของประเทศไทยใน พ.ศ. 2553 มีมูลค่า 683 ล้านบาท โดยมีตลาดการส่งออกที่สำคัญคือประเทศสหรัฐอเมริกาที่ถือว่าเป็นตลาดส่งออกไหมและผลิตภัณฑ์ไหมที่ใหญ่ที่สุดของโลก [1] และเป็นตลาดส่งออกอันดับหนึ่งของไทย ด้วยมูลค่าการส่งออก 207 ล้านบาท ตลาดส่งออกอันดับสองคือประเทศญี่ปุ่นด้วยมูลค่าการส่งออก 90 ล้านบาท และประเทศสหราชอาณาจักรเป็นตลาดอันดับสาม ซึ่งเป็นตลาดส่งออกไหมและผลิตภัณฑ์ไหมที่ใหญ่ที่สุดในสหภาพยุโรป ด้วยมูลค่าการส่งออก 56 ล้านบาท นอกจากนี้ยังมีประเทศฝรั่งเศส สิงคโปร์ แคนาดา เบลเยียม ฮองกง และอิตาลี ซึ่งเป็นตลาดส่งออกที่มีความน่าสนใจเช่นกัน การส่งออกไหมและผลิตภัณฑ์ไหมไปยังตลาดต่างประเทศจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะภาวะการแข่งขันในตลาดทั้งในเรื่องของราคา และคุณภาพของสินค้าคู่แข่งที่สำคัญของไทย คู่แข่งในตลาดรายใหญ่ที่สุดคือประเทศจีน [2] เป็นประเทศผู้ผลิต/ผู้ส่งออกไหมรายใหญ่ของโลก และมีส่วนแบ่งการตลาดสินค้าไหมดิบและด้ายไหมในตลาดโลกได้ มากถึงร้อยละ 80 และเพื่อการเพิ่มมูลค่าส่งออกให้สูงขึ้นจึงมุ่งผลิตสินค้าสำเร็จรูปโดยเน้นปรับปรุงคุณภาพให้สูงขึ้น เพื่อส่งออกไปยังตลาดยุโรปและสหรัฐอเมริกา คู่แข่งรองลงมาคือประเทศอินเดีย เป็นประเทศที่ผลิตไหมใหญ่เป็นอันดับสองของโลกรองจากจีน และเป็นคู่แข่งที่สำคัญของไทยในตลาดสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป และเกาหลีใต้โดยเฉพาะไหมดิบด้ายไหม ผ้าไหมและผลิตภัณฑ์ไหม อันดับสามคือประเทศบราซิล เป็นประเทศที่ผลิตไหมและผลิตภัณฑ์ไหมที่สำคัญโดยเฉพาะไหมดิบและด้ายไหม ส่วนใหญ่ส่งออกไปยังตลาดญี่ปุ่นและเกาหลีใต้

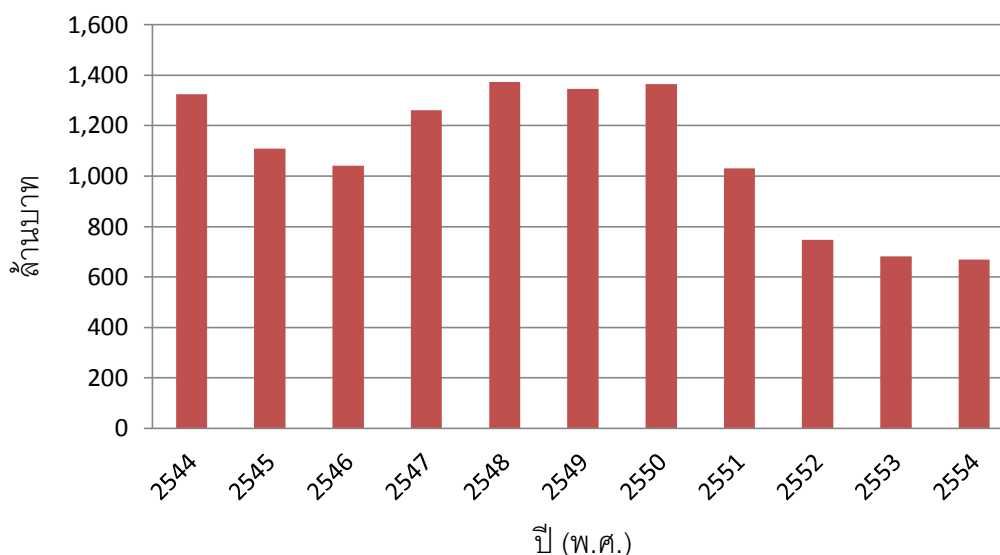
อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณามูลค่าการส่งออกไหม (รังไหม, เส้นไหมและผ้าไหม) และผลิตภัณฑ์ไหมของประเทศไทยย้อนหลังตั้งแต่ พ.ศ. 2544-2554 จากข้อมูลของกรมหม่อนไหม (กราฟที่ 1) จะเห็นว่ามูลค่าการส่งออกไหมและผลิตภัณฑ์ไหม ในช่วง พ.ศ. 2548-2550 มีมูลค่าคงที่ที่ประมาณ 1,350 ล้านบาทและลดลงอย่างต่อเนื่องใน พ.ศ. 2551-2554 โดยมูลค่าในการส่งออกใน พ.ศ. 2554 อยู่ที่ 670 ล้านบาท แสดงถึงสภาวะถดถอยของการส่งออกไหมและผลิตภัณฑ์ไหมของประเทศไทย โดยเฉพาะรังไหม เส้นไหม และผ้าไหมที่มีมูลค่าการส่งออกลดลงกว่าครึ่งของมูลค่าการส่งออกช่วงก่อนหน้า

ตารางที่ 1-1 มูลค่าการส่งออกรังไหม เส้นไหม ผ้าไหมและผลิตภัณฑ์ไหม ในช่วง พ.ศ. 2544-2554 [3] [4] [5]

ปี (พ.ศ.)	รังไหม เส้นไหม และผ้าไหม (ล้านบาท)	ผลิตภัณฑ์จากไหม (ล้านบาท)	รวม (ล้านบาท)
2544	1,113.33	210.82	1,324.15
2545	921.57	187.92	1,109.49
2546	802.22	239.42	1,041.64
2547	963.86	295.89	1,259.75
2548	1,063.05	310.51	1,373.56
2549	1,015.98	329.87	1,345.85
2550	881.71	482.54	1,364.25
2551	783.69	247.4	1,031.09
2552	471.52*	276.17**	747.69
2553	390.12	292.56	682.68
2554	432.06	237.69	669.75

หมายเหตุ * มกราคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2552

** มกราคม-กันยายน พ.ศ. 2552



กราฟที่ 1-1 มูลค่าการส่งออกรวมของไทยและผลิตภัณฑ์ใหม่ ในช่วง พ.ศ. 2544-2554

จากข้อมูลดังกล่าวทางผู้ผลิตภายในประเทศจึงต้องมีการเพิ่มมูลค่าของไทยโดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบของสินค้าจากเดิมที่เน้นการผลิตเป็นผ้าผืน ก็ปรับเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปมากขึ้น [6] เช่น เสื้อสำเร็จรูป ผ้ากันเปื้อน ชุดนอน รวมทั้งสินค้าของแต่งบ้านและงานฝีมือ[7] เช่น กระเป๋า พวงกุญแจ เป็นต้น โดยอาศัยภูมิปัญญาท้องถิ่นในการออกแบบลวดลายและลักษณะการใช้งาน เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการตลาดได้อย่างถูกต้องและสามารถเพิ่มมูลค่าในการส่งออกได้มากขึ้น นอกเหนือจากการปรับปรุงตัวสินค้าแล้วการเพิ่มช่องทางในการจัดจำหน่ายก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าการส่งออก

พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-commerce) [8] เป็นการทำธุรกรรม เช่น การซื้อขายสินค้าและบริการ ผ่านทางสื่ออิเล็กทรอนิกส์ เช่น อินเทอร์เน็ต เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย ลดข้อจำกัดและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำธุรกรรม จากการสำรวจสถานะภาพการพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย พ.ศ. 2554 [9] มีการเติบโตของมูลค่าพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่องในส่วนการค้าแบบธุรกิจขายให้ธุรกิจ (business to business) และแบบธุรกิจขายให้ผู้บริโภค (business to consumer) ตั้งแต่ พ.ศ. 2551-2554 สำหรับตลาดธุรกิจพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์จะเป็นตลาดภายในประเทศคิดเป็นร้อยละ 78.8 และตลาดต่างประเทศคิดเป็นร้อยละ 21.2 ประเทศที่มีการ

สิ่งซื้อสินค้า/บริการในสัดส่วนสูงสุดคือประเทศอังกฤษและสหรัฐอเมริกา ที่ร้อยละ 35.4 รองลงมา เป็นประเทศญี่ปุ่น ร้อยละ 16.2 ประเทศออสเตรเลีย ร้อยละ 14.4 และประเทศสิงคโปร์ ร้อยละ 11.1 โดยธุรกิจพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมแฟชั่น เครื่องแต่งกาย อัญมณีและเครื่องประดับ มีสัดส่วนถึงร้อยละ 32.3 ดังนั้นหากธุรกิจใหม่และผลิตภัณฑ์ใหม่จะมี ช่องทางการจำหน่ายผ่านพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์มากขึ้นก็จะเป็นโอกาสในการเพิ่มยอดขายสินค้า ในตลาดเดิมอย่างประเทศอังกฤษและสหรัฐอเมริกา และเพิ่มโอกาสในตลาดใหม่อย่างประเทศ ออสเตรเลีย

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในธุรกิจพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์เป็นการซื้อขายสินค้า/บริการผ่านทางสื่ออิเล็กทรอนิกส์ ซึ่ง ผู้ซื้อไม่มีโอกาสได้เห็น สัมผัสหรือทดลองใช้งานสินค้า/บริการจริงที่ผู้ขายเสนอขาย ดังนั้นผู้ซื้อส่วนใหญ่จึงพิจารณาและตัดสินใจจากข้อมูลและภาพถ่ายของสินค้า ในกรณีของผ้าไหมและผลิตภัณฑ์ ใหม่เป็นสินค้าที่ผู้ซื้อทราบถึงลักษณะการใช้งานและคุณสมบัติเป็นอย่างดี ผู้ซื้อส่วนใหญ่จึงจะ ตัดสินใจจากภาพถ่าย แต่ด้วยคุณสมบัติของผ้าไหมที่มีลักษณะโดดเด่นกว่าผ้าชนิดอื่นคือ ความ มันวาว การถ่ายภาพแบบสองมิติที่ใช้กันทั่วไปไม่สามารถถ่ายทอดลักษณะดังกล่าวของผ้าไหมได้ อย่างครบถ้วนเสมือนจริง ดังนั้นการจำลองภาพผ้าไหมในลักษณะสามมิติจึงให้ภาพของผ้าไหมที่มี ความสมจริงมากกว่า ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างยิ่งเมื่อนำภาพผ้าไหมในลักษณะสามมิติไปประยุกต์ ในการแสดงสินค้าผ่านสื่อออนไลน์เพื่อพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ แต่การจำลองภาพสามมิติมีความ จำเป็นต้องใช้แบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง (Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF model) ที่เหมาะสมกับการสะท้อนแสงของผ้าไหม

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

สร้างแบบจำลองประมาณค่าความสะท้อนแสงของผ้าไหมจากฟังก์ชันการกระจายความ สะท้อนแสงสองทิศทาง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้แบบจำลองประมาณค่าความสะท้อนแสงของผ้าไหมจากฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง

1.5 แนวคิดและทฤษฎี

การแสดงภาพผ้าไหมในลักษณะสามมิติจะให้ภาพของผ้าไหมที่มีความสมจริงมากกว่าภาพถ่ายโดยทั่วไปเมื่อใช้แสดงภาพสินค้าผ่านสื่อออนไลน์ แต่การจำลองภาพสามมิติมีความจำเป็นต้องใช้แบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง (Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF model) ที่เหมาะสมกับการสะท้อนแสงของผ้าไหม การสะท้อนแสงของผ้าไหมเป็นการสะท้อนแสงแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic reflection) ซึ่งการสะท้อนดังกล่าวจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติของเส้นใยไหมและโครงสร้างการถักทอ ความมันวาวซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของผ้าไหมเป็นลักษณะของการสะท้อนแสงกล้า (specular reflection) โดยลักษณะการสะท้อนแสงกล้าของผ้าไหมนั้นมีการกระจายในหลายทิศทางขึ้นกับลักษณะของพื้นผิว รวมทั้งการสะท้อนแสงฟุ้ง (diffuse reflection) ของผ้าไหมยังแตกต่างไปจากการสะท้อนแสงฟุ้งแบบอุดมคติ ดังนั้นแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่จะนำมาใช้จะต้องสามารถอธิบายคุณสมบัติการสะท้อนแสงดังกล่าวของผ้าไหมได้ ซึ่งในปัจจุบันมีแบบจำลองที่ใช้อธิบายการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการสะท้อนแสงเพียงสองมิติ จึงต้องมีการปรับปรุงแบบจำลองโดยการใช้ข้อมูลจากการวัดการสะท้อนแสงของผ้าไหมในสามมิติให้มีความละเอียดมากขึ้นจะทำให้แบบจำลองที่ได้สามารถทำนายการสะท้อนแสงได้เสมือนจริงมากขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผ้าไหม

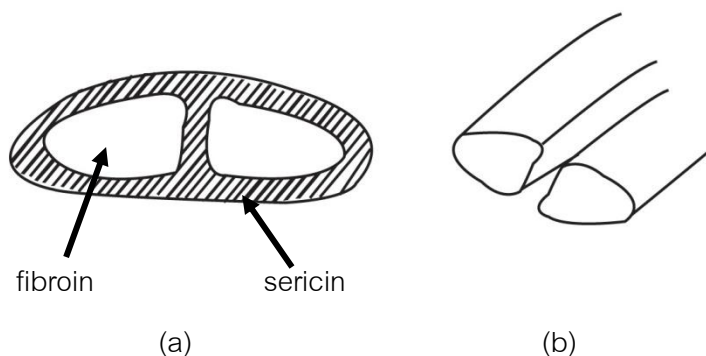
การเพาะเลี้ยงไหมได้เริ่มต้นขึ้นเมื่อกว่า 2,640 ปีก่อนคริสตศักราชในประเทศจีนก่อนที่จะแพร่หลายไปยังประเทศอื่น ๆ เช่นประเทศเกาหลี ญี่ปุ่น อินเดีย สเปน อิตาลี การเพาะเลี้ยงไหมได้พัฒนามาเป็นอุตสาหกรรม พันธุ์ไหมที่มีคุณภาพดีที่สุดคือพันธุ์ *Bombyx mori* เส้นใยไหมเกิดจากหนอนไหมอัดปล่อยของเหลวออกจากต่อมบริเวณส่วนหัวได้เป็นเส้นใยไหมคูที่เกาะติดกันด้วยสารเซรีซิน (sericin) หรือกาวไหม เพื่อให้เส้นไหมที่ยาวต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องทำการสาวไหมก่อนที่ตัวไหมจะเจาะรังไหมเพื่อออกจากรังไหม การสาวไหมโดยการต้มรังไหมนอกจากจะทำให้ได้เส้นใยไหมที่ยาวต่อเนื่องแล้วยังเป็นการกำจัดกาวไหมออกจากเส้นใยไหมอีกด้วย [10]

โครงสร้างของเส้นใยไหมมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมมน องค์ประกอบหลักทางเคมีคือโปรตีนที่เรียกว่า ไฟโบรอิน (fibroin) มีรายละเอียดส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ [10] ดังนี้

คาร์บอน	48.00 - 49.00 %
ไฮโดรเจน	6.40 – 6.51 %
ไนโตรเจน	17.35 – 18.89 %
ออกซิเจน	26.00 – 27.90 %

เส้นใยไหมจะถูกทำลายโดยสารเคมีที่เป็นกรด-ด่างความเข้มข้นสูงและสารเคมีที่มีส่วนประกอบของเกลือคลอไรด์ แต่สามารถทนต่อสารละลายอินทรีย์และสารซักฟอกได้ ความยาวของเส้นใยไหมตลอดเส้นที่เกิดจากรังไหมแต่ละรังโดยปกติจะอยู่ระหว่าง 390 ถึง 600 เมตร มีความถ่วงจำเพาะ 1.25 สามารถทนความร้อนได้ถึง 170 องศาเซลเซียส สีของเส้นใยไหมมีตั้งแต่สีเหลืองจนถึงสีเทา มีความมันวาวสวยงามภายหลังจากที่ลอกกาวไหมออกแล้ว เส้นใยไหมเป็นเส้นใยธรรมชาติที่เป็นเส้นใยยาวและมีความแข็งแรงสูงที่สุด แต่ก็ยังคงความยืดหยุ่นที่ดีโดยสามารถยืด

ได้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของความยาวเดิม เส้นใยไหมยังมีความสามารถในการคืนตัวได้ดี จึงไม่เกิดการยับย่นง่าย สามารถคืนกลับรูปเดิมได้เมื่อแขวนทิ้งไว้ ที่ภาวะมาตรฐานเส้นใยไหมสามารถดูดซึ่มความชื้นได้ 11 เปอร์เซ็นต์ นับว่ามีการดูดซึ่มความชื้นได้ดี ทำให้รับสีย้อมและสีพิมพ์ได้ดีด้วย

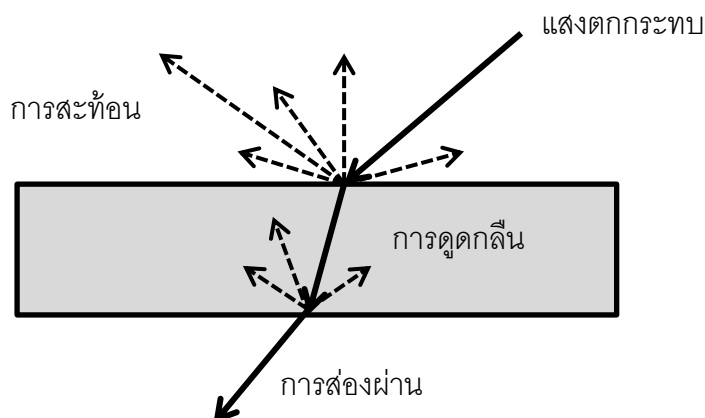


ภาพที่ 2-1 (a) ภาพตัดขวางของเส้นใยไหมก่อนกำจัดกาไหม (b) ภาพตัดขวางของเส้นใยไหมที่มีเฉพาะโปรตีนไฟโบรอิน [11]

หลักของการทอผ้า คือการทำให้เส้นด้ายสองกลุ่มขัดกัน โดยเส้นด้ายทั้งสองกลุ่มตั้งฉากซึ่งกันและกัน เส้นด้ายกลุ่มหนึ่งเรียกว่า ด้ายยืน และด้ายอีกกลุ่มหนึ่งเรียกว่า ด้ายพุ่ง ลักษณะของการขัดกันของด้ายพุ่งและด้ายยืนจะขัดกันแบบธรรมดาหรือที่เรียกว่าลายขัด อาจจะมีเพิ่มเติมเทคนิคพิเศษ เช่น การขีด การจก หรือการทอมัดหมี่ เพื่อให้ผ้ามีลวดลายสีสันที่สวยงามแปลกตา ในการทอผ้าพื้นจะใช้หลักการทอผ้าเบื้องต้นที่นำเอาด้ายยืนและด้ายพุ่งมาขัดกันเพื่อให้เกิดเป็นผืนผ้า โดยด้ายพุ่งและด้ายยืนอาจเป็นด้ายสีเดียวกันหรือต่างสีกัน หรือนำเอาด้ายที่เป็นดินเงินหรือดินทองมาทอควบด้าย เพื่อให้ผ้ามีความมันระยับสวยงามยิ่งขึ้น [12]

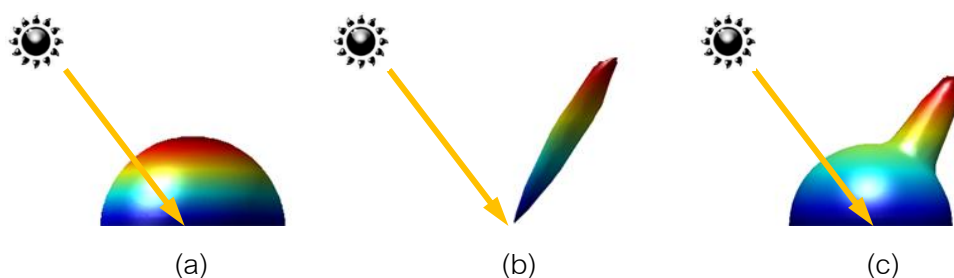
2.2 การสะท้อนแสง

เมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์ขึ้นได้ใน 3 รูปแบบ คือ การสะท้อน (reflection) การดูดกลืน (absorption) และการส่องผ่าน (transmission) [13]



ภาพที่ 2-2 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงกับวัตถุ: การสะท้อน การดูดกลืน และการส่องผ่าน

การสะท้อนแสงเป็นปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่พลังงานแสงตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุ แล้วสะท้อนออกจากพื้นผิวของวัตถุโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น การสะท้อนแสงบนพื้นผิวของวัตถุแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ [14] ได้แก่ การสะท้อนแสงฟุ้ง (diffuse reflection) การสะท้อนแสงก้ำ (specular reflection) และการสะท้อนแสงแบบผสม (mixed reflection)



ภาพที่ 2-3 (a) การสะท้อนแสงฟุ้ง (b) การสะท้อนแสงก้ำ (c) การสะท้อนแสงแบบผสม

การสะท้อนแสงก้ำหรือการสะท้อนแบบกระจกเป็นการสะท้อนที่เป็นไปตามกฎการสะท้อนแสง นั่นคือมีมุมของแสงตกกระทบบเท่ากับมุมของแสงสะท้อนและทิศทางของแสงตกกระทบบ ทิศทางของแสงสะท้อนและเส้นปกติของพื้นผิว (surface normal) อยู่ในระนาบเดียวกัน รวมทั้งไม่เกิดการกระเจิงแสงขึ้นทั้งบนผิวและในเนื้อวัตถุ การสะท้อนแสงฟุ้งเป็นการสะท้อนแสงจากพื้นผิวออกไปในทุกทิศทางเท่า ๆ กัน หรือเรียกว่าการสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ต (Lambert

reflection) สุดท้ายคือการสะท้อนแสงแบบผสมเป็นการสะท้อนแสงที่เป็นการผสมกันระหว่างรูปแบบการสะท้อนแสงพุ่งกับการสะท้อนแสงกล้ำ (สมการที่ 2-1)

$$\rho = \rho_d + \rho_s \quad (2-1)$$

ρ เป็นค่าการสะท้อนแสงรวม ρ_d และ ρ_s เป็นสัดส่วนการสะท้อนแสงกล้ำและการสะท้อนแสงพุ่งตามลำดับ ในตารางที่ 2-1 ได้แสดงรูปแบบการสะท้อนบนพื้นผิวแบบต่าง ๆ [15]

ตารางที่ 2-1 รูปแบบการสะท้อนบนพื้นผิวแบบต่าง ๆ

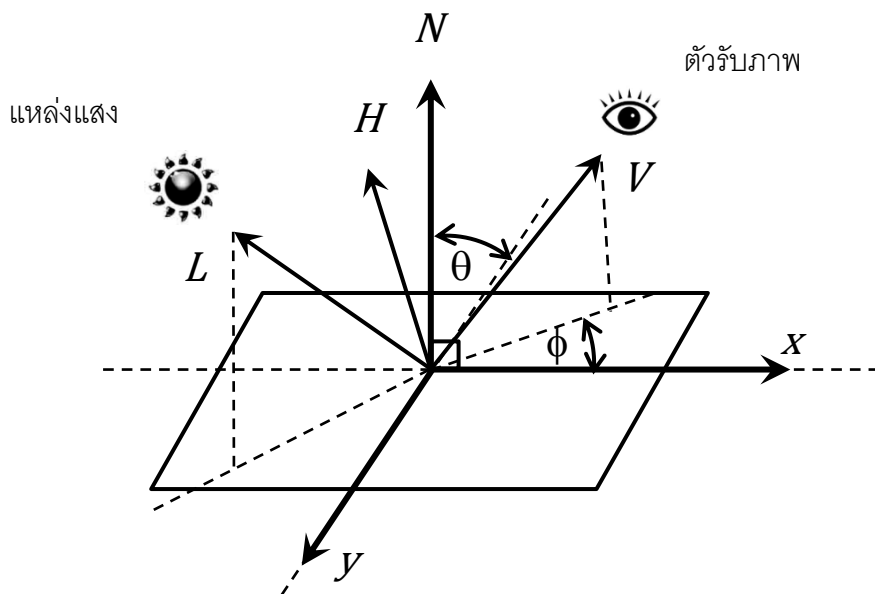
รูปแบบการสะท้อน	ภาพการสะท้อน
Bi-directional	
Directional-conical	
Directional-hemispherical	
Conical-directional	
Bi-conical	
Conical-hemispherical	
Hemispherical-directional	
Hemispherical-conical	
Bi-hemispherical	

2.2.1 ฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง (Bidirectional Reflectance Distribution Function)

นิโคตีมัส [16] ได้นำเสนอฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง (Bidirectional Reflectance Distribution Function – BRDF) เพื่อใช้เป็นบรรทัดฐานในการอธิบายการสะท้อนแสงจากพื้นผิว โดยฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางสามารถอธิบายการสะท้อนแสงได้ทั้ง 9 แบบที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-1 ฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางเป็นฟังก์ชันของทิศทางของแสงตกกระทบและทิศทางของแสงสะท้อนที่ใช้ในการกระจายตัวของแสงสะท้อน (สมการที่ 2-2)

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (2-2)$$

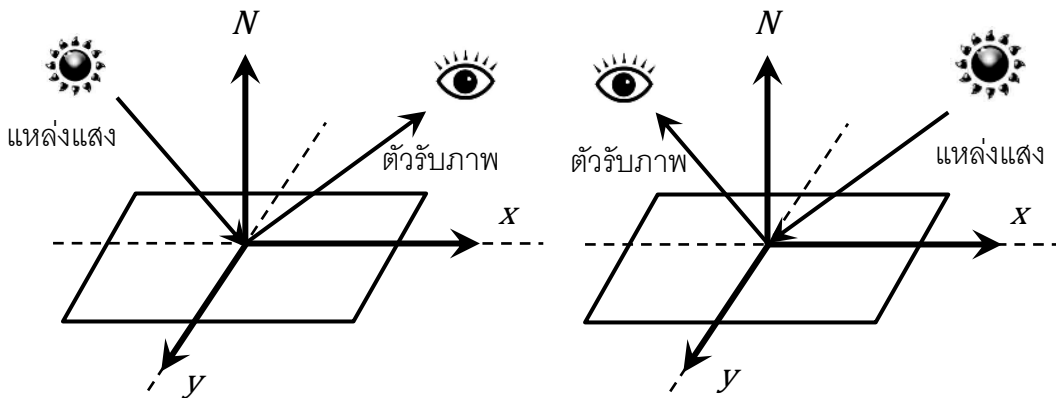
- f_r เป็นฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง มีหน่วยเป็นส่วนกลับของสเตอเรเดียน (sr^{-1})
- L_r เป็นค่าเรเดียนซ์ (radiance) ของแสงสะท้อน มีหน่วยเป็นฟลักซ์ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยมุมตัน
- E_i เป็นค่าความรับอาบรังสี (irradiance) ของแสงตกกระทบ มีหน่วยเป็นฟลักซ์ต่อหน่วยพื้นที่
- θ_i, θ_r เป็นมุมระหว่างเส้นปกติกับทิศทางแสงตกกระทบและทิศทางแสงสะท้อนตามลำดับ
- ϕ_i, ϕ_r เป็นมุมกวาดของทิศทางแสงตกกระทบและทิศทางแสงสะท้อน ตามลำดับ



ภาพที่ 2-4 การระบุมุมในการวัดค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง

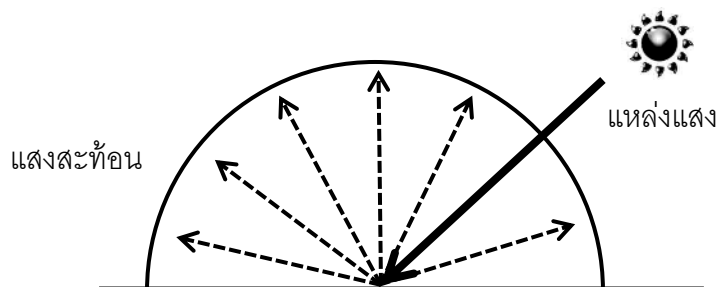
ฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางมีสมบัติสำคัญ 2 ประการ [17] คือ

- ฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางเป็นไปตามหลักความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (reciprocity) นั่นคือถ้าหากสลับทิศทางการตกกระทบของแสงกับทิศทางการสะท้อนของแสงค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางจะไม่เปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 2-5 หลักความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

- ฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางมีสมบัติการอนุรักษ์พลังงาน (energy conservation) นั่นคือเมื่อมีแสงตกกระทบบนพื้นผิวและเกิดการสะท้อน/การกระเจิง ปริมาณแสงที่ออกจากพื้นผิวในทุกทิศทางรวมกันจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณแสงที่ตกกระทบ



ภาพที่ 2-6 สมบัติการอนุรักษ์พลังงาน

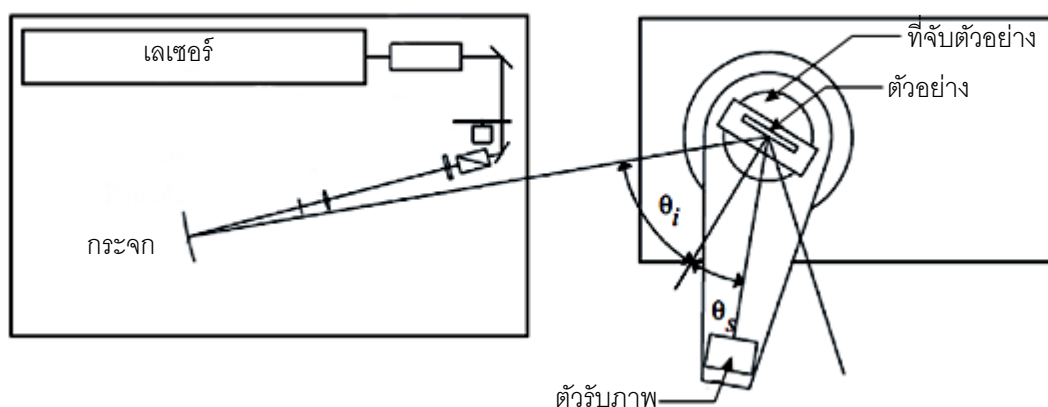
2.3 การวัดค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง [17]

ลักษณะแสงที่ได้หลังจากกระทบกับพื้นผิวของวัตถุแล้วจะขึ้นกับลักษณะของแสงตกกระทบ รูปร่างของวัตถุ และสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิวของวัตถุนั้น ๆ การที่จะวัดสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิวของวัตถุจะขึ้นกับความยาวคลื่น ตำแหน่ง และทิศทางในการวัด การที่จะได้มาของข้อมูลที่ครบถ้วนทั้ง 3 ปัจจัยต้องทำการวัดเพื่อเก็บข้อมูลปริมาณมาก ในหลาย ๆ เทคนิคการวัดได้พยายามลดปริมาณการวัดลงแต่ยังคงความถูกต้องและครบถ้วนของข้อมูลเอาไว้ การวัดค่าบีอาร์ดีเอฟสามารถแบ่งคร่าว ๆ ออกได้เป็น 2 แบบ คือ การวัดบีอาร์ดีเอฟแบบดั้งเดิม (traditional BRDF measurement) และการวัดบีอาร์ดีเอฟจากภาพ (image-based BRDF measurement)

2.3.1 การวัดบีอาร์ดีเอฟแบบดั้งเดิม

เครื่องโกนิโอรีเฟลกโตมิเตอร์ (gonioreflectometer) ที่มีความละเอียดสูง จัดว่าเป็นการวัดค่าบีอาร์ดีเอฟแบบดั้งเดิม ตัวเครื่องมือวัดประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบหลักคือ แหล่งแสง แผ่นจับ

ตัวอย่าง และตัวรับภาพที่ใช้วัดปริมาณแสง สำหรับแหล่งแสงที่ดีจะต้องให้ความเข้มแสงที่สม่ำเสมอตลอดอายุการใช้งาน เลเซอร์ถูกเลือกใช้เป็นแหล่งแสงเนื่องจากให้ความเข้มแสงที่สูงแต่จะทำการวัดได้เพียงความยาวคลื่นเดียวเท่านั้น อีกหนึ่งทางเลือกของแหล่งแสงคือ การใช้โมโนโครเมเตอร์เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นตามที่ต้องการ แต่ก็มีข้อเสียที่มีความเข้มแสงต่ำจึงต้องใช้ร่วมกับตัวรับภาพประสิทธิภาพสูง แทนจับตัวอย่างและระบบการระบุมุมโดยส่วนใหญ่จะใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมเพื่อให้ได้ความแม่นยำสูง สำหรับตัวรับภาพต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้มั่นใจว่าแสงที่สะท้อนมาจากตัวอย่างตกลงบนตัวรับภาพทั้งหมด และเพื่อเป็นการป้องกันแสงสะท้อนจากวัตถุอื่น ห้องและสิ่งของที่อยู่ในห้องที่ใช้วัดจะต้องทำเป็นสีดำทั้งหมด



ภาพที่ 2-7 ส่วนประกอบของเครื่องโกนิโอรีเฟลกโตมิเตอร์ [17]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องโกนิโอสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (goniospectrophotometer) รุ่น GSP-2S ของบริษัท Murakami Color Research Laboratory ในการวัดค่าบีอาร์ดีเอฟของตัวอย่างผ้าไหม ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องโกนิโอรีเฟลกโตมิเตอร์ แต่มีข้อแตกต่างหลัก 2 ประการคือ เครื่องโกนิโอสเปคโตรโฟโตมิเตอร์จะใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจน (tungsten halogen lamp) เป็นแหล่งแสงที่ให้ค่าการกระจายพลังงานในแต่ละช่วงความยาวคลื่น (spectral power distribution) ที่ต่อเนื่อง และตัวรับภาพที่ใช้ประกอบด้วยโมโนโครเมเตอร์และโฟโตไดโอดอาร์เรย์ (photodiode array) ทำให้ได้ผลการวัดที่ได้ออกมาในรูปแบบของสเปกตรัม จึงทำให้ได้ค่า บีอาร์ดีเอฟในทุกช่วงความยาวคลื่นด้วยการวัดเพียงครั้งเดียว

2.3.2 การวัดปีอาร์ดีเอฟจากภาพ

จากการที่กล้องถ่ายภาพดิจิทัลคุณภาพสูงมีราคาที่ถูกลง จึงได้มีความคิดที่จะนำกล้องถ่ายภาพมาใช้เป็นตัวรับภาพสำหรับการวัดค่าปีอาร์ดีเอฟ เนื่องจากตัวรับภาพของกล้องถ่ายภาพมีลักษณะเป็นตัวรับภาพแบบ 2 มิติ (2D array sensor) ทำให้การถ่ายภาพ 1 ครั้งจะสามารถเก็บข้อมูลของแสงในหลายทิศทางได้พร้อม ๆ กัน ช่วยให้การวัดค่าปีอาร์ดีเอฟเร็วขึ้นและมีต้นทุนที่ลดลง แต่อย่างไรก็ตามยังต้องคำนึงถึงความแม่นยำและถูกต้องของข้อมูลที่ได้กล้องถ่ายภาพด้วย

เมื่อแสงตกกระทบบนตัวรับภาพในกล้องถ่ายภาพ ตัวรับภาพซึ่งอาจจะเป็นแบบซีซีดี (CCD : Charge Coupled Device) หรือแบบซีเอ็มอส (CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor) จะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นค่าโวลเทจ (voltage) และเปลี่ยนค่าโวลเทจเป็นตัวเลข 8 บิต เพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่มีความถูกต้องสมจริง ภาพถ่ายจึงต้องถูกประมวลผลก่อนที่จะบันทึกลงในหน่วยความจำ ค่า 0 – 255 ในแต่ละพิกเซล (pixel) บนภาพถ่ายไม่สามารถนำมาใช้เป็นค่าเรเดียน (radiance) ของแสงได้โดยตรง ในการออกแบบระบบการวัดจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้

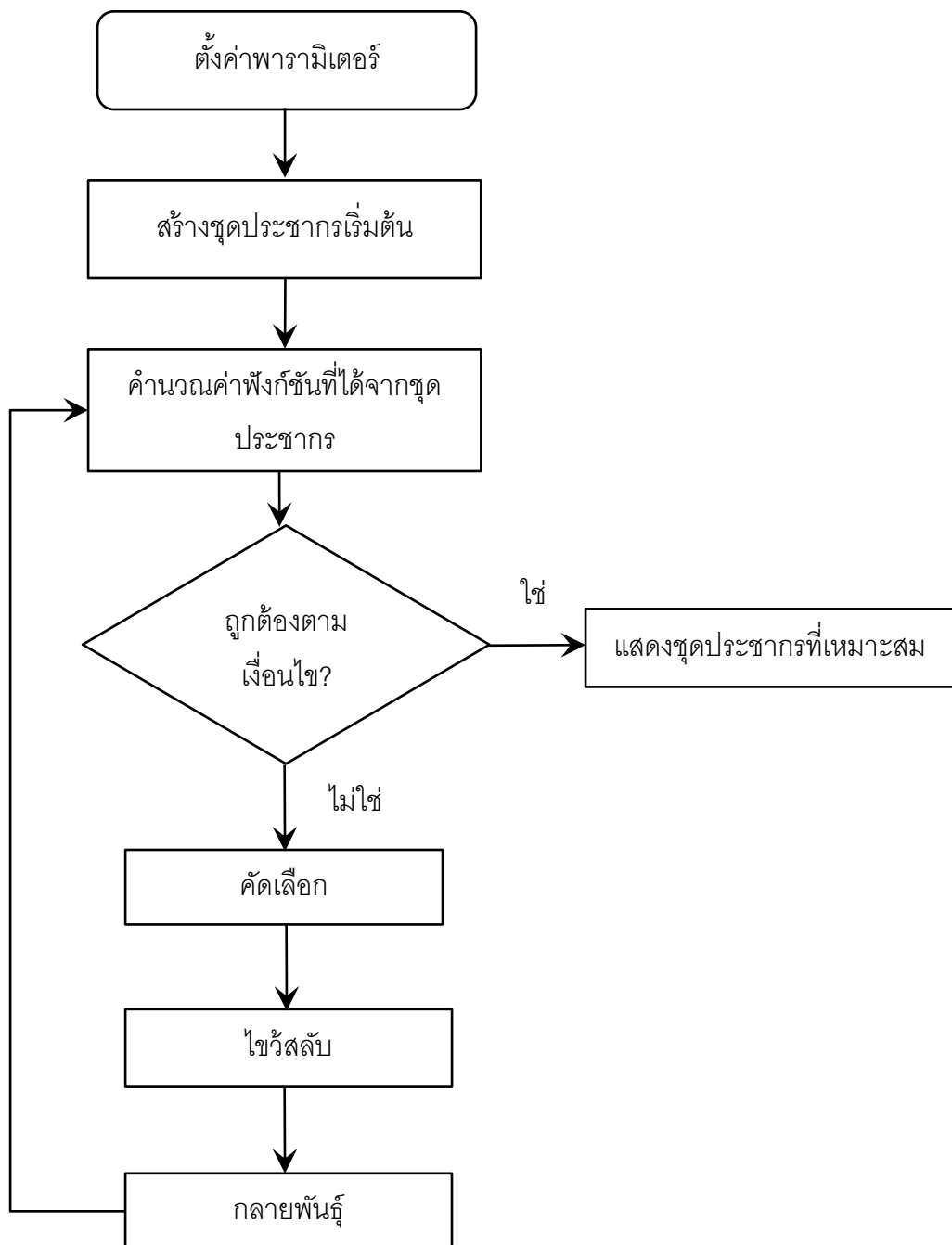
- ค่าที่ใช้ในการวัดค่าปีอาร์ดีเอฟคือค่าเรเดียนหรือปริมาณพลังงานแสงต่อหน่วยเวลา แต่ปริมาณที่แสงตกกระทบบนตัวรับภาพในกล้องถ่ายภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วชัตเตอร์ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะได้ค่าพิกเซลแตกต่างกันทั้งที่ค่าเรเดียนยังไม่เปลี่ยนแปลง
- บนตัวรับภาพของกล้องถ่ายภาพจะมีการใช้ฟิวเตอร์สีแดง เขียวและน้ำเงิน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าพิกเซล หากเป็นกล้องที่ใช้ตัวรับภาพคนละรุ่นหรือแม้แต่กล้องคนละตัวก็อาจจะให้ค่าพิกเซลแตกต่างกันได้ รวมทั้งการปรับตั้งไวต์บาลานซ์ (white balance) ก็มีผลต่อค่าพิกเซลเช่นกัน
- พิกเซลบนตัวรับภาพและพิกเซลบนภาพไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่ง เนื่องจากค่าพิกเซลหนึ่ง ๆ บนภาพจะเกิดจากการรวมค่าพิกเซลสีแดง เขียวและน้ำเงินจากพิกเซลบนตัวรับภาพที่อยู่ติดกันใกล้เคียง ดังนั้นค่าพิกเซลที่ได้จึงไม่ใช่ค่าที่แท้จริงจากแสงในตำแหน่งนั้น ๆ

- ค่าพิกเซลที่ถูกบันทึกลงในหน่วยความจำ เป็นค่าพิกเซลที่ได้รับการแก้ไขให้สัมพันธ์กับการมองเห็นของมนุษย์แล้ว (gamma correction) จึงทำให้ค่าที่ได้เป็นนอนลิเนียร์ (nonlinearity) การใช้ข้อมูลในรูปแบบข้อมูลดิบ (raw format) จากตัวรับภาพโดยไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ ของกล้องจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้
- เนื่องจากกล้องถ่ายภาพอาจจะมีช่วงพลวัต (dynamic range) ที่ไม่เพียงพอในการบันทึกปริมาณแสงที่สะท้อนออกจากวัตถุที่ทำการวัด จึงมีความจำเป็นต้องใช้เทคนิคช่วงพลวัตสูง (high dynamic range) เพื่อให้ได้ข้อมูลครบถ้วนโดยเฉพาะการสะท้อนกล้ำ

2.4 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) [18]

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (optimization technique) โดยมีพื้นฐานจากการวิวัฒนาการทางพันธุกรรมและการคัดเลือกตามธรรมชาติ เป็นเทคนิคที่พัฒนาโดย John Holland ใน ค.ศ. 1959 เขาได้นำเสนอการคำนวณเชิงวิวัฒนาการโดยการเลียนแบบการวิวัฒนาการทางพันธุกรรม และได้พัฒนาจนกลายเป็นขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมใน ค.ศ. 1975 David Goldberg ได้นำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมไปใช้ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนเกี่ยวกับการควบคุมการส่งก๊าซทางท่อในบริษัทยาปิโตรเลียมของเขาใน ค.ศ. 1989 จนทำให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นที่รู้จักขึ้นมา

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นหนึ่งในวิธีปัญหาประดิษฐ์ที่จำลองกระบวนการวิวัฒนาการทางธรรมชาติในการให้กำเนิดประชากรรุ่นใหม่โดยการถ่ายทอดลักษณะเด่นไปยังรุ่นลูกหลาน ได้พัฒนามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการหาคำตอบแบบคู่ขนานโดยคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่นจะถูกปรับเปลี่ยนและส่งผ่านไปยังประชากรรุ่นถัดไป การปรับเปลี่ยนที่เกิดขึ้นก็เพื่อให้ประชากรรุ่นถัดไปมีโอกาสค้นพบคำตอบที่ดีกว่าประชากรรุ่นก่อนหน้า ทำให้ประชากรรุ่นสุดท้ายจะเป็นประชากรที่ให้ค่าเหมาะสมที่สุด (optimum solution)



ภาพที่ 2-8 แผนผังการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่อง

ข้อดีของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

- สามารถใช้ได้กับทั้งตัวแปรต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง
- ไม่ต้องใช้ข้อมูลหรือความรู้อื่น ๆ ประกอบ
- สามารถค้นหาในแต่ละช่วงข้อมูลพร้อม ๆ กัน
- สามารถทำงานกับตัวแปรที่มีค่ามากได้
- เหมาะสำหรับการประมวลผลแบบคู่ขนาน
- สามารถใช้กับฟังก์ชันที่ให้ค่าซับซ้อน (มีค่าที่เหมาะสมที่เป็นไปได้หลายจุด)
- สามารถให้ชุดตัวแปรที่เหมาะสมได้มากกว่า 1 ชุด
- สามารถใช้กับชุดข้อมูลที่สร้างขึ้นมา ข้อมูลจากการทดลองหรือฟังก์ชันเชิงวิเคราะห์

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบไบนารี (Binary genetic algorithm) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่อง (Continuous genetic algorithm) [18] มีความแตกต่างกันที่ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบไบนารีจะพิจารณาค่าตัวแปรในรูปเลขลักษณะฐานสองซึ่งประกอบด้วยเลข 0 และ 1 ในค่านวนหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการเข้ารหัส และการถอดรหัสเพื่อเป็นการแปลงระหว่างค่าตัวแปรกับเลขลักษณะฐานสอง ส่วนขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่องจะใช้ค่าตัวแปรนั้นโดยตรงซึ่งเป็นค่าตัวเลขแบบ floating-point จึงใช้หน่วยความจำในการเก็บค่าตัวแปรน้อยกว่าแบบไบนารีและไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการเข้ารหัสและการถอดรหัสทำให้การคำนวณใช้เวลาน้อยกว่า ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่องในการหาตัวแปรที่เหมาะสมในแต่ละแบบจำลอง ฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงเฉพาะขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่อง ซึ่งได้แสดงการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่องไว้ในภาพที่

2.4.1 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) และฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function)

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) [19] เป็นฟังก์ชันที่ใช้ประเมินตัวแปรในปัญหาที่สนใจ อย่างเช่นกรณีที่สนใจในการหาค่าต่ำที่สุด ตัวแปรที่เหมาะสมก็ควรจะให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต่ำที่สุด เป็นต้น อย่างไรก็ตามการประเมินตัวแปรด้วยค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ยังไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบความเหมาะสม (fitness) ของตัวแปรแต่ละตัวได้ จึงต้องมีฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) เพื่อแปลงค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นค่าความเหมาะสม (fitness value)

$$F(x) = g(f(x)) \quad (2-3)$$

f	เป็นฟังก์ชันจุดประสงค์
g	เป็นฟังก์ชันความเหมาะสม
F	เป็นค่าความเหมาะสมเชิงสัมพัทธ์
x	เป็นค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันจุดประสงค์

ในหลายกรณีค่าฟังก์ชันความเหมาะสมจะเป็นตัวกำหนดจำนวนประชากรในรุ่นถัดไป จึงต้องมีการคำนวณค่าความเหมาะสมของแต่ละตัวแปร จากค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของตัวแปรนั้น เปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์รวม

$$F(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} f(x_i)} \quad (2-4)$$

N_p เป็นขนาดของประชากร

x_i เป็นค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันจุดประสงค์ของประชากรลำดับที่ i

2.4.2 โครโมโซม (chromosome)

จุดมุ่งหมายในการแก้ปัญหาคือการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด(คำตอบที่ให้ค่าน้อยที่สุด) กับปัญหานั้น กระบวนการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่องจะต้องทำการกำหนดโครโมโซมซึ่งประกอบด้วยแถวลำดับ (array) ของค่าตัวแปร ถ้าโครโมโซมมีตัวแปร N_v ตัวแปรประกอบด้วย $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_v}$ จะสามารถเขียนได้เป็นแถวลำดับได้เป็น 1 คูณ N_v

$$chromosome = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_v}] \quad (2-5)$$

ในกรณีนี้ค่าตัวแปร $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_v}$ มีค่าตัวเลขแบบ floating-point ค่าตัวแปรทั้งหมดจะถูกประมวลผลในฟังก์ชันความเหมาะสมเพื่อหาค่าความเหมาะสม

$$\begin{aligned} fitness &= g(f(chromosome)) \\ &= g(f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_v})) \end{aligned} \quad (2-6)$$

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมใช้เทคนิคในการค้นหาค่าที่เหมาะสม จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดขอบเขตของการค้นหาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมโดยการกำหนดเงื่อนไขในการค้นหา เช่น การกำหนดค่าสูงสุด-ต่ำสุดของค่าตัวแปรเพื่อให้การประมวลผลมีความถูกต้องและใช้เวลาน้อยลง แต่ถ้าหากไม่ทราบขอบเขตของการค้นหาที่ชัดเจนจะต้องกำหนดให้ประชากรรุ่นแรกมีความหลากหลายเพียงพอเพื่อให้ครอบคลุมความเป็นไปได้ของคำตอบทั้งหมด ก่อนจะเน้นไปที่ช่วงที่ให้ค่าความเหมาะสมสูงกว่า

2.4.3 การสร้างประชากรเริ่มต้น (initial population)

เริ่มต้นขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมด้วยการสร้างประชากรเริ่มต้นจำนวน N_p โครโมโซม โดยประชากรเริ่มต้นจะเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ N_p คูณ N_v แต่ละแถวของเมทริกซ์ที่ได้คือโครโมโซมที่มีขนาด 1 คูณ N_v

เริ่มจากการสุ่มค่าแบบเอกกรุป (uniform) ในเมทริกซ์ขนาด N_p คูณ N_v จากนั้นจึงทำการนอร์มอลไลเซชัน (normalization) ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แล้วจึงคำนวณหาประชากรเริ่มต้นให้มีค่าอยู่ในช่วงระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด (สมการที่ 2-7) ประชากรชุดเริ่มต้นจะถูกประมวลผลในฟังก์ชันความเหมาะสมเพื่อหาค่าความเหมาะสมต่อไป

$$p = [p_n (p_{hi} - p_{lo})] + p_{lo} \quad (2-7)$$

p_{hi} เป็นค่าสูงสุดของตัวแปรที่ถูกกำหนดไว้

p_{lo} เป็นค่าต่ำสุดของตัวแปรที่ถูกกำหนดไว้

p_n เป็นค่าที่ได้จากการสุ่มหลังผ่านการนอร์มอลไลเซชันแล้ว

2.4.4 การคัดเลือก (selection)

เมื่อประชากรแต่ละรุ่นได้ถูกประมวลผลในฟังก์ชันความเหมาะสมแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการคัดเลือกโครโมโซมที่จะอยู่รอดและใช้เป็นต้นแบบในการผลิตประชากรรุ่นถัดไป ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นในทุก ๆ รอบของการประมวลผล โครโมโซมจะถูกจัดเรียงใหม่จากโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำที่สุดไปโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูงสุดที่สุด โดยให้โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำมีโอกาสที่จะถูกเลือกมากกว่าโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูง จึงมีโอกาที่โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมสูงจะไม่ถูกเลือกเลยเพื่อเป็นการเปิดพื้นที่ให้กับประชากรรุ่นถัดไป วิธีในการคัดเลือกโครโมโซมมีดังนี้

- การคัดเลือกตามสัดส่วนค่าความเหมาะสม (fitness proportionate selection) หรือการคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ตต์ (roulette-wheel selection) ค่าความน่าจะเป็นซึ่งเป็นสัดส่วนกลับกับค่าความเหมาะสมจะถูกกำหนดให้กับโครโมโซมแต่ละตัว ค่าความน่าจะเป็นที่ถูกกำหนดให้กับโครโมโซมแต่ละตัวเปรียบเหมือนกับขนาดความกว้างของช่องแต่ละช่องบนวงล้อรูเล็ตต์ จากนั้นจะทำการสุ่มตัวเลขเพื่อทำการคัดเลือกโครโมโซมจนได้โครโมโซมครบตามจำนวนที่ต้องการ วิธีนี้จะไม่มีความลำเอียง (bias) ในการคัดเลือกเนื่องจากถ้าโครโมโซมตัวใดที่มีค่าความเหมาะสมต่ำก็จะมีโอกาสถูกเลือกซ้ำหลายครั้ง



ภาพที่ 2-9 การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ตต์

- การคัดเลือกสุ่มตัวอย่างแบบสโตแคสติกยูนิเวอร์แซล (stochastic universal sampling selection) มีหลักการคัดเลือกเหมือนกับการคัดเลือกตามสัดส่วนค่าความเหมาะสม แต่ต่างกันตรงที่วิธีนี้จะทำการสุ่มตัวเลขในครั้งแรกเท่านั้น จากนั้นจะเลื่อนไปยังจุดถัดไปด้วยระยะเท่า ๆ กันโดยคำนวณจากผลรวมของค่าความน่าจะเป็นหารด้วยจำนวนโครโมโซมที่ต้องการ การคัดเลือกด้วยวิธีนี้จะไม่เกิดความลำเอียงในการคัดเลือกและโครโมโซมถูกเลือกแต่ละตัวจะถูกเลือกด้วยจำนวนครั้งที่น้อยที่สุด นั่นหมายความว่าโครโมโซมที่ถูกเลือกซ้ำหลาย ๆ ครั้งจะเกิดขึ้นเฉพาะกับโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำมาก ๆ

- การคัดเลือกแบบจัดลำดับ (ranking) เป็นการจัดลำดับโครโมโซมจากโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำไปสูง แล้วจึงคัดเลือกโครโมโซมตามจำนวนที่ต้องการโดยเรียงตามลำดับ
- การคัดเลือกแบบการแข่งขัน (tournament selection) เป็นวิธีการคัดเลือกที่เลียนแบบการแข่งขันที่เกิดขึ้นในธรรมชาติโดยการสุ่มเลือกแบ่งโครโมโซมออกเป็นสองกลุ่มแล้วจึงเลือกโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำที่สุดในกลุ่ม การคัดเลือกด้วยวิธีนี้จะไม่เกิดความลำเอียงในการคัดเลือกและเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลที่มีประชากรมาก ๆ
- การคัดเลือกแบบอีลิทิสต์ (elitist) เป็นการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดไว้ตามจำนวนที่ต้องการ แล้วโครโมโซมที่เหลือจะใช้วิธีคัดเลือกวิธีอื่น ๆ

2.4.5 การไขว้สลับ (crossover)

การไขว้สลับเป็นขั้นตอนการถ่ายทอดลักษณะที่ดีของโครโมโซมพ่อและแม่ไปยังโครโมโซมรุ่นถัดไป โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมต่ำกว่ามักจะได้รับการคัดเลือกเพื่อมาไขว้สลับจึงส่งผลให้รุ่นต่อไปมีโอกาสถูกเลือกในขั้นตอนการคัดเลือกมากขึ้น รวมทั้งมีโอกาสที่จะให้ค่าความเหมาะสมต่ำกว่ารุ่นพ่อแม่อีกด้วย การไขว้สลับในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่องอาจจะให้ผลที่แตกต่างจากการไขว้สลับในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบไบนารี รวมทั้งการใช้เทคนิคอื่นเข้าช่วยเพื่อให้การไขว้สลับในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่องมีประสิทธิภาพดีขึ้น

การไขว้สลับที่ง่ายที่สุดคือการกำหนดจุดในโครโมโซมที่จะใช้เป็นจุดไขว้สลับหนึ่งจุดหรือมากกว่านั้น จากนั้นจึงสลับชิ้นส่วน (ตัวแปร) ของโครโมโซมพ่อและแม่ (สมการที่ 2-8) ได้เป็นโครโมโซมรุ่นลูก (สมการที่ 2-9) หรือใช้วิธีการไขว้สลับแบบเอกรูป (uniform crossover) ซึ่งจะกำหนดให้มีจุดไขว้สลับเท่ากับจำนวนตัวแปรในโครโมโซม (N_v) จากนั้นก็ทำการสุ่มเลือกว่าจะให้มีการไขว้สลับที่ตำแหน่งใดบ้าง

$$\begin{aligned} \text{parent}_m &= [P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}, P_{m4}, P_{m5}, P_{m6}, \dots, P_{mN_v}] \\ \text{parent}_d &= [P_{d1}, P_{d2}, P_{d3}, P_{d4}, P_{d5}, P_{d6}, \dots, P_{dN_v}] \end{aligned} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned} offspring_1 &= [p_{m1}, p_{m2}, | p_{d3}, p_{d4}, | p_{m5}, p_{m6}, \dots, p_{mN_v}] \\ offspring_2 &= [p_{d1}, p_{d2}, | p_{m3}, p_{m4}, | p_{d5}, p_{d6}, \dots, p_{dN_v}] \end{aligned} \quad (2-9)$$

อย่างไรก็ตามการไขว้สลับแบบที่กล่าวมาไม่ได้มีการสร้างค่าตัวแปรใหม่ให้กับประชากรรุ่นถัดไป เพียงแต่เป็นการสลับค่าตัวแปรในบางตำแหน่งระหว่างโครโมโซมพ่อกับโครโมโซมแม่ ซึ่งจะแตกต่างจากการใช้วิธีดังกล่าวกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบไบนารี

วิธีการผสมผสาน (blending method) เป็นวิธีที่ช่วยแก้ปัญหาข้างต้นได้ โดยการผสมผสานค่าตัวแปรจากโครโมโซมพ่อและโครโมโซมแม่เพื่อให้เกิดเป็นค่าตัวแปรใหม่ในรุ่นลูก (สมการที่ 2-10)

$$p_{new} = \beta p_{mn} + (1 - \beta) p_{dn} \quad (2-10)$$

β เป็นค่าที่ได้จากการสุ่มมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

p_{mn} เป็นค่าตัวแปรที่ n ในโครโมโซมแม่

p_{dn} เป็นค่าตัวแปรที่ n ในโครโมโซมพ่อ

วิธีการประมาณค่านอกช่วง (extrapolating method) เป็นวิธีที่อนุญาตให้ค่าตัวแปรที่ได้จากการไขว้สลับอยู่นอกช่วงค่าตัวแปรที่ได้จากโครโมโซมพ่อและโครโมโซมแม่ โดยที่ค่าตัวแปรที่ดีที่สุด 2 ค่าจะถูกเลือกจาก p_{new1} , p_{new2} และ p_{new3} (สมการที่ 2-11) ค่าคงที่ 0.5 และ 1.5 สามารถปรับเปลี่ยนเป็นค่าอื่นให้เหมาะกับการใช้งานได้

$$\begin{aligned} p_{new1} &= 0.5 p_{mn} + 0.5 p_{dn} \\ p_{new2} &= 1.5 p_{mn} - 0.5 p_{dn} \\ p_{new3} &= -0.5 p_{mn} + 1.5 p_{dn} \end{aligned} \quad (2-11)$$

วิธีการไขว้สลับแบบ Heuristic ได้รวมข้อได้เปรียบของวิธีการทั้งสองที่กล่าวไปข้างต้นเข้าไว้ด้วยกัน ค่า β เป็นค่าที่ได้จากการสุ่มโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แต่หากต้องการให้ค่าตัวแปรของรุ่นถัดไปอยู่นอกช่วงค่าตัวแปรที่ได้จากโครโมโซมพ่อและโครโมโซมแม่ก็สามารถเลือกใช้ค่า β ในช่วงอื่น ๆ ได้ (สมการที่ 2-12)

$$p_{new} = \beta(p_{mn} - p_{dn}) + p_{mn} \quad (2-12)$$

2.4.6 การกลายพันธุ์ (mutation)

ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีความเป็นไปได้ที่ค่าตัวแปรจะลู่เข้าหากันในบางช่วงของค่าตัวแปร หากมีค่าตัวแปรที่เหมาะสมอยู่ในช่วงดังกล่าวถือว่าเป็นเรื่องที่ดี แต่ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นก็อาจจะได้ค่าตัวแปรที่ไม่เหมาะสมได้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างความหลากหลายของค่าตัวแปรโดยการสุ่มเปลี่ยนค่าตัวแปรในโครโมโซมหรือการกลายพันธุ์ ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบไบนารีจะใช้วิธีเปลี่ยนค่าบิตจาก 0 ไปเป็น 1 หรือจาก 1 ไปเป็น 0 แต่สำหรับในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบต่อเนื่องจะสุ่มเลือกแถวและคอลัมน์ตามจำนวนที่คำนวณได้จากอัตราการกลายพันธุ์ (mutation rate) เพื่อระบุตำแหน่งในการกลายพันธุ์ จากนั้นจึงสุ่มค่าตัวแปรแบบเอกรูป (uniform random) ในช่วงค่าสูงสุด-ต่ำสุดที่ได้กำหนดไว้ไปแทนที่ค่าตัวแปรในตำแหน่งดังกล่าว

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท [20] ได้แก่ แบบจำลองที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความสะท้อน (data-driven reflectance model) เป็นการใช้ข้อมูลปีอาร์ตีเอฟทีวีวัดได้จากเครื่องโกนินโอรีเฟลกโตมิเตอร์โดยตรง ผลที่ได้จากแบบจำลองประเภทนี้จะให้การสะท้อนแสงที่มีความสมจริงมาก แต่เนื่องจากข้อมูลปีอาร์ตีเอฟทีวีวัดมีปริมาณมาก ในการประมวลผลจึงต้องการหน่วยความจำปริมาณมากเช่นกัน และแบบจำลองอีกประเภทหนึ่งคือแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (analytical model) เป็นการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายการสะท้อนแสงของพื้นผิว สามารถแบ่งย่อยออกได้

อีก 2 ประเภทคือ แบบจำลองเชิงประจักษ์ (empirical models) ที่อธิบายการสะท้อนแสงของพื้นผิวด้วยสมการคณิตศาสตร์โดยไม่คำนึงถึงสมบัติทางฟิสิกส์ของพื้นผิวและสามารถปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้รูปแบบการสะท้อนแสงแบบต่าง ๆ การคำนวณโดยใช้แบบจำลองชนิดนี้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าแบบจำลองชนิดอื่น แบบจำลองที่มีพื้นฐานทางฟิสิกส์ (physically-based models) เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยพิจารณาถึงสมบัติทางฟิสิกส์ของพื้นผิวเป็นหลัก สมการคณิตศาสตร์ที่ได้จึงมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณมากจึงไม่เหมาะสำหรับใช้ในระบบสร้างภาพสามมิติ (3D rendering system)

แบบจำลองการสะท้อนแสงของแลมเบิร์ตเซียน (Lambertian reflectance model) เป็นการอธิบายการสะท้อนแสงของพื้นผิวฟุ้งอุดมคติ (ideal diffuse surface) ที่ให้ปริมาณแสงสะท้อนในทุกทิศทางเท่ากันโดยปริมาณแสงสะท้อนจะขึ้นอยู่กับมุมที่แสงตกกระทบกระทำกับเส้นปกติของพื้นผิว มักจะถูกใช้ในการอธิบายส่วนของการสะท้อนแสงฟุ้งในแบบจำลองอื่น

$$I_d = \rho \cdot I_i (N \cdot L) \quad (2-13)$$

I_d, I_i เป็นความเข้มแสงของแสงสะท้อนฟุ้งและแสงตกกระทบตามลำดับ

ρ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงฟุ้ง

N เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางเส้นปกติ

L เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางแหล่งแสง

แบบจำลองของมาตุสิก (Matusik) [21] และแบบจำลองของลอว์เรนซ์ (Lawrence) [22] เป็นตัวอย่างของแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความสะท้อน แต่การที่ต้องใช้หน่วยความจำปริมาณมากในการเก็บข้อมูลบิตอาร์ตีเฟฟที่ได้จากการวัดของพื้นผิวแต่ละชนิด จึงไม่เหมาะสำหรับใช้ในการสร้างภาพสามมิติ โดยเฉพาะเมื่อภายในภาพมีพื้นผิวหลายชนิดประกอบกัน อีกทั้งสิ้นเปลืองเวลาในการวัดค่าบิตอาร์ตีเฟฟมาก แบบจำลองของฟอง (Phong) [23] เป็น

แบบจำลองเชิงประจักษ์ที่เป็นที่รู้จักกันดี ได้อธิบายการสะท้อนแสงของพื้นผิวเป็นแบบผสม โดยให้การกระจายตัวของการสะท้อนแสงกัฏรอบทิศทางของการสะท้อนสมบูรณ์ (R) เป็นการสะท้อนที่มีมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ไม่มีความซับซ้อนจึงมีการใช้อย่างแพร่หลายในวงการคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ (สมการที่ 2-14)

$$k_s = \rho_s (V \cdot R)^n \quad (2-14)$$

k_s	เป็นค่าปีอาร์ตีเอฟในส่วนของ การสะท้อนแสงกล้า
ρ_s	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงกล้า
V	เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตัวรับภาพ
R	เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง การสะท้อนแสงที่เป็นไปตามกฎการสะท้อนแสง
n	เป็นค่าความมันวาวของพื้นผิว

บลินน์ (Blinn) [24] ได้พัฒนาแบบจำลองของฟองให้มีการคำนวณที่เร็วขึ้น ที่รู้จักกันในชื่อแบบจำลอง บลินน์-ฟอง (สมการที่ 2-15) ได้พิจารณาการกระจายตัวของ การสะท้อนแสงกล้าให้สัมพันธ์กับการวางตัวของฮาร์ฟเวกเตอร์กับเส้นปกติของพื้นผิวทำให้ลดเวลาในการคำนวณ เนื่องจากไม่ต้องคำนวณหาทิศทางของการสะท้อนแสงสมบูรณ์

$$k_s = \rho_s (N \cdot H)^n \quad (2-15)$$

ρ_s	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงกล้า
N	เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางเส้นปกติ
H	เป็นฮาร์ฟเวกเตอร์ ($H = L + V$)
n	เป็นค่าความมันวาวของพื้นผิว

แบบจำลองของทอร์เรนซ์-สปาร์โรว์ (Torrance-Sparrow) [25] และคุก-ทอร์เรนซ์ (Cook-Torrance) [26] เป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานทางฟิสิกส์ ที่มีการพิจารณาโครงสร้างในระดับไมโคร (microscale geometry) ของพื้นผิวในลักษณะเป็นหลุมรูปตัววี (v-cavities) ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม สมการในส่วนของการสะท้อนแสงกล้าจะประกอบด้วย Microfacets distribution (D), Geometric attenuation factor (G) และ Fresnel factor (F)

Microfacets distribution (D) เป็นส่วนที่อธิบายการกระจายตัวของเส้นปกติของผิวหน้าระดับไมโครส่วนใหญ่จะใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวเกาส์เซียน (Gaussian distribution function) หรือฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเบคก์แมนน์ (Beckmann distribution function) (สมการที่ 2-16)

$$D = \frac{1}{\alpha^2 \cos^4 \delta} \exp\left[\frac{-\tan^2 \delta}{\alpha^2}\right] \quad (2-16)$$

α เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของผิวหน้าระดับไมโคร

δ เป็นมุมระหว่างเส้นปกติกับฮาร์ฟเวกเตอร์

Geometric attenuation factor (G) เป็นส่วนที่อธิบายปรากฏการณ์การบัง (masking) และปรากฏการณ์การเกิดเงา (shadowing) ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าระดับไมโคร (สมการที่ 2-17)

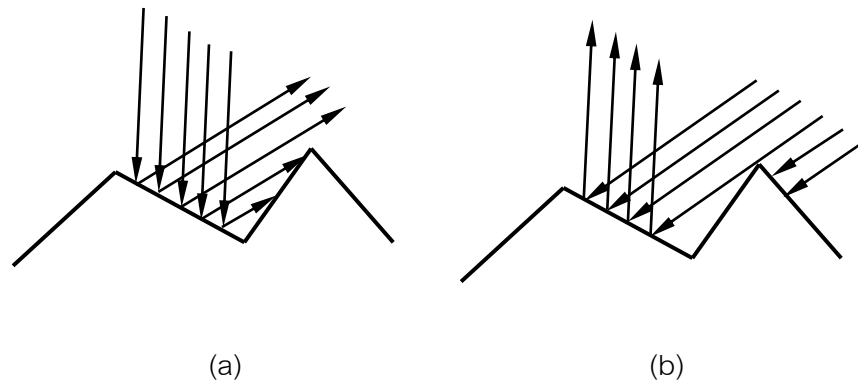
$$G = \min\left[1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(V \cdot H)}\right] \quad (2-17)$$

N เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางเส้นปกติ

H เป็นฮาร์ฟเวกเตอร์ ($H = L+V$)

V เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตัวรับภาพ

L เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางแหล่งแสง



ภาพที่ 2-10 (a) ปรางกฎการบัง (masking) (b) ปรางกฎการเกิดเงา (shadowing)

Fresnel factor (F) เป็นส่วนที่อธิบายปรางกฎการสะท้อนของแสงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหแตกต่างกัน สมการประมาณค่า Fresnel factor ของชชลิค (Schlick) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถลดเวลาในการคำนวณลงได้ถึง 32 เท่า [27] (สมการที่ 2-18)

$$F = f_0 + (1 - f_0)(1 - V \cdot H)^5 \quad (2-18)$$

เมื่อ $f_0 = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$, n เป็นดัชนีหักเห

V เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตัวรับภาพ

H เป็นฮาร์ฟเวกเตอร์ ($H = L + V$)

แบบจำลองของออเรน-นayar (Oren-Nayar) [28] เป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานทางฟิสิกส์ที่ได้ปรับปรุงการสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเขียนโดยการพิจารณา microfacets distribution ในรูปแบบฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนที่ใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความหยาบของพื้นผิว (roughness) (สมการที่ 2-19) ซึ่งสามารถวัดได้โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานยังเป็นการควบคุมการเกิดการสะท้อนแสงย้อนกลับ (retroreflection) หากค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0 ก็จะได้สมการการสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเขียน แบบจำลองนี้
ยังได้พิจารณาการเกิด masking-shadowing และการสะท้อนระหว่างผิวหน้าระดับไมโคร

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho}{\pi} [A + B \max(0, \cos(\phi_r - \phi_i)) \sin(a) \tan(b)] \quad (2-19)$$

เมื่อ

$$A = 1 - 0.5 \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + 0.33}$$

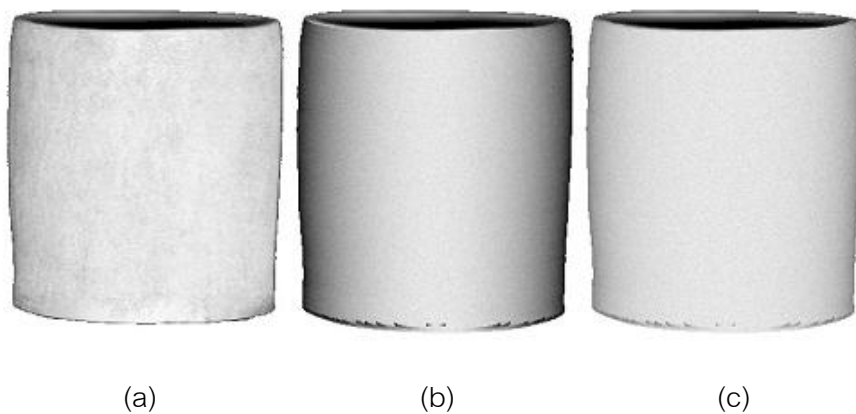
$$B = 0.45 \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + 0.09}$$

$$a = \max(\theta_r, \theta_i)$$

$$b = \min(\theta_r, \theta_i)$$

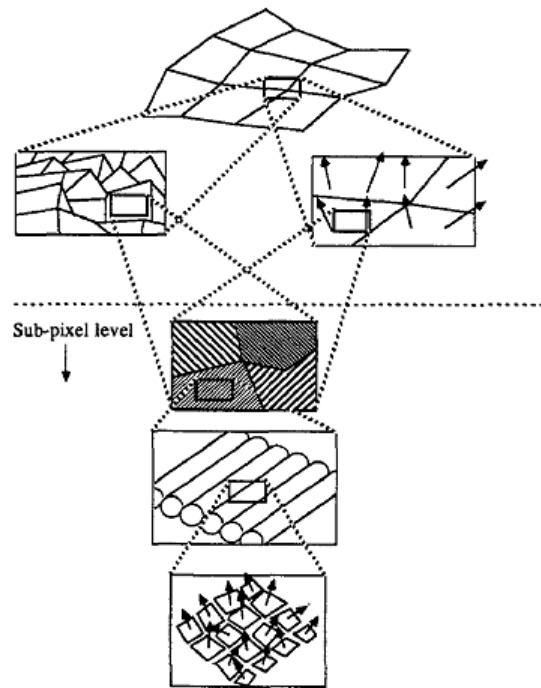
ρ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงฟุ้ง

ϕ_i, ϕ_r เป็นมุมกวาดของทิศทางแสงตกกระทบและทิศทางแสงสะท้อน
ตามลำดับ



ภาพที่ 2-11 (c) ภาพที่ได้จากแบบจำลองของออเรน-นaylor เปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากการ
(b) สะท้อนแบบแลมเบิร์ตเขียน และ (a) ภาพถ่าย [28]

พัวลินและโฟร์เนียร์ (Poulin and Fournier) [29] ได้นำเสนอแบบจำลองการสะท้อนแสงและการหักเหของแสงสำหรับพื้นผิวที่มีการสะท้อนแสงแบบแอนไอโซทรอปิกบนสมมุติฐานว่าพื้นผิวเหล่านั้นประกอบด้วยแท่งทรงกระบอกขนาดเล็ก ความเป็นแอนไอโซทรอปิกของพื้นผิวสามารถเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนความสูงและระยะห่างระหว่างทรงกระบอก



ภาพที่ 2-12 ลักษณะพื้นผิวระดับไมโครที่ประกอบด้วยแท่งทรงกระบอกขนาดเล็ก [29]

วาร์ด (Ward) [30] ได้นำเสนอแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ไม่มีความซับซ้อนเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นและสามารถจำลองการสะท้อนแสงได้ทั้ง แบบไอโซทรอปิก (สมการที่ 2-20) และแบบแอนไอโซทรอปิก (สมการที่ 2-21)

$$k_s = \frac{\rho_s}{4\pi\alpha^2 \sqrt{(N \cdot L)(N \cdot V)}} \exp\left[\frac{-\tan^2 \delta}{\alpha^2}\right] \quad (2-20)$$

$$k_s = \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x\alpha_y\sqrt{(N \cdot L)(N \cdot V)}} \exp \left[-2 \frac{\left[\frac{H_x}{\alpha_x} \right]^2 + \left[\frac{H_y}{\alpha_y} \right]^2}{1 + (H \cdot N)} \right] \quad (2-21)$$

- ρ_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงกล้า
- N เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางเส้นปกติ
- L เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของแหล่งแสง
- V เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของตัวรับภาพ
- H เป็นฮาร์ฟเวกเตอร์ ($H = L + V$)
- $\alpha_x \alpha_y$ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของพื้นผิวระดับไมโคร
ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ
- δ เป็นมุมระหว่างเส้นปกติกับฮาร์ฟเวกเตอร์

ดูเออร์ (Duer) [31] ได้ศึกษาสมบัติการอนุรักษ์พลังงานของแบบจำลองของวาร์ดและได้ทำการปรับปรุงส่วนนอร์มอลไลเซชันในสมการของแบบจำลอง

แบบจำลองของลาฟอร์ทูน (Lafortune) [32] (สมการที่ 2-22) แบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ได้ปรับปรุงจากแบบจำลองของฟอง สามารถที่จะพยากรณ์ปรากฏการณ์สำคัญ ๆ ได้ เช่น การสะท้อนแสงแบบออสเปคคูลาร์ การสะท้อนแสงแบบย้อนกลับ

$$k_s = \rho_s [C_x L_x V_x + C_y L_y V_y + C_z L_z V_z]^n \quad (2-22)$$

ρ_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงกลับ

C_x, C_y, C_z เป็นตัวประกอบมาตราส่วนในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

L_x, L_y, L_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของแหล่งแสง
ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

V_x, V_y, V_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของตัวรับภาพ
ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

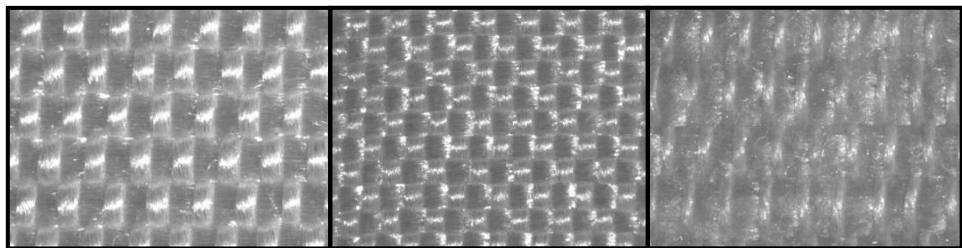
n เป็นค่าความมันวาวของพื้นผิว

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

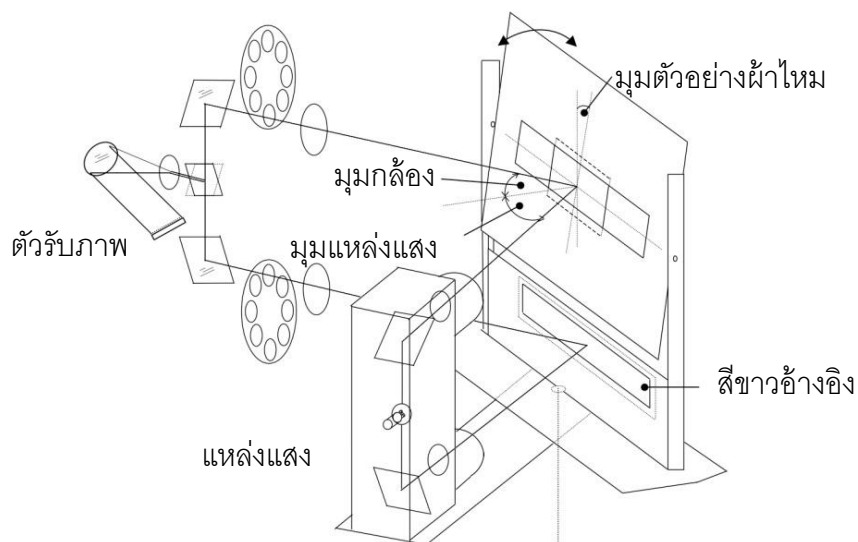
3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างผ้าไหมที่เลือกใช้ เป็นผ้าไหมที่ไม่มีการย้อมสีและมีการทอแบบลายขัดธรรมดา ขนาดของไหมเส้นพุ่ง หนึ่งเส้น, สองเส้นและสี่เส้น ซึ่งจะมีผลให้ความหนาของตัวอย่างผ้าไหมแต่ละแบบแตกต่างกัน ตัวอย่างผ้าไหมทั้งหมดที่ใช้เป็นผ้าไหมจากร้านจิมป์ทอมสัน



ภาพที่ 3-1 ตัวอย่างผ้าไหมแบบที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา)

เครื่องโกนิโอสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (goniospectrophotometer) ของบริษัท Murakami Color Research Laboratory รุ่น GSP-2S ซึ่งเป็นรุ่นที่มีระบบวัดแบบลำแสงคู่ (dual-beam optics) โดยมีแผ่นสีขาวอ้างอิงเป็นแบเรียมซัลเฟต (Barium sulphat) โดยใช้แหล่งแสงเป็นหลอดไฟฮาโลเจนขนาด 100 วัตต์ ตัวรับภาพแบบ silicon photodiode array ทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น 390 ถึง 730 นาโนเมตรที่ความละเอียดสูงสุด 10 นาโนเมตร มุมของแหล่งแสงและตัวรับภาพสามารถปรับได้อัตโนมัติระหว่าง -80 ถึง 80 องศา ส่วนมุมของแท่นที่ใช้จับตัวอย่างสามารถปรับด้วยมือระหว่าง ± 60 องศากับแนวตั้งฉากของตัวรับภาพ



ภาพที่ 3-2 ส่วนประกอบของเครื่องโกนไฟโตมิเตอร์ รุ่น GSP-2S

เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Asus รุ่น F8V หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core 2 Duo P8400 2.26 GHz หน่วยความจำแรม 4 GB หน่วยความจำสำรอง 250 GB ระบบปฏิบัติการ Windows 7 แบบ 64 บิต

โปรแกรม Matlab รุ่น R2010a สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows แบบ 64 บิตของบริษัท The MathWorks ใช้เพื่อเขียนชุดคำสั่งในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม การเขียนกราฟเชิงขั้วและกราฟพื้นผิวสามมิติ

โปรแกรม Shader Designer รุ่น 1.5.9.4 สำหรับระบบปฏิบัติการ Windows แบบ 32 บิตของบริษัท TyphoonLab ใช้เพื่อเขียนชุดคำสั่งการสร้างแสงเงาด้วยแบบจำลองต่าง ๆ บนภาพจำลองสามมิติ

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.2.1 การวัดค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางของผ้าไหมด้วยเครื่องโกนไฟโตมิเตอร์

เตรียมตัวอย่างผ้าใหม่สำหรับการวัดค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทาง โดยการพรมด้วยน้ำและรีดผ้าใหม่ให้เรียบก่อนนำไปติดตั้งบนกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 120 กรัมต่อตารางเมตร ขนาด A4 สีขาว แล้วจึงตัดให้ได้ขนาด 7.5×5.5 ซม.

วัดค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางของตัวอย่างผ้าใหม่ที่ได้เตรียมไว้ด้วยเครื่องโกนนิโอสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น GSP-2S ซึ่งมีระบบการทำงานตามที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3-2 ในช่วงความยาวคลื่น 390 ถึง 730 นาโนเมตรโดยวัดที่ความละเอียดทุก ๆ 10 นาโนเมตร ด้วยมุมการวัดต่างๆดังนี้

- มุมกล้อง: -80, -70, -60, -50, -40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศา
- มุมแหล่งแสง: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 องศา
- มุมตัวอย่างผ้าใหม่: 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 องศา

ในส่วนของมุมกล้องและมุมแหล่งแสงสามารถปรับตั้งได้จากโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่อง แต่สำหรับมุมของตัวอย่างผ้าใหม่ต้องทำการปรับด้วยมือ ก่อนทำการวัดค่าบีอาร์ดีเอฟแต่ละตัวอย่างจะต้องทำการเทียบมาตรฐานด้วยแผ่นเซรามิกสีขาวก่อนทุกครั้ง

3.2.2 การสร้างแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่เหมาะสมกับการสะท้อนแสงของตัวอย่างผ้าใหม่

วิเคราะห์การสะท้อนแสงของตัวอย่างผ้าใหม่ โดยการนำข้อมูลค่าฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่วัดได้มาเขียนเป็นกราฟเชิงขั้วในลักษณะสองมิติและสามมิติ เพื่อให้เห็นลักษณะเฉพาะของการสะท้อนแสงกล้าและการสะท้อนแสงฟุ้งของตัวอย่างผ้าใหม่

เปรียบเทียบลักษณะการสะท้อนแสงของตัวอย่างผ้าใหม่กับแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่มีอยู่ ได้แก่ แบบจำลองของฟอง, แบบจำลอง

ของวาร์ต, แบบจำลองของวาร์ต-ดูเออร์, แบบจำลองของบลินน์-ฟอง, แบบจำลองของคูทอร์เรนซ์ และแบบจำลองของออเรน-นayar โดยให้การสะท้อนแสงฟุ้งเป็นแบบแลมเบิร์ตเซียน (ยกเว้น แบบจำลองของออเรน-นayar ที่แบบจำลองของการสะท้อนแสงฟุ้ง) เพื่อหาแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่สามารถแสดงลักษณะเฉพาะของการสะท้อนแสงของตัวอย่างผ้าไหมได้ดีที่สุด

เนื่องจากในแต่ละแบบจำลองมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนของแบบจำลองที่อธิบายการสะท้อนกล้ำ [20] เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (optimization technique) ที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น กำลังสองน้อยสุดเชิงเส้น (linear least square) ซึ่งเหมาะสำหรับความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น (linear) อาจจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ไม่เหมาะสม จึงได้เลือกขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) ที่อาศัยหลักการทฤษฎีวิวัฒนาการทางชีววิทยาและการคัดเลือกตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่เหมาะสมกับปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น

เลือกแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่ให้ค่าความผิดพลาด (E_{min}) น้อยที่สุด ทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่มีอยู่เดิมและเพิ่มพารามิเตอร์ที่จำเป็นเพื่อให้แบบจำลองที่นำเสนอสามารถแสดงการสะท้อนแสงของผ้าไหมได้เสมือนจริงมากยิ่งขึ้น

3.2.3 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่นำเสนอโดยการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด

หาค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอกับค่าที่ได้จากการวัด

เปรียบเทียบลักษณะการสะท้อนแสงของแบบจำลองที่นำเสนอกับการสะท้อนแสงจริงของผ้าไหมในแต่ละมุมมอง

สร้างภาพจำลองสามมิติโดยใช้แบบจำลองที่นำเสนอในการสร้างแสงเงาในภาพ

3.3 การคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

3.3.1 การกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และฟังก์ชันความเหมาะสม

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (f_r) ที่ใช้ในการคำนวณนี้คือสมการของแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่จะนำมาเปรียบเทียบกัน โดยจะต้องแทนค่าสมการเหล่านั้นลงในฟังก์ชันความเหมาะสม (สมการที่ 3-1) โดยในที่นี้เรียกว่า ฟังก์ชันประเมินความผิดพลาด ค่าความผิดพลาดที่ได้จากฟังก์ชันประเมินความผิดพลาดจะบอกว่าการามีเตอร์แต่ละชุดมีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใดกับแบบจำลองนั้น และฟังก์ชันประเมินความผิดพลาดยังเหมาะสำหรับการคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมากกว่าการใช้ฟังก์ชันจุดประสงค์อีกด้วย

$$E_{\min} = \frac{\sum (f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) - f_m(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r))^2}{\sum (f_m(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r))^2} \quad (3-1)$$

เมื่อ f_r และ f_m เป็นค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณและค่าบีอาร์ดีเอฟที่จากการวัด ตามลำดับ [32]

3.3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

เพื่อให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลองแต่ละตัวได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วจึงต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมดังนี้

- *ff* กำหนดแบบจำลองที่เลือกใช้
- *popsize* กำหนดจำนวนประชากรในแต่ละรุ่น
- *npar* กำหนดจำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลอง
- *varhi, varlo* กำหนดค่าสูงสุด-ต่ำสุดในการค้นหา
- *selection* กำหนดอัตราส่วนจำนวนประชากรที่ถูกเลือก
- *mutrate* กำหนดอัตราส่วนการกลายพันธุ์

- *maxit* กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาหรือจำนวนรุ่นของประชากร
- *mincost* กำหนดค่าความเหมาะสมเป้าหมายหรือค่าความเหมาะสมต่ำสุด

3.3.3 การสร้างประชากรเริ่มต้น (initial population)

สุ่มเลือกค่าพารามิเตอร์ให้ได้ตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ (*popsiz*) ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนประชากรไว้ที่ 20 เนื่องจากเป็นจำนวนประชากรที่ให้ค่าความเหมาะสมที่น้อยที่สุดโดยใช้เวลาคำนวณที่น้อยที่สุดเช่นกัน เมทริกซ์ของประชากรเริ่มต้นจะมีขนาดเท่ากับจำนวนประชากรคูณด้วยจำนวนพารามิเตอร์ (*npar*) ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสุ่มจะมีค่าอยู่ระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่กำหนดไว้ (*varhi*, *varlo*) ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงของค่าพารามิเตอร์ที่เป็นไปได้ในแต่ละแบบจำลอง

3.3.4 การคัดเลือก (selection)

เพื่อให้ได้ประชากรที่เหมาะสมที่จะอยู่รอดและสร้างประชากรในรุ่นถัดไป ในขั้นตอนการคัดเลือก ประชากรจะถูกจัดเรียงจากน้อยไปมากโดยใช้ค่าความเหมาะสม จำนวนประชากรที่เหมาะสมที่จะอยู่รอดจะคำนวณจากค่าอัตราส่วนจำนวนประชากรที่ถูกเลือก (*selection*) โดยในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 0.5 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนจำนวนประชากรที่ถูกเลือกที่ให้ค่าความเหมาะสมที่น้อยที่สุด ประชากรจำนวนดังกล่าวจะได้รับการคัดเลือกตามลำดับ ส่วนประชากรส่วนที่เหลือจะถูกคัดทิ้งเพื่อเว้นตำแหน่งไว้สำหรับประชากรรุ่นถัดไป

3.3.5 การไขว้สลับ (crossover)

ประชากรชุดใหม่จะถูกสร้างขึ้นทดแทนประชากรส่วนที่ถูกคัดทิ้งจากประชากรที่ได้รับการคัดเลือก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการไขว้สลับในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบไบนารีจึงได้รวมวิธีการประมาณค่านอกช่วง (*extrapolating method*) กับการไขว้สลับแบบหนึ่งจุด เริ่มจากการสุ่มหาตำแหน่งในการไขว้สลับ

$$a = \text{roundup}(\text{random} * N_v) \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \text{parent}_m &= [p_{m1}, p_{m2}, p_{m3}, \dots, p_{ma}, \dots, p_{mN_v}] \\ \text{parent}_d &= [p_{d1}, p_{d2}, p_{d3}, \dots, p_{da}, \dots, p_{dN_v}] \end{aligned} \quad (3-3)$$

พารามิเตอร์ในตำแหน่งที่ถูกเลือกจะถูกแทนที่ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ของพ่อและแม่ (สมการที่ 3-4)

$$\begin{aligned} p_{new1} &= p_{ma} - \beta(p_{ma} - p_{da}) \\ p_{new2} &= p_{ma} + \beta(p_{ma} - p_{da}) \end{aligned} \quad (3-4)$$

β เป็นค่าที่ได้จากการสุ่มมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายก็ทำการไขว้สลับในส่วนที่เหลือจะได้ประชากรรุ่นถัดไป (สมการที่ 3-5)

$$\begin{aligned} \text{offspring}_1 &= [p_{m1}, p_{m2}, p_{m3}, \dots, p_{new1}, \dots, p_{dN_v}] \\ \text{offspring}_2 &= [p_{d1}, p_{d2}, p_{d3}, \dots, p_{new2}, \dots, p_{mN_v}] \end{aligned} \quad (3-5)$$

3.3.6 การกลายพันธุ์ (mutation)

อัตราส่วนการกลายพันธุ์ (*mutrate*) จะเป็นตัวกำหนดปริมาณของพารามิเตอร์ที่ถูกแทนที่ด้วยค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่ได้จากการสุ่ม โดยในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 0.2 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนการกลายพันธุ์ที่ให้ค่าความเหมาะสมที่น้อยที่สุด เมื่อทราบจำนวนพารามิเตอร์ที่จะกลายพันธุ์แล้วจะต้องทำการสุ่มหาตำแหน่งแถวและคอลัมน์ในเมทริกซ์ประชากร เพื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากสมการสุ่มค่าพารามิเตอร์ (สมการที่ 3-6) ลงในตำแหน่งที่ได้จากการสุ่มข้างต้น

$$p_{mut} = \beta(\text{varhi} - \text{varlo}) + \text{varlo} \quad (3-6)$$

3.3.7 การประเมินค่าความเหมาะสม (evaluation)

การเปรียบเทียบค่าฟิตเนสที่ได้จากการคำนวณ (f_r) ในแต่ละแบบจำลองและค่าฟิตเนสที่ได้จากการวัด (f_m) จากเครื่องโกนิโอสเปคโทรโฟโตมิเตอร์เพื่อคำนวณค่า

ความเหมาะสม (สมการที่ 3-1) ค่าความเหมาะสมที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการคัดเลือกประชากรรุ่นถัดไป

3.3.8 เงื่อนไขการหยุด (termination)

การกำหนดเงื่อนไขในการหยุดการคำนวณในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถกำหนดได้หลายแบบ แต่ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้หยุดคำนวณเมื่อประชากรถึงรุ่นที่ 50 (*maxit*) เนื่องจากการคำนวณในแต่ละครั้งจะได้ค่าความเหมาะสมที่น้อยที่สุดภายในประชากรรุ่นที่ 50 ดังนั้นการคำนวณในประชากรรุ่นที่ 51 เป็นต้นไปจึงเป็นการคำนวณที่เสียเวลาโดยไม่เกิดประโยชน์ และอีกเงื่อนไขหนึ่งในการหยุดคือ เมื่อค่าความเหมาะสมมีค่าน้อยกว่า 0 (*mincost*) ซึ่งหมายถึงไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าปีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณ (f_r) และค่าปีอาร์ดีเอฟที่จากการวัด (f_m)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

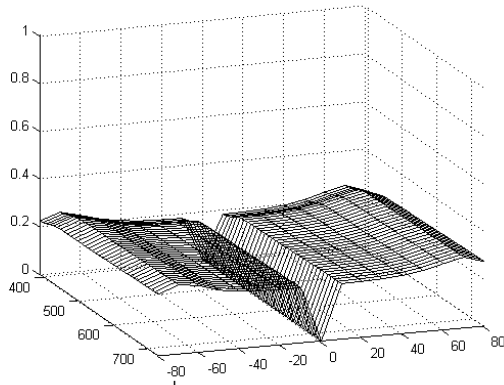
4.1 การสะท้อนแสงของผ้าไหม

ค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดตัวอย่างผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง สามารถนำมาเขียนกราฟการสะท้อนแสงจากพื้นผิวที่มุมแหล่งแสง 0 องศาและ 60 องศาได้ตามกราฟที่ 4-1 จะเห็นว่าค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้ในแต่ละความยาวคลื่นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากตัวอย่างผ้าไหมที่ถูกเลือกมาใช้เป็นผ้าไหมที่มีสีขาวครีม(อมเหลือง) การสะท้อนแสงที่ได้ในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นจึงมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถเลือกค่าบีอาร์ดีเอฟจากความยาวคลื่นใดความยาวคลื่นหนึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูลบีอาร์ดีเอฟทั้งหมดได้ จึงเลือกข้อมูลค่าบีอาร์ดีเอฟที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรที่เป็นความยาวคลื่นที่ไวต่อการรับรู้ของตามนุษย์มากที่สุด [17] [33] เป็นตัวแทนข้อมูลบีอาร์ดีเอฟในทุกความยาวคลื่นที่วัดได้

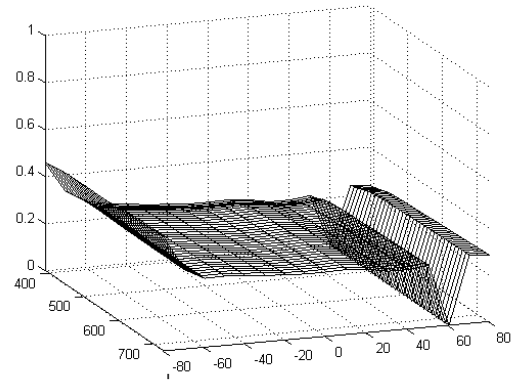
จากนั้นจึงนำข้อมูลบีอาร์ดีเอฟที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรของตัวอย่างผ้าไหมทั้ง 3 ชนิดมาทำการนอร์มอลไลเซชันด้วยค่าบีอาร์ดีเอฟสูงสุดของผ้าไหมแต่ละตัวอย่างและเขียนเป็นกราฟเชิงขั้ว เพื่อทำการวิเคราะห์รายละเอียดลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมในแต่ละระนาบและมุมของแหล่งแสง

4.1.1 ลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมเมื่อเปลี่ยนมุมแหล่งแสง

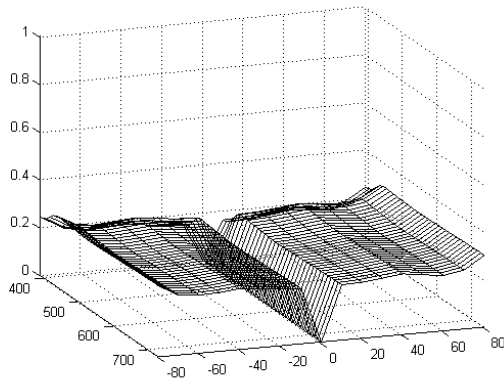
ในกราฟที่ 4-2, 4-3 และ 4-4 เป็นกราฟเชิงขั้วของค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ที่มุมตัวอย่าง 0 องศาและมุมแหล่งแสงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 80 องศา เมื่อสังเกตที่กราฟเชิงขั้วในแต่ละรูปจะพบว่ามิมุมกล้องที่มีค่าบีอาร์ดีเอฟเป็นศูนย์ เนื่องจากเป็นมุมที่มุมแหล่งแสงซ้อนทับกับมุมกล้อง จึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าบีอาร์ดีเอฟในมุมดังกล่าวได้ดังกล่าวได้ ยกเว้นที่มุมกล้อง 90 และ -90 องศา ไม่ได้ทำการวัดเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องโกนิโอโฟโตมิเตอร์ที่สามารถวัดได้ถึงมุมกล้อง 80 ถึง -80 องศา



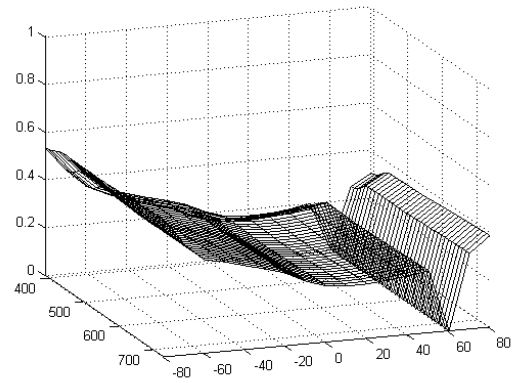
ตัวอย่างที่ 1 มุมแหล่งแสง 0 องศา



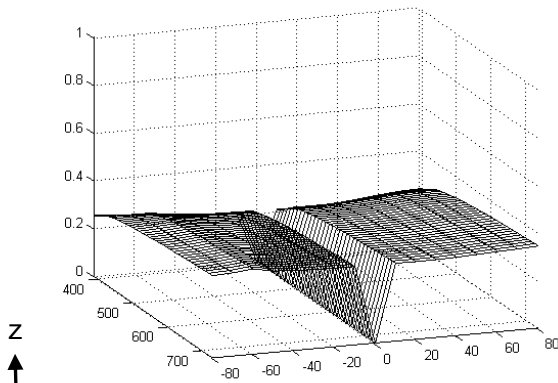
ตัวอย่างที่ 1 มุมแหล่งแสง 60 องศา



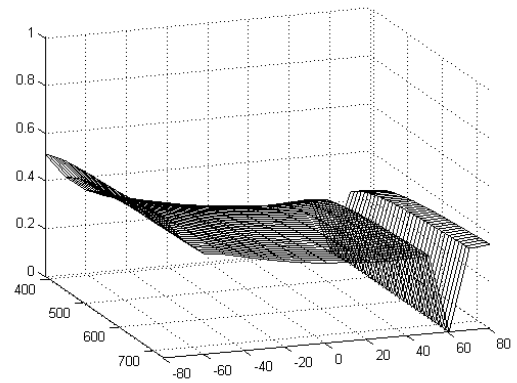
ตัวอย่างที่ 2 มุมแหล่งแสง 0 องศา



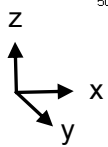
ตัวอย่างที่ 2 มุมแหล่งแสง 60 องศา



ตัวอย่างที่ 3 มุมแหล่งแสง 0 องศา



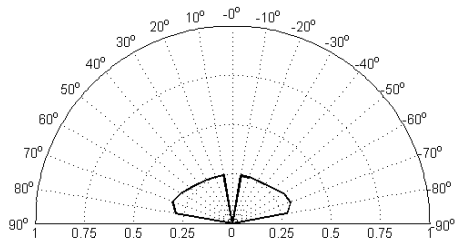
ตัวอย่างที่ 3 มุมแหล่งแสง 60 องศา



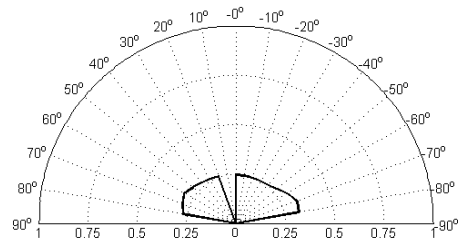
กราฟที่ 4-1 กราฟของค่าความสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 มุมแหล่งแสง 0 และ 60 องศา มุมตัวอย่าง 0 องศา แกน x, y และ z เป็นมุมแหล่งแสง ความยาวคลื่นและค่าบีอาร์ดีเอฟ ตามลำดับ

ในกราฟที่ 4-2 กราฟเชิงขั้วของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เมื่อพิจารณา ที่มุมแหล่งแสง 0 ถึง 10 องศา จะเห็นว่าแสงสะท้อนมีการกระจายตัวในทุกทิศทางใกล้เคียงกัน ซึ่งลักษณะการสะท้อนแสงแบบดังกล่าวเป็นลักษณะของการสะท้อนแสงฟุ้ง ที่มุมแหล่งแสง 20 ถึง 30 องศาในกราฟเชิงขั้วจะเห็นว่า มีลักษณะการสะท้อนแสงกล้าแบบออฟสเปคคูลาร์เกิดขึ้นที่มุมกล้อง -80 องศา และลักษณะการสะท้อนแสงดังกล่าวเด่นชัดขึ้นเมื่อมุมแหล่งแสงอยู่ที่ 40, 50 และ 60 องศา ที่มุมแหล่งแสง 70 องศา มีค่าสูงสุดของการสะท้อนแสงกล้าแบบออฟสเปคคูลาร์ที่มุมกล้อง -80 องศา โดยค่าบีอาร์ดีเอฟที่มุมกล้องดังกล่าวมีค่ามากกว่าค่าบีอาร์ดีเอฟที่มุมกล้องอื่นอย่างเห็นได้ชัด รวมทั้งยังเกิดการสะท้อนแสงกล้าแบบออฟสเปคคูลาร์เป็นช่วงกว้างที่มุมกล้อง 0 ถึง -60 องศา แต่ค่าบีอาร์ดีเอฟที่วัดได้ยังมีค่าน้อยกว่าที่มุมกล้อง -80 องศา มาก ที่มุมแหล่งแสง 80 องศา พบว่ายังเกิดการสะท้อนแสงกล้าขึ้นที่มุมกล้อง -80 องศา แต่มีค่าบีอาร์ดีเอฟน้อยกว่าที่มุมแหล่งแสง 70 องศา การสะท้อนแสงที่มุมกล้องในช่วง -20 ถึง -60 องศา กลับมีค่าบีอาร์ดีเอฟมากขึ้นจนใกล้เคียงค่าบีอาร์ดีเอฟที่มุมกล้อง -80 องศา ลักษณะการสะท้อนแสงที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เมื่อพิจารณา ค่า บีอาร์ดีเอฟที่มุมกล้อง 70 ถึง 80 องศา ค่าบีอาร์ดีเอฟในมุมกล้องดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมแหล่งแสงเพิ่มขึ้น การสะท้อนแสงในลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีรูปแบบการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับผสมรวมอยู่ด้วย

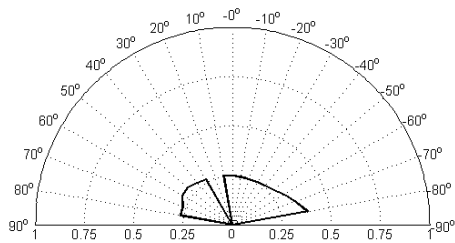
ในกราฟที่ 4-3 กราฟเชิงขั้วของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมแหล่งแสง 0 ถึง 10 องศา มีลักษณะการสะท้อนแสงคล้ายกับผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 แต่มีค่าสูงสุดของค่าบีอาร์ดีเอฟอยู่ที่มุมกล้อง 80 และ -80 องศา ถัดมาที่มุมแหล่งแสง 20 และ 30 องศา ค่าบีอาร์ดีเอฟในช่วงมุมกล้อง -60 ถึง -80 องศา มีค่ามากกว่าช่วงมุมกล้องอื่น เมื่อมุมแหล่งแสงเปลี่ยนมาอยู่ที่ 40 ถึง 50 องศา ลักษณะการสะท้อนดังกล่าวจะมีค่าบีอาร์ดีเอฟเพิ่มมากขึ้นและเลื่อนมาอยู่ในช่วงมุมกล้อง -70 ถึง -80 องศา ในมุมแหล่งแสงที่ 60 องศา ค่าสูงสุดของค่าบีอาร์ดีเอฟเลื่อนมาอยู่ที่มุมกล้อง -80 องศา และค่าบีอาร์ดีเอฟมีค่าเพิ่มขึ้นที่มุมกล้องดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่มุมแหล่งแสงที่ 70 องศา พบว่าค่าสูงสุดของค่าบีอาร์ดีเอฟที่มุมกล้อง -80 องศา มีค่าลดลง และค่าบีอาร์ดีเอฟในช่วงมุมกล้อง -40 ถึง -60 องศา มีค่ามากขึ้นจนใกล้เคียงกับค่าบีอาร์ดีเอฟที่มุมกล้อง -80 องศา และมีการสะท้อน



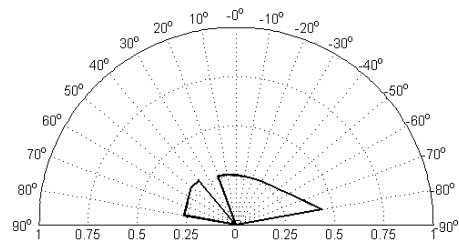
0 องศา



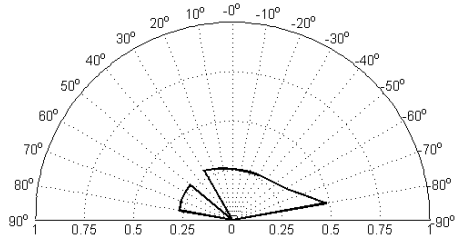
10 องศา



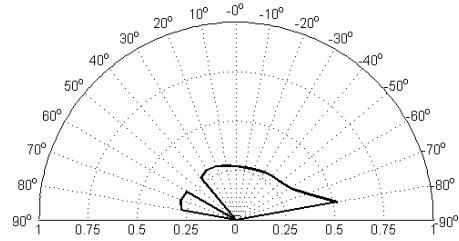
20 องศา



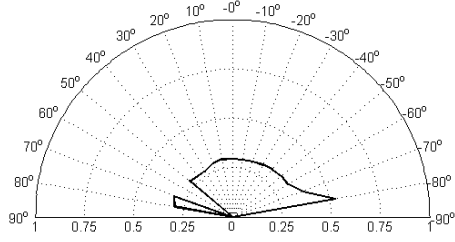
30 องศา



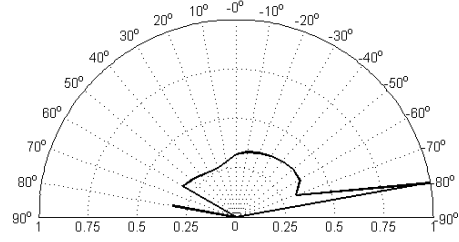
40 องศา



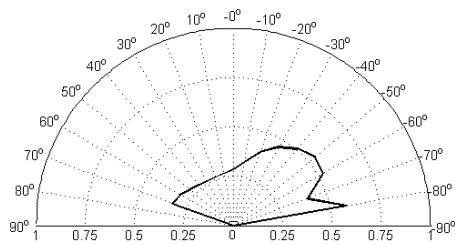
50 องศา



60 องศา

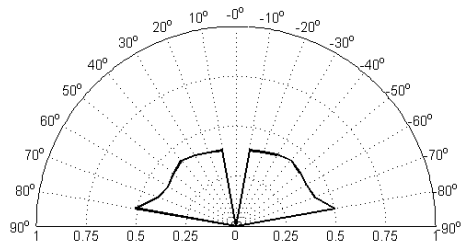


70 องศา

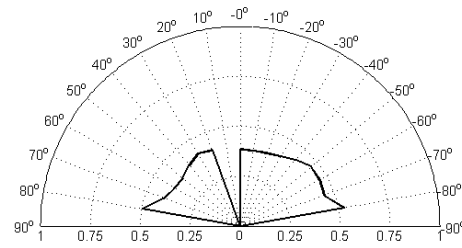


80 องศา

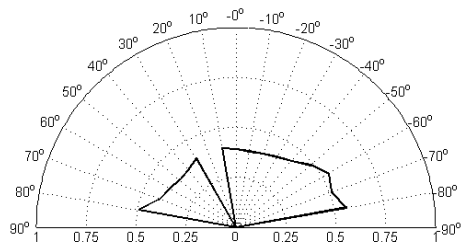
กราฟที่ 4-2 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มุมตัวอย่าง 0° มุมแหล่งแสง 0° ถึง 80°



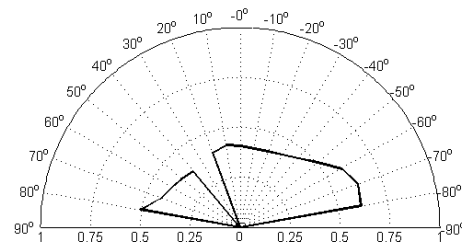
0 องศา



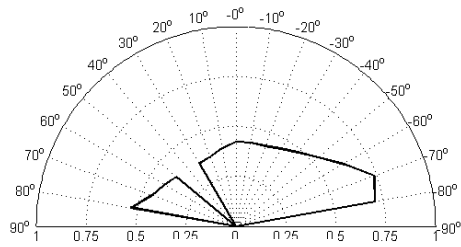
10 องศา



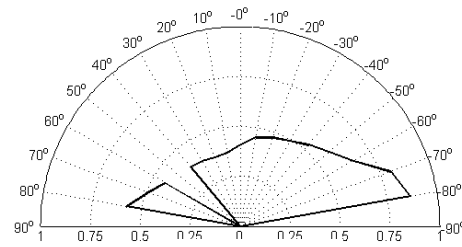
20 องศา



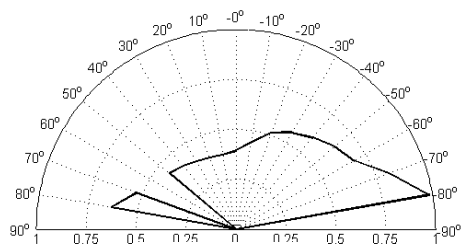
30 องศา



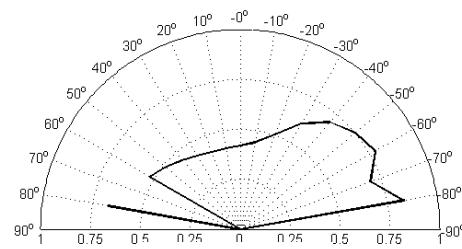
40 องศา



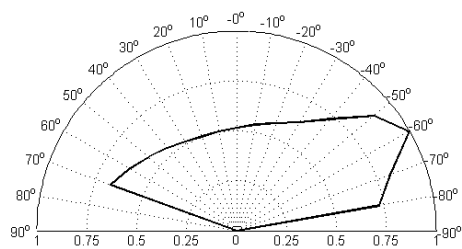
50 องศา



60 องศา

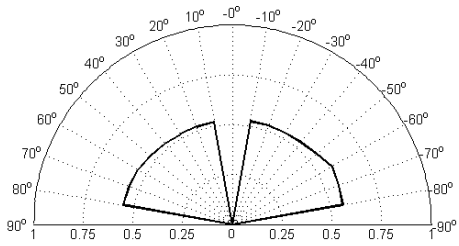


70 องศา

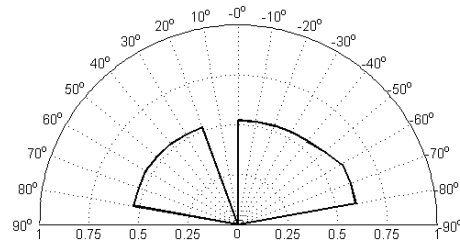


80 องศา

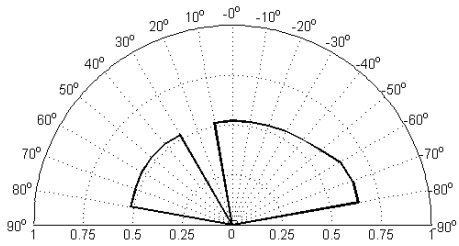
กราฟที่ 4-3 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มุมตัวอย่าง 0° มุมแหล่งแสง 0° ถึง 80°



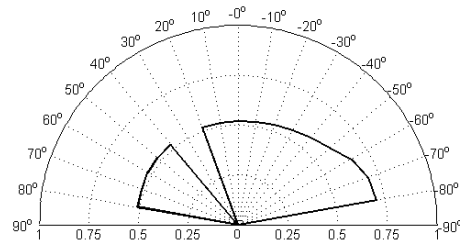
0 องศา



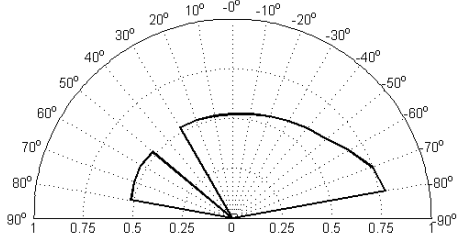
10 องศา



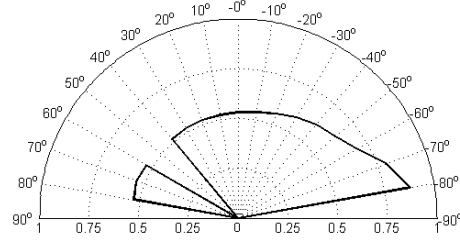
20 องศา



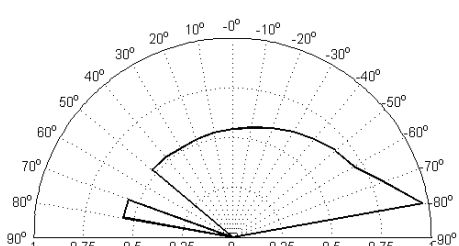
30 องศา



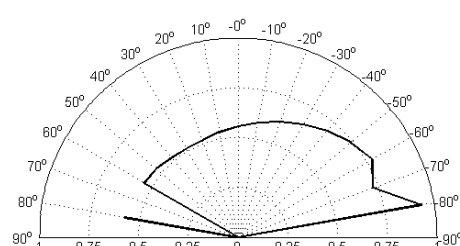
40 องศา



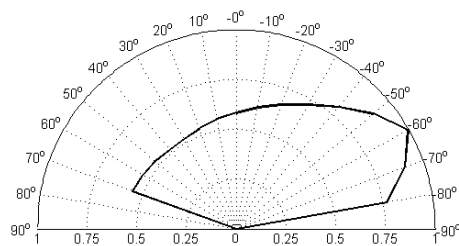
50 องศา



60 องศา



70 องศา



80 องศา

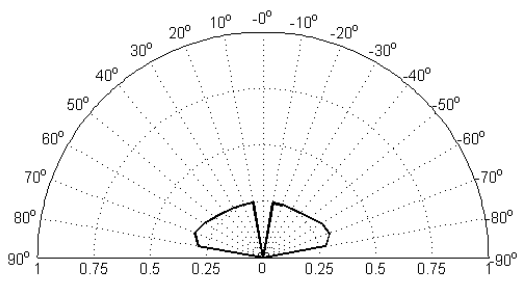
กราฟที่ 4-4 ค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มุมตัวอย่าง 0° มุมแหล่งแสง 0° ถึง 80°

แสงแบบออฟสเปคูลาร์ที่มุมกล้อง -50 ถึง -70 องศาชัดเจนมากขึ้นเมื่อมุมแหล่งแสงอยู่ที่ -80 องศา การสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เกิดการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับขึ้นเช่นเดียวกับผ้าไหมตัวอย่างที่ 1

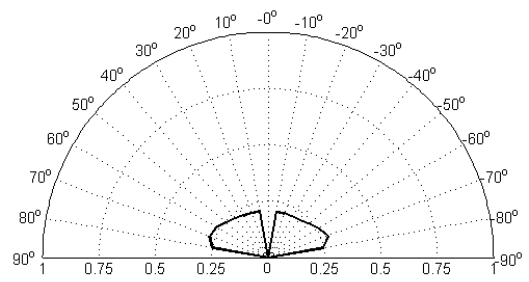
ในกราฟที่ 4-4 เช่นเดียวกับการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และ 2 ที่มุมแหล่งแสง 0 ถึง 10 องศาการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เป็นการสะท้อนแสงฟุ้งที่มีความใกล้เคียงกับการสะท้อนแสงฟุ้งอุดมคติมากที่สุด มุมแหล่งแสงที่ 20 ถึง 50 องศา มีค่าสูงสุดของค่าบีอาร์ดีเอฟเกิดขึ้นที่มุมกล้อง -70 ถึง -80 องศา และเลื่อนมาอยู่ที่มุมกล้อง -80 องศาเมื่อมุมแหล่งแสงอยู่ที่ 60 องศา รวมทั้งการสะท้อนแสงที่มุมแหล่งแสง 70 และ 80 องศา ซึ่งเป็นลักษณะการสะท้อนแสงที่คล้ายกับการสะท้อนแสงในผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เช่นกัน การสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีลักษณะการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับที่ไม่โดดเด่น เนื่องจากการสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีการสะท้อนแสงฟุ้งมากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และ ตัวอย่างที่ 2 ทำให้ลักษณะการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับถูกรวมเป็นส่วนหนึ่งของการสะท้อนแสงฟุ้ง

4.1.2 ลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมเมื่อเปลี่ยนมุมตัวอย่าง

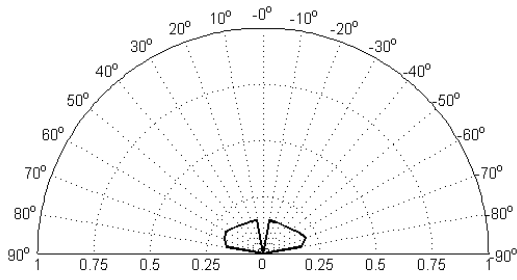
ในกราฟที่ 4-5, 4-6 และ 4-7 พิจารณาการสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่างที่มุมแหล่งแสง 0 องศา เมื่อเปลี่ยนมุมตัวอย่างพบว่าแนวโน้มการสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่างมีความคล้ายคลึงกัน นั่นคือเมื่อมุมตัวอย่างเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 60 องศา ค่าบีอาร์ดีเอฟที่วัดได้ในทุกมุมกล้องมีค่าลดลง โดยมีการลดลงของค่าบีอาร์ดีเอฟที่มุมกล้อง 0 +/- 40 องศาจะน้อยกว่ามุมกล้องอื่น (-50 ถึง -80 และ 50 ถึง 80) จึงทำให้ลักษณะรูปร่างของกราฟเชิงซ้ำมีการเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมุมตัวอย่างเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 60 องศา



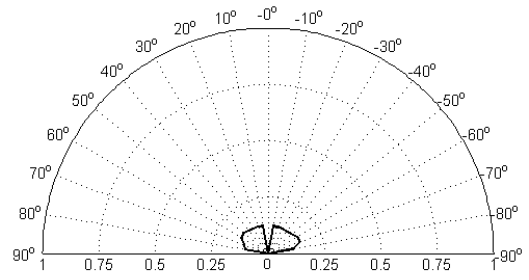
0 องศา



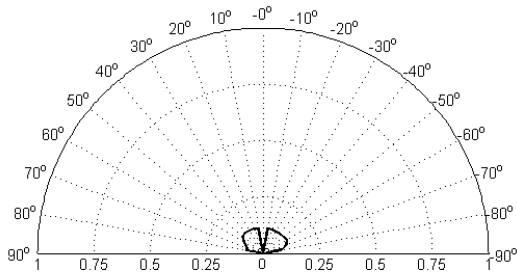
10 องศา



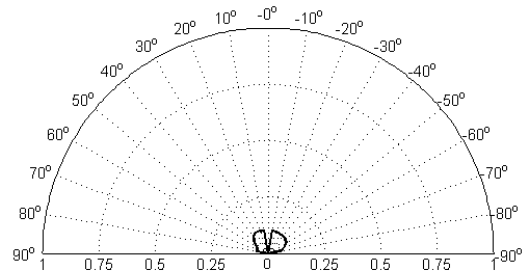
20 องศา



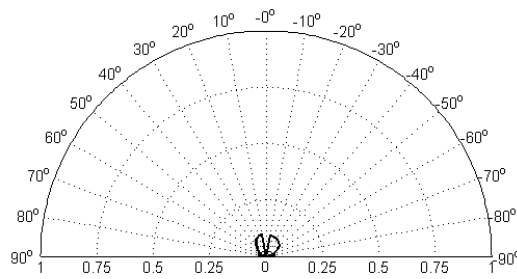
30 องศา



40 องศา

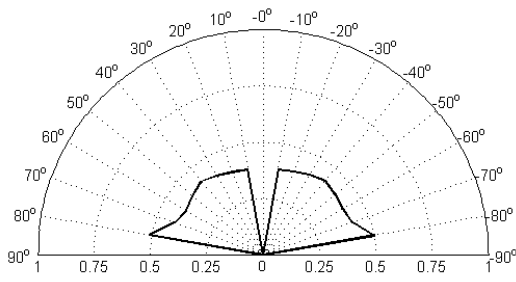


50 องศา

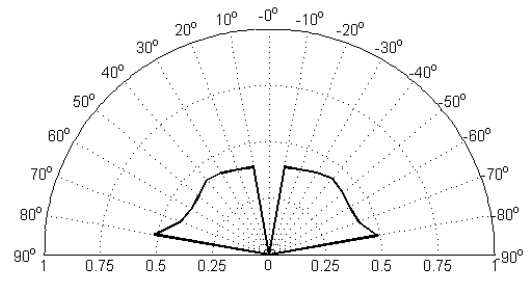


60 องศา

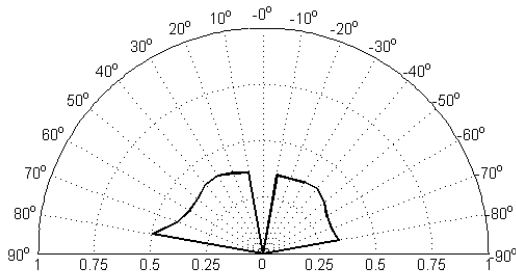
กราฟที่ 4-5 ค่าบีอาร์ดีเอพของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มุมแหล่งแสง 0° มุมตัวอย่าง 0° ถึง 60°



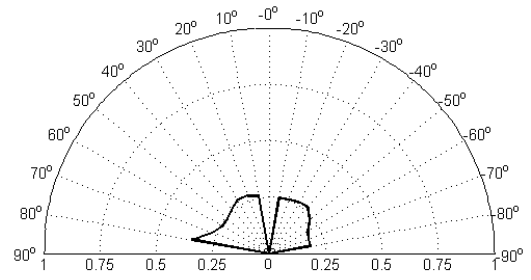
0 องศา



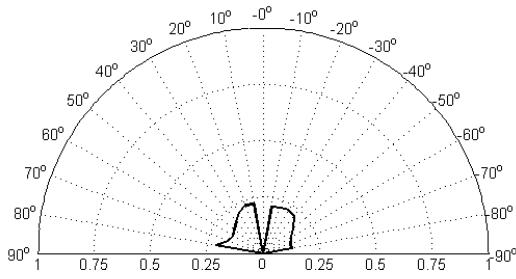
10 องศา



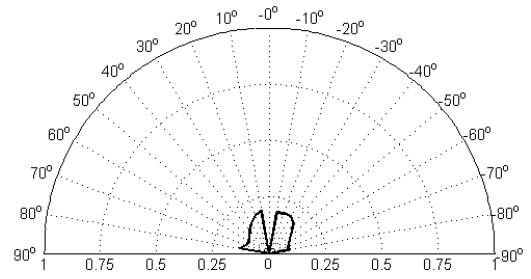
20 องศา



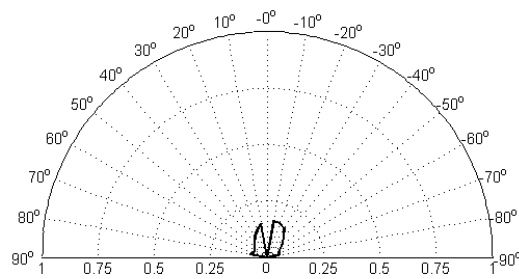
30 องศา



40 องศา

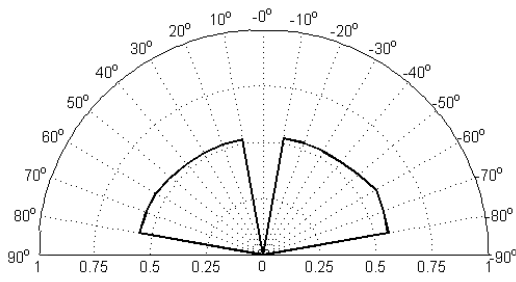


50 องศา

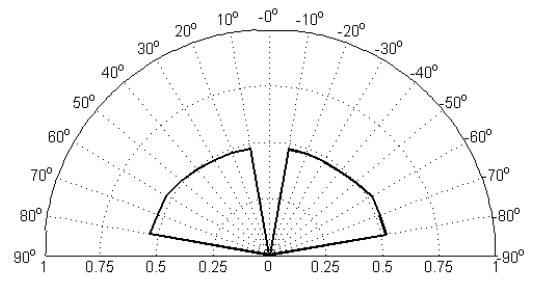


60 องศา

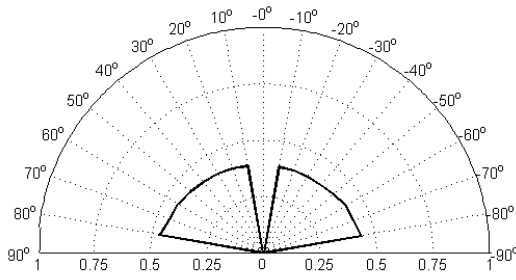
กราฟที่ 4-6 ค่าบีอาร์ดีเอพของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มุมแหล่งแสง 0° มุมตัวอย่าง 0° ถึง 60°



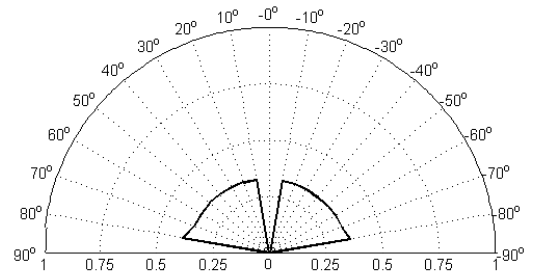
0 องศา



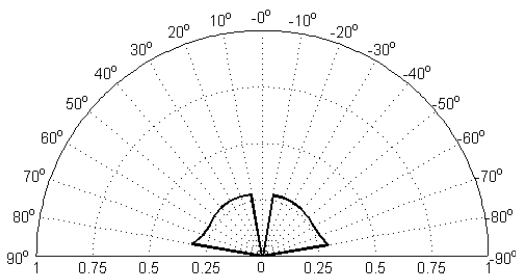
10 องศา



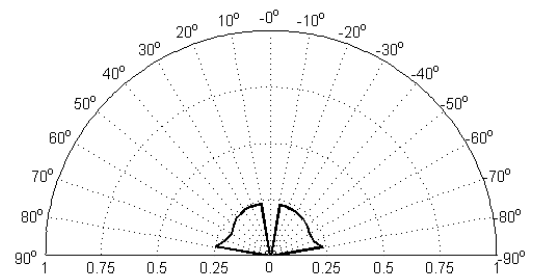
20 องศา



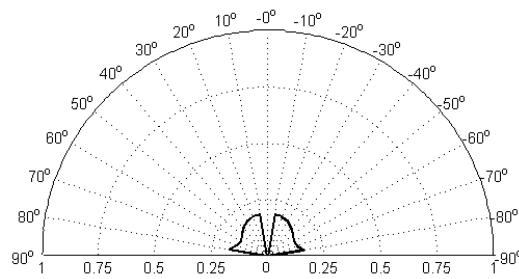
30 องศา



40 องศา



50 องศา



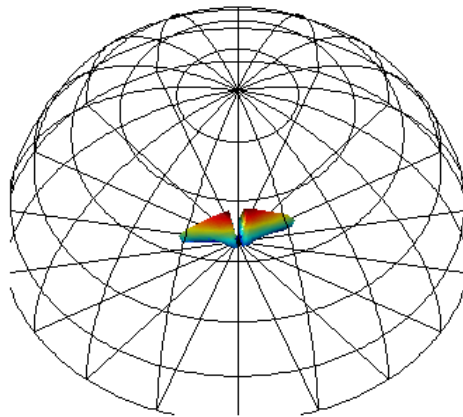
60 องศา

กราฟที่ 4-7 ค่าบีอาร์ดีเอพของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มุมแหล่งแสง 0° มุมตัวอย่าง 0° ถึง 60°

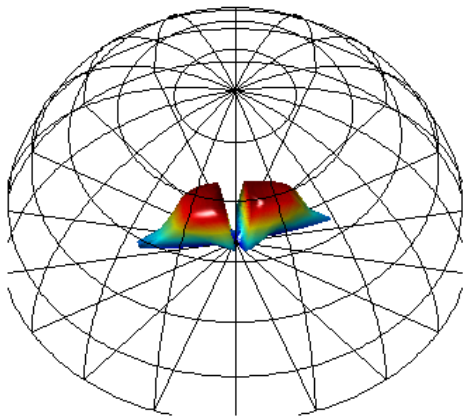
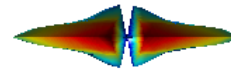
4.1.3 ลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมในรูปแบบกราฟพื้นผิวสามมิติ

เนื่องจากความสมมาตรของการทอลายซัตรีกรรมตาของผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง ในขั้นตอนการวัดค่าบีอาร์ดีเอฟจึงได้ทำการลดทอนจำนวนการวัดลงจากที่ควรจะเป็นเพื่อเป็นการประหยัดเวลาในการวัดค่าบีอาร์ดีเอฟผ้าไหมแต่ละตัวอย่าง ดังนั้นในการสร้างกราฟพื้นผิวสามมิติจึงจำเป็นต้องทำการจำลองข้อมูลค่าบีอาร์ดีเอฟในมุมตัวอย่างที่ -10 ถึง -60 องศาด้วยข้อมูลค่าบีอาร์ดีเอฟที่มีอยู่เพื่อให้ได้กราฟพื้นผิวสามมิติที่สมบูรณ์

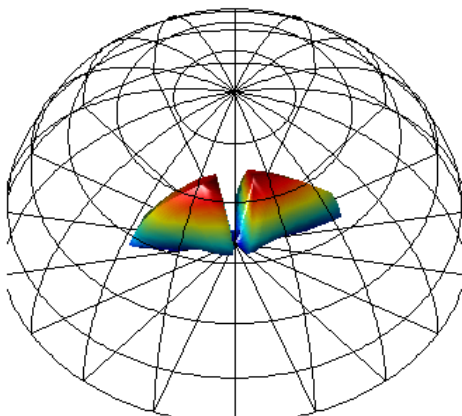
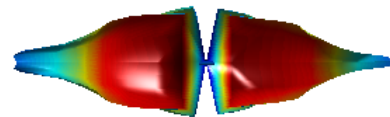
เมื่อนำค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมที่มุมแหล่งแสง 0 องศาจากทุกมุมตัวอย่างมาสร้างเป็นกราฟพื้นผิวสามมิติได้กราฟตามกราฟที่ 4-8 และ 4-9 สังเกตได้ว่าจะมีบางมุมที่กราฟพื้นผิวสามมิติขาดหายไป ซึ่งเป็นส่วนที่มุมแหล่งแสงซ้อนทับกับมุมกล้อง จึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าบีอาร์ดีเอฟในช่วงดังกล่าวได้ เมื่อมองจากมุมด้านบนจะเห็นว่ากราฟพื้นผิวสามมิติที่ได้ทั้ง 3 กราฟมีรูปร่างยาวเรียว คือมีความกว้างตามแนวแกน y น้อยกว่าความยาวตามแนวแกน x เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนความกว้างต่อความยาวของกราฟจะพบว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 จะมีสัดส่วนดังกล่าวมากที่สุด รองลงมาคือผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ตามลำดับ นั่นหมายความว่าการกระจายตัวของการสะท้อนแสงเกิดขึ้นตามแนวไหมเส้นยืน (แกน y) น้อยกว่าตามแนวไหม เส้นพุ่ง (แกน x) ขนาดของกราฟพื้นผิวสามมิติโดยรวมมีความแตกต่างกันเนื่องมาจากค่าบีอาร์ดีเอฟที่ใช้ในการสร้างกราฟเป็นค่าที่ทำการนอร์มอลไลเซชันด้วยค่าบีอาร์ดีเอฟสูงสุดของแต่ละตัวอย่าง ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละตัวอย่าง และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลจากสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิวของผ้าไหมแต่ละตัวอย่าง



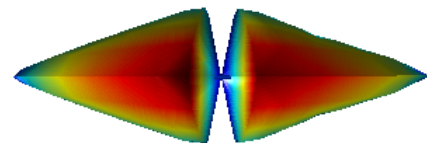
ตัวอย่างที่ 1



ตัวอย่างที่ 2

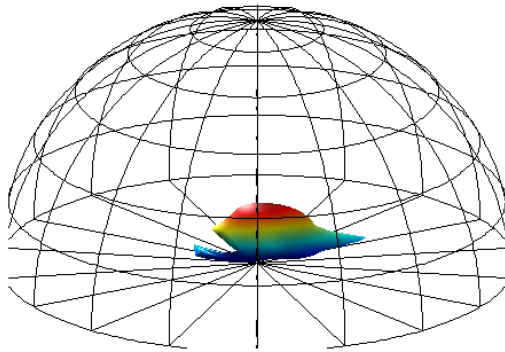


ตัวอย่างที่ 3

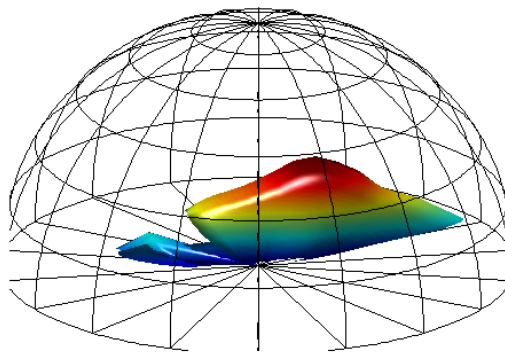
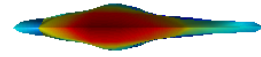


กราฟที่ 4-8 กราฟพื้นผิวสามมิติของค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3

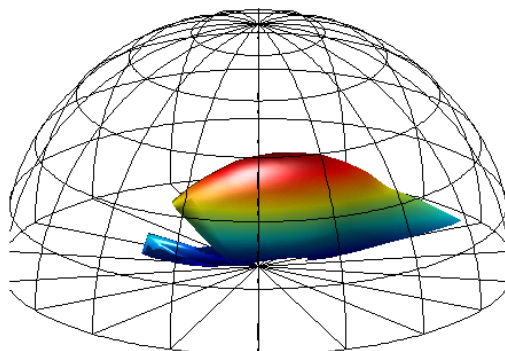
มุมแหล่งแสง 0°



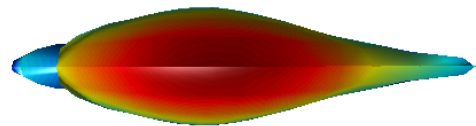
ตัวอย่างที่ 1



ตัวอย่างที่ 2



ตัวอย่างที่ 3

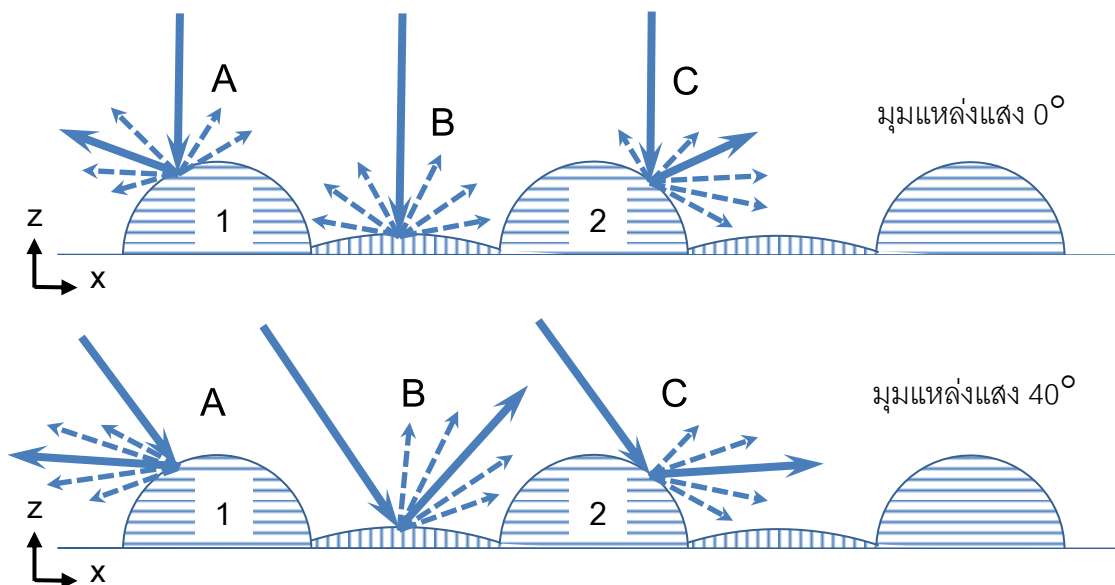


กราฟที่ 4-9 กราฟพื้นผิวสามมิติของค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3

มุมแหล่งแสง 60°

4.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการสะท้อนแสงกับโครงสร้างของผ้าไหม

การสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 จากกราฟที่ 4-2, 4-3 และ 4-4 จะเห็นว่า การสะท้อนแสงของผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่างเป็นการสะท้อนแสงแบบผสม โดยมีลักษณะการสะท้อนแสงที่มีความพิเศษคือ การสะท้อนแสงกล้าแบบออสเปคคูลาร์และการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับ ซึ่งลักษณะการสะท้อนทั้งหมดที่กล่าวมา มีความสัมพันธ์ลักษณะการทอและลักษณะของเส้นไหม ในภาพที่ 4-1 เมื่อพิจารณาโครงสร้างของผ้าไหมตามแนวไหมเส้นยืน (แกน x) จะเห็นว่าบริเวณที่แสงตกกระทบบนเส้นไหมแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ บริเวณด้านหน้าของส่วนโค้งของไหมเส้นยืน (A) บริเวณไหมเส้นพุ่งที่ไม่ถูกบังโดยไหมเส้นยืน (B) และบริเวณด้านหลังของส่วนโค้งของไหมเส้นยืน (C) ที่มุมแหล่งแสง 0° องศาแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวของผ้าไหมจะตกกระทบทั้ง 3 บริเวณโดยไม่เกิดเงาหรือการบังบนพื้นผิว จึงทำให้แสงเกิดการสะท้อนออกไปในทุกทิศทาง แสงสะท้อนที่ได้จึงมีลักษณะเป็นการสะท้อนแสงพุ่ง เมื่อมุมแหล่งแสงเพิ่มขึ้น แสงที่ตกกระทบพื้นผิวผ้าไหมบริเวณ C มีปริมาณลดลง มีลักษณะของการสะท้อนแสงกล้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากผ้าไหมมีลวดลายที่เกิดจากลักษณะการทอ จึงทำให้เส้นปกติของพื้นผิวบนผ้าไหมแต่ละจุดมีความ

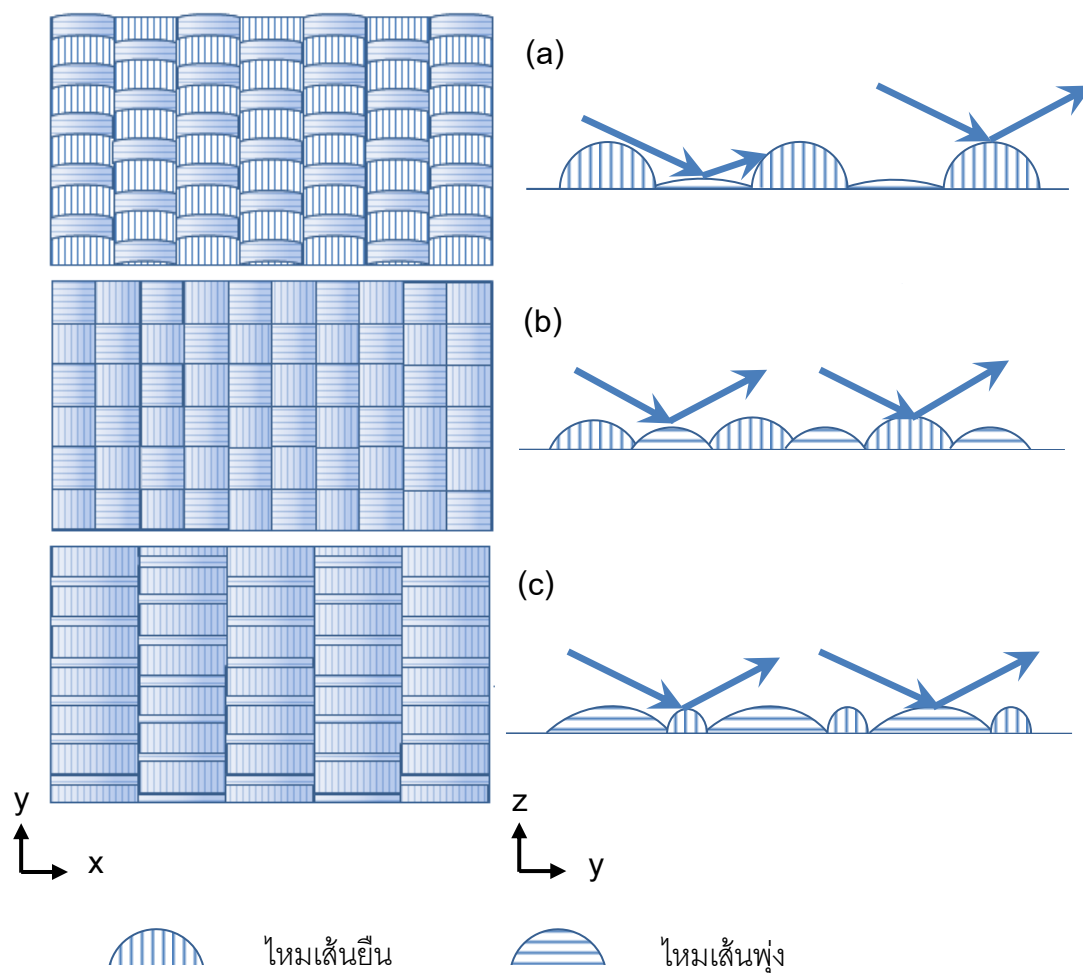


ภาพที่ 4-1 ภาพจำลองการสะท้อนแสงบนไหมเส้นยืนและไหมเส้นพุ่งในบริเวณต่างๆ

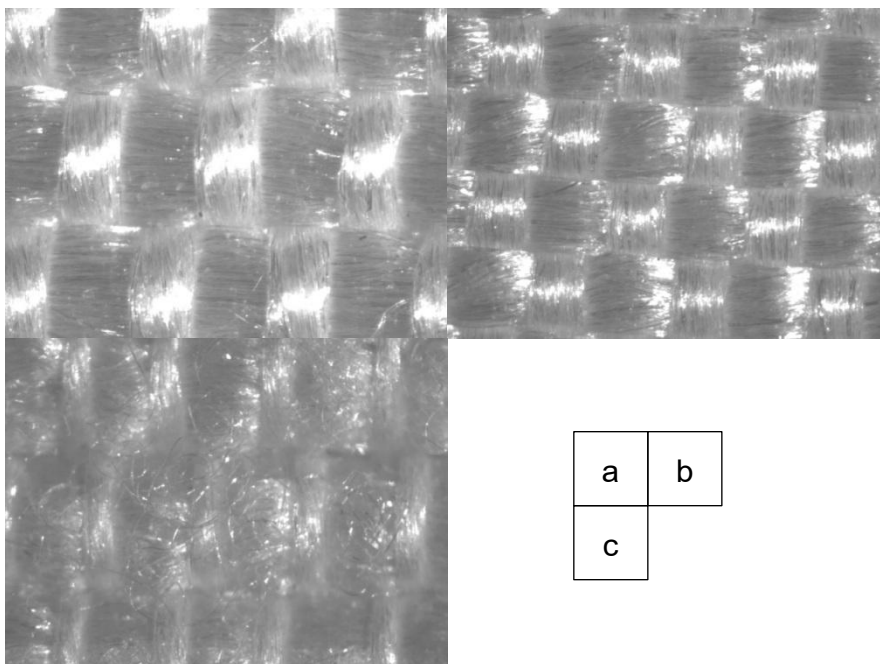
ที่มุมแหล่งแสง 0° และ 40°

แตกต่างกัน รวมทั้งการหักเหของแสงที่เกิดขึ้นในเส้นใยใหม่ [14] เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ลักษณะการสะท้อนแสงกล้าที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามกฎการสะท้อนแสง เกิดเป็นการสะท้อนแสงกล้าแบบออปสเปคูลาร์ เมื่อมุมแหล่งแสงเข้าใกล้ 90 องศามากขึ้น ปฏิกิริยาการบังและการเกิดเงาก็จะเกิดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวผ้าไหมที่บริเวณ B จะถูกบังโดยส่วนโค้งของเส้นไหม 1 และแสงที่สะท้อนออกจากพื้นผิวผ้าไหมบริเวณ B จะถูกบังโดยส่วนโค้งของเส้นไหม 2 ด้วยเช่นกัน ที่มุมแหล่งแสงใกล้เคียงกับมุม 90 องศา (grazing angle) ยังเกิดการสะท้อนแสงที่เป็นลักษณะพิเศษอีกแบบหนึ่งคือการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับ ซึ่งเกิดจากแสงที่ตกกระทบพื้นผิวผ้าไหมบริเวณ A แล้วเกิดการสะท้อนแสงย้อนกลับไปในทิศทางที่ใกล้เคียงกับมุมของแสงตกกระทบ

ในภาพที่ 4-2 เมื่อพิจารณาโครงสร้างของผ้าไหมตามแนวไหมเส้นพุ่ง (แกน y) โดยเปรียบเทียบความสูงส่วนโค้งของไหมเส้นพุ่งกับไหมเส้นยืนบนพื้นผิวของผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่างในการทอแบบลายขิดธรรมดาจะเห็นว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีความแตกต่างของความสูงของเส้นไหมทั้งสองแนวมากที่สุด ส่วนผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ 3 ความสูงของเส้นไหมทั้งสองแนวจะแตกต่างกันไม่มาก จึงทำให้พื้นผิวของผ้าไหมทั้ง 2 ตัวอย่างที่ลักษณะใกล้เคียงกับพื้นผิวหยาบ (rough surface) มากกว่าพื้นผิวของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ด้วยลักษณะพื้นผิวของผ้าไหมที่ประกอบด้วยไหมเส้นพุ่งและไหมเส้นยืน หากมีความแตกต่างของความสูงของเส้นไหมทั้งสองแนวมากขึ้นส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การบังและการเกิดเงามากขึ้นตามไปด้วย ดังเช่นในภาพที่ 4-3 ที่เป็นภาพถ่ายขยายของผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่มุมแหล่งแสงเดียวกัน จะพบว่าในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีความแตกต่างของความสูงของเส้นไหมมากจะเกิดการสะท้อนแสงกล้าขึ้นเฉพาะบริเวณส่วนโค้งของไหมเส้นยืน แต่ไม่เกิดการสะท้อนแสงกล้าขึ้นบนไหมเส้นพุ่งเนื่องจากบริเวณดังกล่าวถูกบังโดยส่วนโค้งของไหมเส้นยืน สำหรับผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ 3 ที่มีความแตกต่างของความสูงของเส้นไหมไม่มาก การสะท้อนแสงกล้าจึงเกิดขึ้นได้ทั้งบริเวณส่วนโค้งของไหมเส้นยืนและไหมเส้นพุ่ง



ภาพที่ 4-2 (a), (b), (c) ภาพจำลองลักษณะพื้นผิวและลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหม ตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-3 (a), (b), (c) ภาพถ่ายขยายของผ้าไหมตัวอย่าง 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ปรากฏการณ์การบังและการเกิดเงาส่งผลให้การกระจายการสะท้อนแสงในแนวไหมเส้นพุ่ง (แกน y) และแนวไหมเส้นยืน (แกน x) มีความแตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้จากกราฟพื้นผิวสามมิติที่แสดงการสะท้อนแสงของผ้าไหมจะมีความยาวของกราฟตามแนวแกน x มากกว่าความกว้างตามแนวแกน y สัดส่วนความยาวต่อความกว้างของกราฟจะสัมพันธ์ระดับการเกิดปรากฏการณ์การบังและการเกิดเงา นั่นคือถ้าสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของกราฟมีค่ามากกว่าหนึ่งมากแสดงว่าเกิดปรากฏการณ์การบังและการเกิดเงาในแนวไหมเส้นพุ่งมาก ในทางตรงกันข้ามหากสัดส่วนนี้มีค่ามากกว่าหนึ่งเล็กน้อยแสดงว่าปรากฏการณ์การบังและการเกิดเงาในแนวไหมเส้นพุ่งเกิดขึ้นน้อย เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวสามมิติในภาพที่ 4-8 และ 4-9 จะเห็นว่ากราฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างมากที่สุด รองลงมาคือผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ ผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มีโอกาสเกิดปรากฏการณ์การบังและการเกิดเงาในแนวไหมเส้นพุ่งมากที่สุด ผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีโอกาสการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวรองลงมา

ในกราฟที่ 4-4 จะพบว่า การสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีลักษณะใกล้เคียงกับการสะท้อนแสงฟุ้งมากกว่าผ้าไหมอีก 2 ตัวอย่างแรก นอกจากเหตุผลเรื่องของลักษณะการทอแล้ว ลักษณะความไม่เป็นระเบียบของเส้นใยไหมที่เป็นส่วนประกอบของไหมเส้นพุ่งและไหมเส้นยืนในผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ทำให้เกิดการกระเจิงของแสงที่มากกระทบลงบนพื้นผิวมากขึ้น แสงสะท้อนที่ได้จึงมีการกระจายตัวมากขึ้นในทุกทิศทาง ด้วยลักษณะการกระเจิงแสงดังกล่าวจึงส่งผลให้การสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีสัดส่วนลักษณะการสะท้อนแสงฟุ้งมากกว่าผ้าไหม 2 ตัวอย่างแรก

4.2 เปรียบเทียบแบบจำลองความสะท้อนแสง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งจะให้ค่าความผิดพลาดของการเปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณด้วยแต่ละชุดพารามิเตอร์ของแบบจำลองนั้นกับค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัด ค่าความผิดพลาดดังกล่าวคำนวณโดยใช้สมการที่ 3-1 จากนั้นจึงนำมาหาค่าความผิดพลาดที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อเป็นการระบุว่าพารามิเตอร์ชุดใดที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในแต่ละแบบจำลอง รวมทั้งค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของแต่ละแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาว่าแบบจำลองใดเหมาะสมกับลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมมากที่สุด

ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของแต่ละแบบจำลองในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองแต่ละแบบในการทำนายค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมที่ได้จากการวัด หากค่าความผิดพลาดมีค่านั้นหมายถึงมีความแตกต่างกันมากระหว่างค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณโดยแบบจำลองกับค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดแบบจำลองนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ทำนายค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหม ในทางตรงกันข้ามหากค่าความผิดพลาดมีค่าน้อย แบบจำลองนั้นจะมีความเหมาะสมมากกว่าที่จะใช้ทำนายค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหม

ในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 พบว่าแบบจำลองของวาร์ดจะให้ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.0880 ซึ่งค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ในขณะที่ค่าความ

ผิดพลาดของแบบจำลองของวาร์ด-คูเออร์ที่มีการปรับปรุงในส่วนของกรณีมอดไลเซชันจากแบบจำลองของวาร์ดกลับมีค่าความผิดพลาดสูงถึง 1.9073 หรือสูงกว่าถึงประมาณ 22 เท่า ในแบบจำลองของคุก-ทอร์เรนซ์ซึ่งถือว่าเป็นแบบจำลองที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีทางฟิสิกส์และเหมาะสำหรับการสะท้อนแสงของพื้นผิวหยาบ แต่กลับให้ค่าความผิดพลาดมากถึง 3.3651 หรือมากกว่าถึงประมาณ 38 เท่า ส่วนในแบบจำลองของฟอง บลินน์-ฟอง และออเรน-นayar มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.3770, 0.3729 และ 0.3154 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองทั้งสามให้ค่าความผิดพลาดใกล้เคียงกัน

ในผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 แบบจำลองของวาร์ดยังคงเป็นแบบจำลองที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 0.1750 รองลงมาคือแบบจำลองของฟอง วาร์ด-คูเออร์ บลินน์-ฟอง และออเรน-นayar ตามลำดับ โดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.2294 ถึง 0.3358 และแบบจำลองที่มีค่าความผิดพลาดมากที่สุดยังคงเป็นแบบจำลองของคุก-ทอร์เรนซ์มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.6590 เมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดของแต่ละแบบจำลองในผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และมีค่าเฉลี่ยที่ลดลง ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของทุกแบบจำลองในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 อยู่ที่ 1.0709 และลดลงเหลือ 0.3274 ในผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 นั้นหมายความว่าความสามารถของแบบจำลองแต่ละแบบในการทำนายค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 มีระดับความสามารถใกล้เคียงกันมากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ลดลงจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เป็นสิ่งที่บ่งบอกว่าโดยภาพรวมแล้วแบบจำลองแต่ละแบบสามารถทำนายค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ได้ดีกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1

ในผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ค่าความผิดพลาดที่ได้ยังคงมีแนวโน้มเหมือนกับผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และ 2 แบบจำลองที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคือแบบจำลองของวาร์ด มีค่าความผิดพลาด 0.1318 แบบจำลองของวาร์ด-คูเออร์มีค่ารองลงมาอยู่ที่ 0.1546 และแบบจำลองของฟองแบบจำลองของบลินน์-ฟอง แบบจำลองของออเรน-นayar มีค่าความผิดพลาด 0.1657, 0.2038 และ 0.2400 ตามลำดับ สุดท้ายแบบจำลองที่มีค่าความผิดพลาดมากที่สุดคือแบบจำลองของคุก-ทอร์เรนซ์ มีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.3881 ค่าความผิดพลาดของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีความ

ใกล้เคียงกันมากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และ 2 รวมทั้งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยยังมีค่าน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 และ 2 นั่นคือมีค่าเท่ากับ 0.2140

ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาภาพถ่ายขยายของตัวอย่างผ้าไหมในภาพที่ 4-3 จะเห็นว่าการสะท้อนแสงกล้าในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เกิดขึ้นบนเฉพาะไหมเส้นยืน แตกต่างจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ 3 ที่การสะท้อนแสงกล้าเกิดขึ้นทั้งไหมเส้นยืนและไหมเส้นพุ่ง จึงมีลักษณะการสะท้อนแสงใกล้เคียงกับพื้นผิวหยาบมากกว่า ทำให้แบบจำลองทั่วไปสามารถทำนายค่าบีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ 3 ได้ใกล้เคียงมากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีลักษณะการสะท้อนแสงกล้าและการสะท้อนแสงกล้าแบบออฟสเปคคูลาร์ที่ชัดเจนกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ 3 จึงส่งผลให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 สูงกว่าผ้าไหมตัวอย่างอื่นมาก

ตารางที่ 4-1 ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดของแต่ละแบบจำลองในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3

แบบจำลอง	ค่าความผิดพลาด		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
ฟอง	0.3770	0.2294	0.1657
บลินน์-ฟอง	0.3729	0.3004	0.2038
วาร์ด	0.0880	0.1750	0.1318
วาร์ด-คูเออร์	1.9073	0.2646	0.1546
คุก-ทอร์เรนซ์	3.3651	0.6590	0.3881
ออเรน-นayar	0.3154	0.3358	0.2400

4.3 การปรับปรุงแบบจำลองของวาร์ด

จากการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด (E_{min}) ที่ได้ในตารางที่ 4-1 พบว่าแบบจำลองของวาร์ดให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของวาร์ดสามารถจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหมได้ใกล้เคียงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นที่มีอยู่ จึงได้ใช้แบบจำลองของวาร์ดเป็นต้นแบบและปรับปรุงให้อธิบายลักษณะการสะท้อนแสงของผ้าไหมได้เสมือนจริงยิ่งขึ้น โดยแบบจำลองจะประกอบด้วยส่วนของการสะท้อนแสงกล้าและส่วนของการสะท้อนแสงฟูง (สมการที่ 4-1)

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = k_d + k_s \quad (4-1)$$

k_d เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงฟูง

k_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงกล้า

4.3.1 แบบจำลองลักษณะการสะท้อนแสงกล้า

แบบจำลองของวาร์ดเป็นแบบจำลองที่สามารถเข้ากับข้อมูลการสะท้อนแสงที่ได้จากการวัดได้เป็นอย่างดี โดยอยู่ในรูปของสมการอย่างง่ายและใช้พารามิเตอร์ที่มีความหมายเชิงฟิสิกส์ แบบจำลองนี้ในส่วนที่อธิบายลักษณะการสะท้อนแสงกล้ามี 2 รูปแบบ คือ แบบไอโซทรอปิกใช้สำหรับอธิบายการสะท้อนแสงกล้าของพื้นผิวแบบไอโซทรอปิก (สมการที่ 2-21) และแบบแอนไอโซทรอปิกใช้สำหรับอธิบายการสะท้อนแสงกล้าของพื้นผิวแบบแอนไอโซทรอปิก (สมการที่ 2-22) สมการทั้งสองแบบมีพื้นฐานมาจากฟังก์ชันการกระจายตัวเกาส์เซียน แต่แบบจำลองแบบแอนไอโซทรอปิกใช้ฟังก์ชันการกระจายตัวเกาส์เซียนแบบวงรี (elliptical gaussian distribution function) ซึ่งจะสัมพันธ์กับพารามิเตอร์การกระจายตัวของความชันของพื้นผิวระดับไมโครในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน (α_x, α_y) โดยค่าทั้งสองค่าเป็นอิสระต่อกันและกัน α_x และ α_y เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของพื้นผิวระดับไมโครในแนวแกน x และ y ตามลำดับ [30]

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองของวาร์ดแบบแอนไอโซทรอปิกมาใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น จากการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของแต่ละแบบจำลองในตารางที่ 4-1 แบบจำลองของวาร์ดให้ค่าความผิดพลาดของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 เท่ากับ 0.0880 ค่าความผิดพลาดของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 0.1750 และค่าความผิดพลาดของผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 เท่ากับ 0.1318 ซึ่งค่าความผิดพลาดทั้ง 3 ค่าเป็นค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดในผ้าไหมแต่ละตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของวาร์ดแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถเข้ากับข้อมูลการสะท้อนแสงของผ้าไหมที่วัดได้จากผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่างได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงได้เลือกแบบจำลองของวาร์ดแบบแอนไอโซทรอปิกส่วนที่อธิบายการสะท้อนแสงกล้ำมาใช้ในการอธิบายการสะท้อนแสงกล้ำของผ้าไหม (สมการที่ 4-2)

$$k_s = \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x\alpha_y\sqrt{(N \cdot L)(N \cdot V)}} \exp \left[-2 \frac{\left[\frac{H_x}{\alpha_x} \right]^2 + \left[\frac{H_y}{\alpha_y} \right]^2}{1 + (H \cdot N)} \right] \quad (4-2)$$

ρ_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงกล้ำ

N เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางเส้นปกติ

L เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของแหล่งแสง

V เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของตัวรับภาพ

H เป็นฮาร์ฟเวกเตอร์ ($H = L + V$)

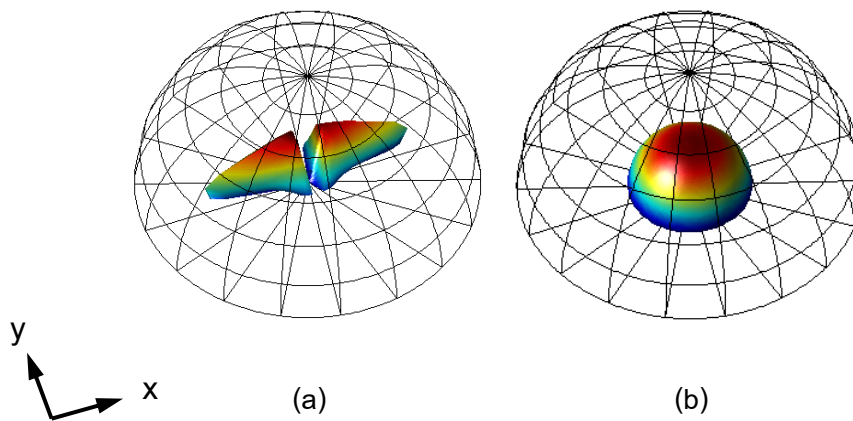
α_x, α_y เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของพื้นผิวระดับไมโคร

ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

4.3.2 แบบจำลองลักษณะการสะท้อนแสงฟุ้ง

ในส่วนที่อธิบายลักษณะการสะท้อนแสงฟุ้งของแบบจำลองของวาร์ดได้ใช้การสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเซียน (สมการที่ 4-3) ที่ให้การสะท้อนแสงในทุกทิศทางเท่ากันโดยปริมาณของแสงสะท้อนจะขึ้นอยู่กับมุมที่แสงตกกระทบกระทำกับเส้นปกติของพื้นผิว

$$k_d = \rho_d (N \cdot L) \quad (4-3)$$



กราฟที่ 4-10 (a) การสะท้อนแสงของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมแหล่งแสง 0°

(b) การสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเซียน (การสะท้อนแสงฟุ้งอุดมคติ)

แต่เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวสามมิติที่แสดงการสะท้อนแสงของตัวอย่างผ้าไหมเปรียบเทียบกับ การสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเซียนในกราฟที่ 4-10 แล้ว จะเห็นได้ว่าการสะท้อนแสงฟุ้งเกิดตามแนวแกน x (ไหมเส้นพุ่ง) มากกว่าเกิดขึ้นตามแนวแกน y (ไหมเส้นยืน) แตกต่างกันอย่างชัดเจนกับการสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเซียนที่ให้การสะท้อนแสงในทุกทิศทางเท่ากัน จากลักษณะการสะท้อนแสงดังกล่าวจึงได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองส่วนที่อธิบายการสะท้อนแสงฟุ้งโดยอาศัยแนวความคิดจากแบบจำลองของลาไฟร์ทูน [32] ที่มีพารามิเตอร์ควบคุมการสะท้อนแสงตามแนวแกน x , y และ z (สมการที่ 2-23) พารามิเตอร์ที่เพิ่มเข้าไปในแบบจำลองส่วนนี้คือ ค่า β_x , β_y และ β_z ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการควบคุมการกระจายตัวของ การสะท้อนแสงฟุ้งในแนวแกน x ,

y และ z ตามลำดับ เพื่อให้สามารถควบคุมปริมาณการสะท้อนแสงพุ่งในแต่ละทิศทางให้มีความแตกต่างกันได้ (สมการที่ 4-4)

$$k_d = \rho_d (N \cdot L) [(V_x \beta_x)^2 + (V_y \beta_y)^2 + (V_z \beta_z)^2] \quad (4-4)$$

ρ_d เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงพุ่ง

N เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางเส้นปกติ

L เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของแหล่งแสง

V_x, V_y, V_z เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของตัวรับภาพ

ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

$\beta_x, \beta_y, \beta_z$ เป็นพารามิเตอร์ควบคุมการกระจายตัวของแสงพุ่ง

ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

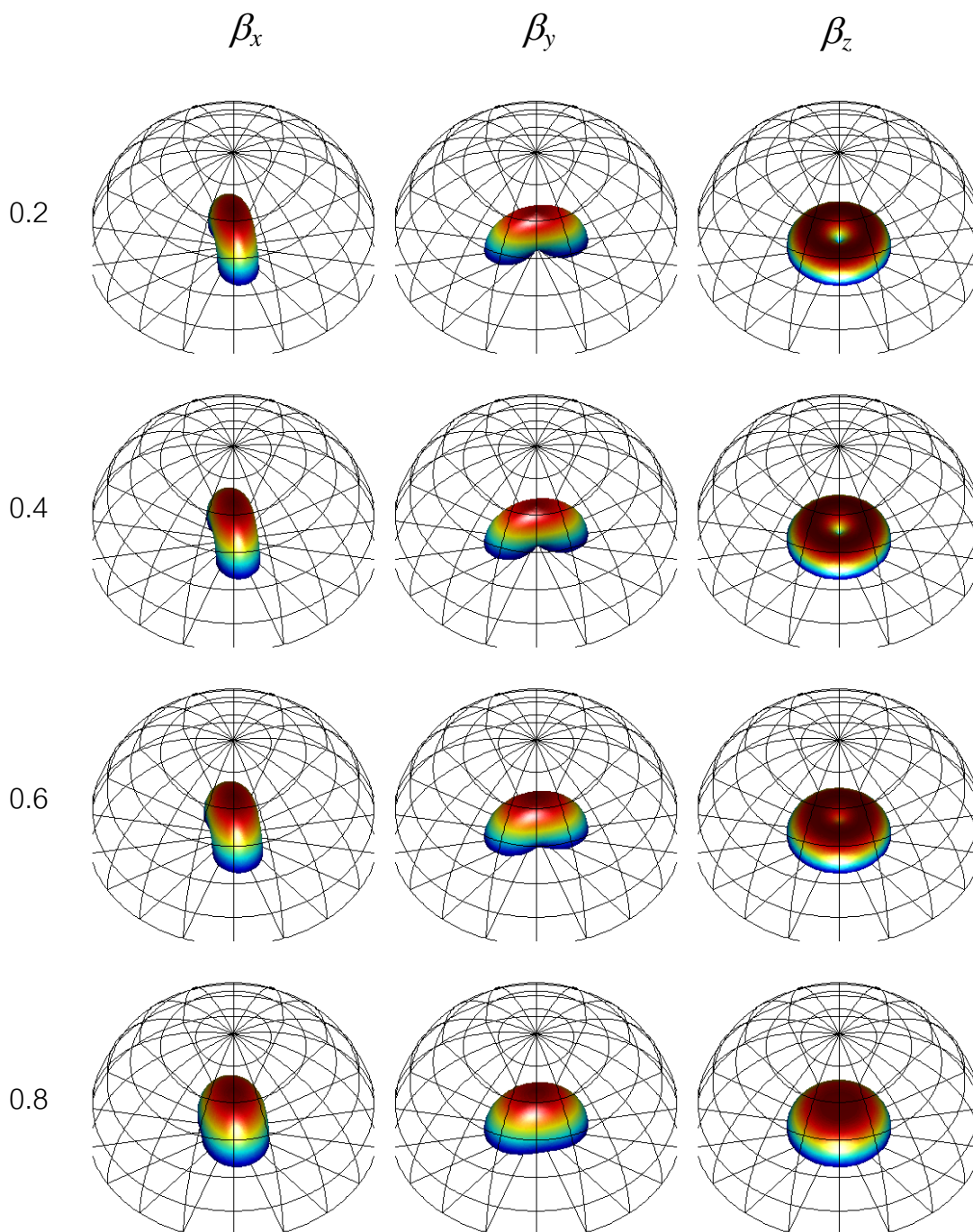
เมื่อได้แบบจำลองส่วนการสะท้อนแสงพุ่งและแบบจำลองส่วนของการสะท้อนแสงกล้าแล้ว จึงนำทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นแบบจำลองการสะท้อนแสงของผ้าใหม่ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ (สมการที่ 4-5)

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \rho_d (N \cdot L) [(V_x \beta_x)^2 + (V_y \beta_y)^2 + (V_z \beta_z)^2] \\ + \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x \alpha_y \sqrt{(N \cdot L)(N \cdot V)}} \exp \left[-2 \frac{\left[\frac{H_x}{\alpha_x} \right]^2 + \left[\frac{H_y}{\alpha_y} \right]^2}{1 + (H \cdot N)} \right] \quad (4-5)$$

ρ_d และ ρ_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงพุ่งและการสะท้อนแสงกล้ำ ตามลำดับ กำหนดให้ $\rho_s + \rho_d = 1$

α_x และ α_y เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของพื้นผิวระดับไมโครในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

β_x , β_y และ β_z เป็นพารามิเตอร์ควบคุมการกระจายตัวของแสงพุ่งในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ



กราฟที่ 4-11 ผลของค่าพารามิเตอร์ β_x , β_y และ β_z ในการควบคุมการกระจายตัวของ
การสะท้อนแสงพุ่ง

4.4 เปรียบเทียบแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองอื่น

หลังจากทำการปรับปรุงแบบจำลองของวาร์ดในส่วนของการสะท้อนแสงฟุ้ง โดยการเพิ่มพารามิเตอร์ในการควบคุมการกระจายการสะท้อนแสงฟุ้งในแต่ละทิศทาง ตารางที่ 4-2 แสดงค่าความผิดพลาดเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองทั่วไป พบว่าค่าความผิดพลาดของแบบจำลองที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองทั่วไปในทั้ง 3 ตัวอย่างของผ้าไหม โดยเฉพาะแบบจำลองของวาร์ดที่ใช้เป็นต้นแบบ ค่าความผิดพลาดของแบบจำลองที่นำเสนอลดลงจากแบบจำลองของวาร์ดคิดเป็น 7, 24 และ 30 เปอร์เซ็นต์ในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ การปรับปรุงแบบจำลองของวาร์ดในส่วนของการสะท้อนแสงฟุ้ง ทำให้การทำนายค่าปีอาร์ดีเอฟในส่วนการสะท้อนแสงฟุ้งมีประสิทธิภาพดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดในผ้าไหมแต่ละตัวอย่างลดลง โดยสัดส่วนการลดลงของค่าความผิดพลาดขึ้นกับสัดส่วนของลักษณะการสะท้อนแสงฟุ้งกับการสะท้อนแสงกล้ำในแต่ละตัวอย่าง หากตัวอย่างผ้าไหมมีสัดส่วนของลักษณะการสะท้อนแสงฟุ้งมากกว่าการสะท้อนแสงกล้ำ เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากกว่า ดังเช่นในผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 และ 3 ที่มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความผิดพลาดถึง 24 และ 30 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองทั่วไป

แบบจำลอง	ค่าความผิดพลาด		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
ฟอง	0.3770	0.2294	0.1657
บลินน์-ฟอง	0.3729	0.3004	0.2038
วาร์ด	0.0880	0.1750	0.1318
วาร์ด-คูเออร์	1.9073	0.2646	0.1546
คุก-ทอร์เรนซ์	3.3651	0.6590	0.3881
ออเรน-นaylor	0.3154	0.3358	0.2400
แบบจำลองที่ นำเสนอ	0.0813	0.1317	0.0918

ตารางที่ 4-3 ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

แบบจำลอง	ตัวอย่าง	ค่าพารามิเตอร์						ค่าความผิดพลาด
		p1	p2	p3	p4	p5	p6	
ฟอง	1	0.260	104					0.3770
	2	0.372	4					0.2294
	3	0.504	4					0.1657
บลินน์-ฟอง	1	0.259	419					0.3729
	2	0.393	15					0.3004
	3	0.455	10					0.2038
วาร์ด	1	0.115	0.999	0.477				0.0880
	2	0.346	0.995	0.326				0.1750
	3	0.455	0.893	0.297				0.1318
วาร์ด-คูเออร์	1	0.333	0.999	0.694				1.9073
	2	0.447	0.997	0.530				0.2646
	3	0.519	0.999	0.551				0.1546
คุก-ทอร์เรนซ์	1	0.665	0.930					3.3651
	2	0.754	0.826					0.6590
	3	0.791	0.801					0.3881
ออเรน-นายาร์	1	0.825	0.000					0.3154
	2	1.574	0.148					0.3358
	3	1.868	0.002					0.2400
แบบจำลองที่ นำเสนอ	1	0.147	1.276	0.362	0.911	1.148	0.936	0.0813
	2	0.038	1.244	0.344	3.060	3.060	2.873	0.1317
	3	0.025	1.162	0.377	4.172	3.965	4.200	0.0918

เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงหากนำแบบจำลองไปใช้งานจริง เนื่องจากถ้าหากแบบจำลองใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไปจะส่งผลให้ต้องใช้ทรัพยากรอื่นเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจึงอาจจะไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานจริง ตารางที่ 4-4 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละแบบจำลองในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งแสดงเป็นจำนวนเท่าของเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่น้อยที่สุด (แบบจำลองของ บลินน์-ฟองใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุดในผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 เท่ากับ 855 วินาที) แต่ละตัวอย่างในแบบจำลองเดียวกันจะใช้เวลาในการคำนวณไม่แตกต่างกันมากนัก แบบจำลองของฟองและแบบจำลองของบลินน์-ฟองเป็นสองแบบจำลองที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด ถัดมาคือแบบจำลองของออเรน-นายาร์ใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 1.4 เท่า แบบจำลองของวาร์ดและแบบจำลองของวาร์ด-คูเออร์ใช้เวลาคำนวณใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 2.2 เท่า ส่วนแบบจำลองที่นำเสนอใช้เวลาในการคำนวณประมาณ 3 เท่า และแบบจำลองของคุก-ทอร์เรนซ์เป็นแบบจำลองที่ใช้เวลาในการคำนวณมากที่สุดประมาณ 3.5 เท่า

ความซับซ้อนของสมการของแบบจำลองเป็นปัจจัยที่ทำให้แต่ละแบบจำลองใช้เวลาในการคำนวณแตกต่างกัน อย่างเช่นสมการของแบบจำลองของฟองที่ไม่มีความซับซ้อนจึงใช้เวลาในการคำนวณอยู่ในกลุ่มที่ใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนสมการของแบบจำลองของคุก-ทอร์เรนซ์ที่มีพื้นฐานทางฟิสิกส์และความซับซ้อนของสมการมาก จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณมากตามไปด้วย แบบจำลองที่นำเสนอใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าแบบจำลองของวาร์ดที่ใช้เป็นต้นฉบับ เนื่องจากในแบบจำลองที่นำเสนอได้เพิ่มพารามิเตอร์ β_x , β_y และ β_z เข้าไปในสมการส่วนของการสะท้อน แสงพุ่ง ทำให้สมการมีความซับซ้อนมากขึ้นกว่าแบบจำลองของวาร์ด ส่งผลให้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับแบบจำลองของวาร์ดและมีค่ามากเป็นอันดับที่ 2 รองจากแบบจำลองของคุก-ทอร์เรนซ์เมื่อเทียบกับแบบจำลองทั้งหมด ซึ่งถือเป็นจุดที่ต้องปรับปรุงในแบบจำลองที่นำเสนอ

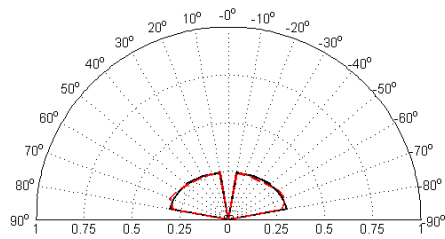
ตารางที่ 4-4 เวลาที่ใช้ในการคำนวณแสดงเป็นจำนวนเท่าของเวลาที่ใช้น้อยที่สุด

แบบจำลอง	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (เท่า)		
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
ฟอง	1.05	1.04	1.04
บลินน์-ฟอง	1.05	1.00	1.01
วาร์ด	2.16	2.18	2.16
วาร์ด-คูเออร์	2.17	2.17	2.17
คุก-ทอร์เรนซ์	3.43	3.38	3.46
ออเรน-นายาร์	1.41	1.41	1.45
แบบจำลองที่นำเสนอ	3.04	3.05	3.09

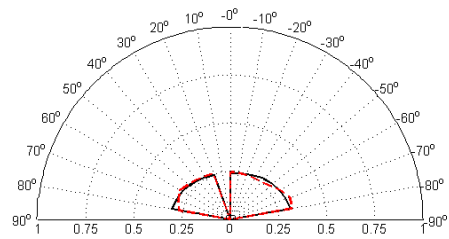
4.5 เปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอกับค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัด

เมื่อได้แบบจำลองที่นำเสนอแล้วจึงนำแบบจำลองดังกล่าวมาคำนวณหาค่าบีอาร์ดีเอฟเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัด ในการคำนวณค่าบีอาร์ดีเอฟจากแบบจำลองที่นำเสนอจะต้องทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลแต่ละชุดที่จะนำมาเปรียบเทียบกัน พารามิเตอร์ดังกล่าวหาได้จากการหาค่าที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม จากนั้นจึงเขียนเป็นกราฟเชิงขั้วเพื่อเปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณและค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัด ดังแสดงในกราฟที่ 4-12, 4-13 และ 4-14 เป็นกราฟเชิงขั้วของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 และ ตัวอย่างที่ 3 ตามลำดับ

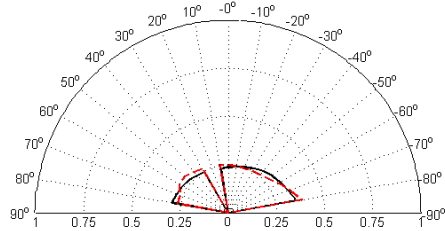
จากกราฟที่ 4-12 กราฟเชิงขั้วของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมแหล่งแสง 0 องศาและ 10 องศา พบว่าเส้นกราฟของค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณและเส้นกราฟของค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดซ้อนทับกันพอดี นั่นหมายความว่าค่าบีอาร์ดีเอฟทั้งสองชุดมีค่าไม่แตกต่างกัน ที่มุมแหล่งแสง 20 องศาถึง 60 องศา เป็นช่วงมุมแหล่งแสงที่มีลักษณะการสะท้อนแสงกล้าเพิ่มมากขึ้น จะพบว่าที่มุมกล้องใกล้เคียงกับมุมแหล่งแสงและที่มุมกล้อง 80 องศา ค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการ



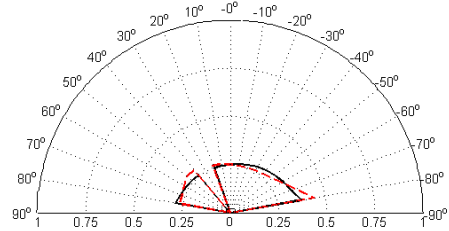
0 องศา



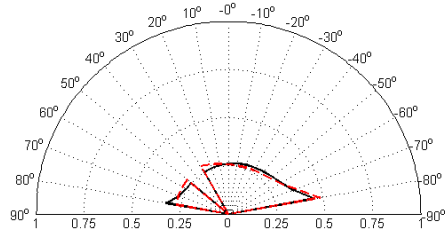
10 องศา



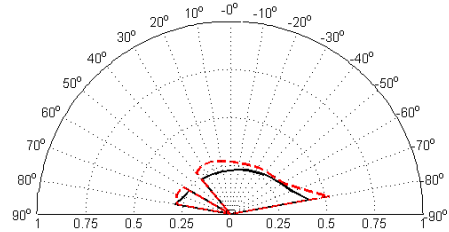
20 องศา



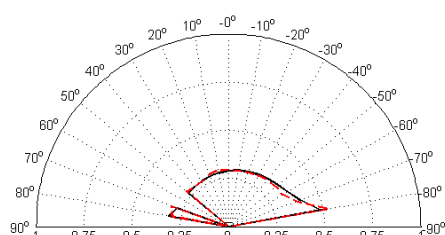
30 องศา



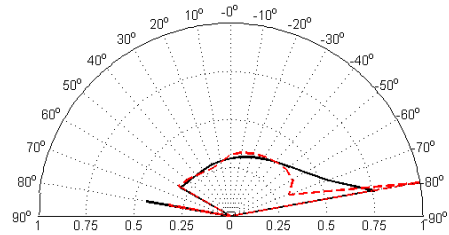
40 องศา



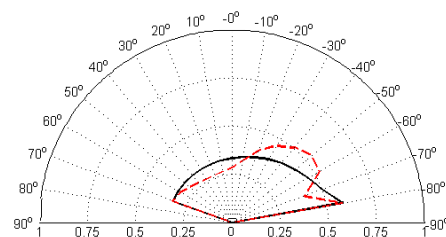
50 องศา



60 องศา

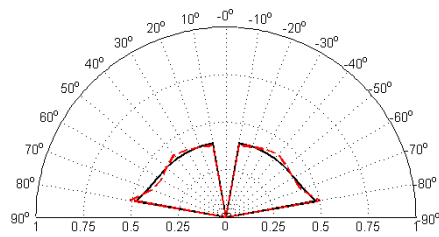


70 องศา

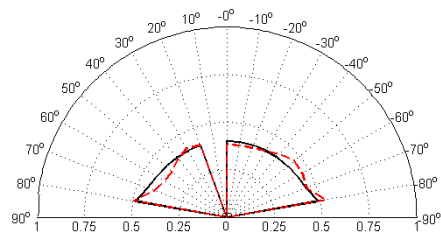


80 องศา

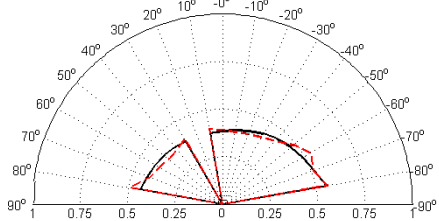
กราฟที่ 4-12 กราฟเชิงเชิงขั้วเปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณ (เส้นทึบ) และค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัด (เส้นประ) ในผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมตัวอย่าง 0°



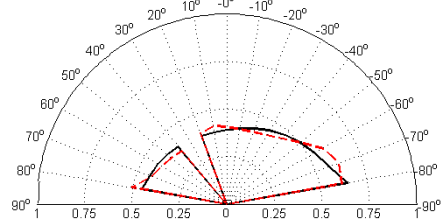
0 องศา



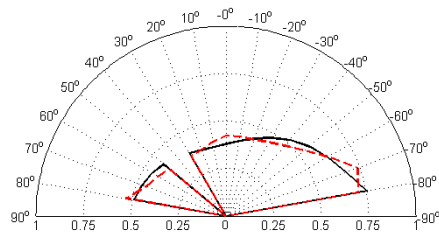
10 องศา



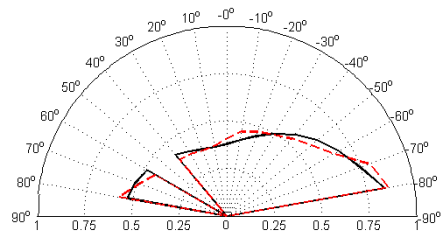
20 องศา



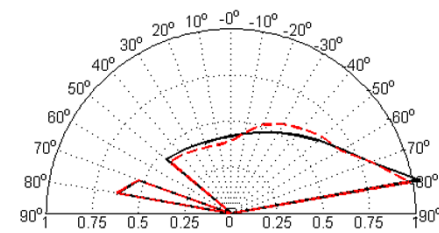
30 องศา



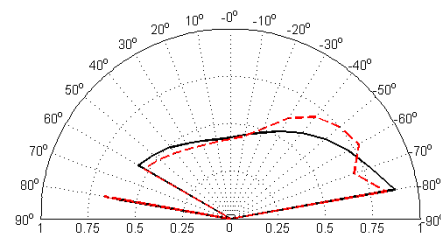
40 องศา



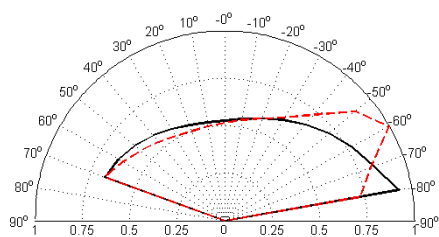
50 องศา



60 องศา

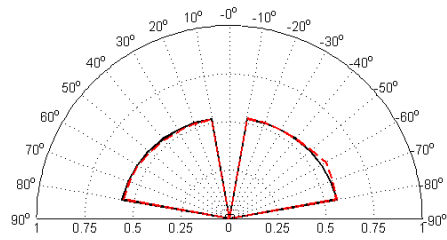


70 องศา

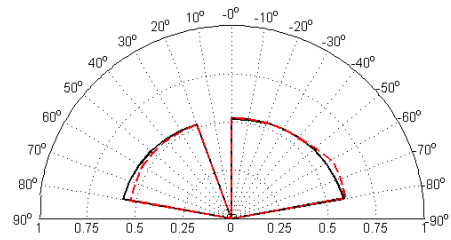


80 องศา

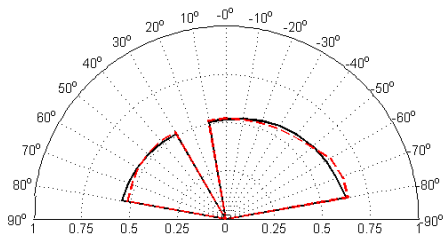
กราฟที่ 4-13 กราฟเชิงเชิงขั้วเปรียบเทียบค่าปีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณ (เส้นทึบ) และค่าปีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัด (เส้นประ) ในผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมตัวอย่าง 0°



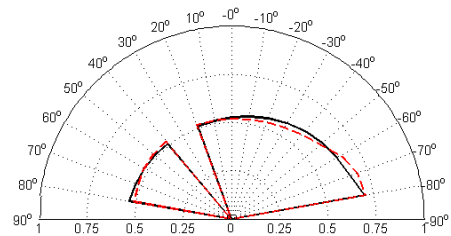
0 องศา



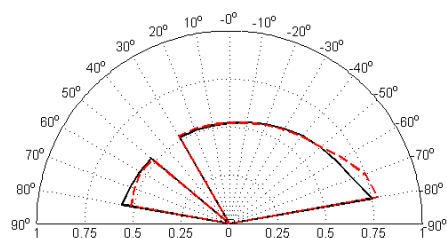
10 องศา



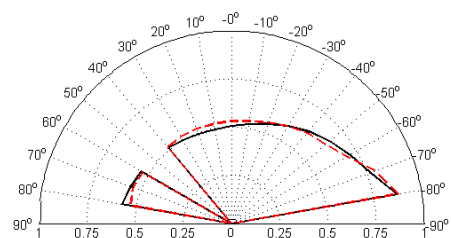
20 องศา



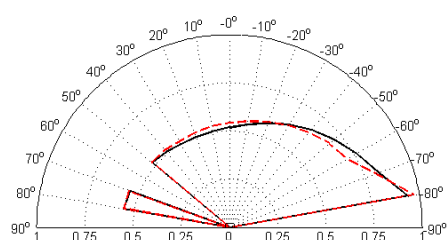
30 องศา



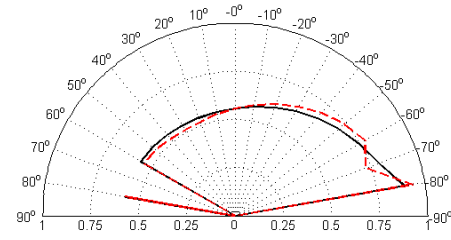
40 องศา



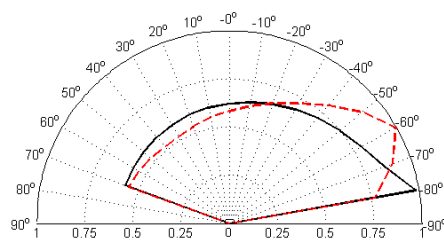
50 องศา



60 องศา



70 องศา



80 องศา

กราฟที่ 4-14 กราฟเชิงขั้วเปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณ (เส้นทึบ) และค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัด (เส้นประ) ในผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 ที่มุมตัวอย่าง 0°

คำนวณมีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากการวัดเล็กน้อย ที่มุมแหล่งแสง 70 องศา มีค่าสูงสุดของการสะท้อนแสงกล้าอย่างชัดเจนที่มุมกล้อง -80 องศา ซึ่งเป็นมุมแหล่งแสงที่มีความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการวัดมากที่สุด และที่มุมแหล่งแสง 80 องศา มีความแตกต่างของค่าบีอาร์ดีเอฟทั้งสองชุดมากที่สุด โดยเฉพาะที่มุมกล้อง -20 ถึง -60 องศา ซึ่งเป็นมุมที่เกิดการสะท้อนแสงกล้าแบบออฟสเปคูลาร์

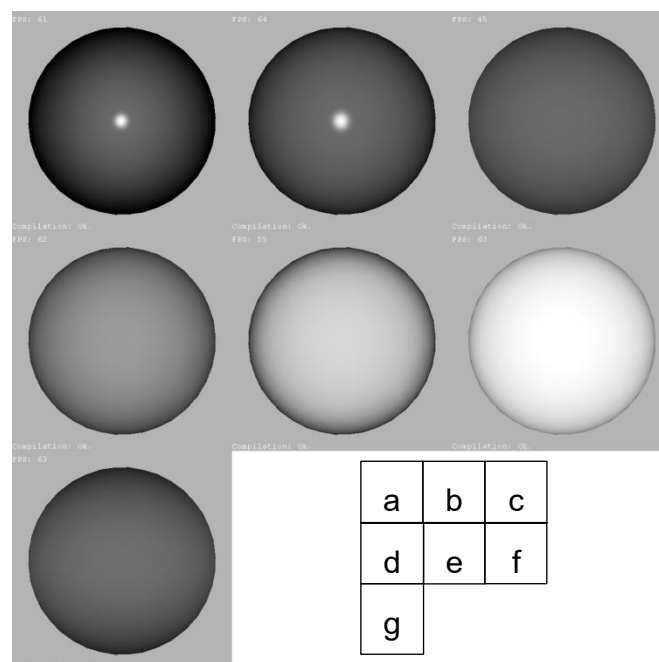
จากกราฟที่ 4-13 กราฟเชิงขั้วของผ้าไหมตัวอย่างที่ 2 ที่มุมแหล่งแสง 0 ถึง 10 องศา ค่าบีดีเอฟทั้งสองชุดมีความแตกต่างกันมากกว่าผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ที่มุมแหล่งแสง 20 ถึง 60 องศา โดยภาพรวมแล้วมีความแตกต่างกันระหว่างค่าบีอาร์ดีเอฟทั้งสองชุดเล็กน้อย แต่ที่มุมกล้อง -60 ถึง -70 องศาเป็นช่วงมุมกล้องที่มีความแตกต่างมากที่สุด ที่มุมแหล่งแสง 70 ถึง 80 องศา มีความแตกต่างของค่าบีอาร์ดีเอฟมากที่สุดในช่วงมุมกล้อง -30 ถึง -60 องศา ซึ่งเป็นมุมที่เกิดการสะท้อนแสงกล้าแบบออฟสเปคูลาร์

จากกราฟที่ 4-14 กราฟเชิงขั้วของผ้าไหมตัวอย่าง ที่มุมแหล่งแสง 0 ถึง 70 องศา ค่าบีอาร์ดีเอฟทั้งสองชุดมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก เนื่องจากผ้าไหมตัวอย่างที่ 3 มีลักษณะการสะท้อนแสงกล้าน้อยที่สุดและไม่มีค่าสูงสุดที่ชัดเจนที่มุมกล้อง -80 องศา แบบจำลองที่นำเสนอจึงสามารถทำนายค่าบีอาร์ดีเอฟได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ ที่มุมแหล่งแสง 80 องศา มีการสะท้อนแสงกล้าแบบออฟสเปคูลาร์ที่มุม -30 ถึง -70 องศา จึงทำให้ค่าบีอาร์ดีเอฟทั้งสองชุดในช่วงมุมดังกล่าวมีค่าแตกต่างกันมาก

การทำนายลักษณะพิเศษของการสะท้อนแสงของแบบจำลองที่นำเสนอสามารถทำนายได้ดีในการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับ ซึ่งเกิดขึ้นชัดเจนที่มุมกล้อง 70 ถึง 80 องศา แต่สำหรับการสะท้อนแสงกล้าแบบออฟสเปคูลาร์ที่เกิดขึ้นในช่วงมุมกล้อง -20 ถึง -60 องศา แบบจำลองที่นำเสนอยังไม่สามารถทำนายแบบเฉพาะเจาะจงลงไปในแต่ละมุมได้ แต่เป็นการทำนายในลักษณะเฉลี่ยเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

ในภาพที่ 4-4 เป็นภาพทรงกลมสามมิติที่จำลองการสะท้อนแสงที่ได้จากแต่ละแบบจำลอง โดยใช้พารามิเตอร์ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ในตารางที่ 4-3 โดยที่แหล่งแสงอยู่ในทิศทางเดียวกับ

ตัวรับภาพ พบว่าแบบจำลองของฟองและแบบจำลองของบลินน์-ฟอง มีจุดสว่างของการสะท้อนแสงกล้าเกิดขึ้นที่บริเวณกลางทรงกลม โดยแบบจำลองของบลินน์-ฟองมีขนาดของจุดสว่างใหญ่กว่าเล็กน้อย รวมถึงส่วนของการสะท้อนแสงฟุ้งที่มีระดับความสว่างมากกว่าแบบจำลองของฟองเล็กน้อยเช่นกัน ในแบบจำลองที่เหลือมีเพียงลักษณะการสะท้อนแสงฟุ้งที่มีระดับความสว่างที่แตกต่างกัน โดยที่แบบจำลองของออเรน-นayar มีระดับความสว่างมากที่สุด รองลงมาคือแบบจำลองของคูก-ทอร์เรนซ์ แบบจำลองของวาร์ด-ดูเออร์ แบบจำลองที่นำเสนอ และแบบจำลองของวาร์ดมีระดับความสว่างน้อยที่สุด แต่ในแบบจำลองของวาร์ด แบบจำลองของวาร์ด-ดูเออร์ และแบบจำลองที่นำเสนอ ระดับความสว่างของด้านซ้ายและด้านขวาของทรงกลมสามมิติมีความสว่างมากกว่าด้านบนและด้านล่างของทรงกลมเนื่องจากความแตกต่างกันระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของพื้นผิวระดับไมโครในแนวแกน x และ y (α_x และ α_y)



ภาพที่ 4-4* ทรงกลมสามมิติจำลองการสะท้อนแสงที่ได้จากแต่ละแบบจำลองโดยใช้พารามิเตอร์ของผ้าไหมตัวอย่างที่ 1 ในตารางที่ 4-3 (a) แบบจำลองของฟอง (b) แบบจำลองของบลินน์-ฟอง (c) แบบจำลองของวาร์ด (d) แบบจำลองของวาร์ด-ดูเออร์ (e) แบบจำลองของคูก-ทอร์เรนซ์ (f) แบบจำลองของออเรน-นayar และ (g) แบบจำลองที่นำเสนอ

* ภาพได้รับการปรับแต่งเพื่อให้เกิดความแตกต่างของแสงเงาในแต่ละบริเวณชัดเจนขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผ้าไหมเป็นผ้าที่มีความโดดเด่นที่ความมันวาวทอมาจากเส้นใยไหม ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติที่เป็นเส้นใยยาวปั่นรวมกันจนได้เป็นเส้นไหมสำหรับใช้ในการทอ การทอแบบลายขัดธรรมดาจะใช้ไหมเส้นพุ่งและไหมเส้นยืนทอขัดกัน ทำให้พื้นผิวของผ้าไหมประกอบขึ้นจากเส้นไหม 2 แนวที่วางตัวในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน เกิดเป็นร่องและเนินขนาดเล็กเรียงตัวกันเป็นลวดลาย มีผลให้การกระจายตัวของการสะท้อนแสงในแนวไหมเส้นยืนและไหมเส้นพุ่งแตกต่างกัน ด้วยสมบัติของเส้นใยไหมรูปสามเหลี่ยมและลวดลายบนพื้นผิวที่เกิดจากการทอ รวมทั้งความเป็นระเบียบของเส้นใยไหมในเส้นไหม ส่งผลให้การสะท้อนแสงของผ้าไหมโดดเด่นและมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว

จากการศึกษาการสะท้อนแสงของผ้าไหม เมื่อให้มุมตัวอย่างผ้าไหมคงที่และเปลี่ยนมุมแหล่งแสง พบว่าการสะท้อนแสงของผ้าไหมเป็นการสะท้อนแบบผสม ที่มุมแหล่งแสงใกล้เคียงกับเส้นปกติของพื้นผิว การสะท้อนแสงของผ้าไหมจะมีสัดส่วนของลักษณะการสะท้อนแสงพุ่งมากกว่าลักษณะการสะท้อนแสงกล้ำ และจะลดลงเมื่อมุมแหล่งแสงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การสะท้อนแสงของผ้าไหมยังมีลักษณะการสะท้อนแสงพิเศษคือ การสะท้อนแสงกล้ำแบบออฟสเปคูลาร์ และการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับ โดยการสะท้อนแสงกล้ำแบบออฟสเปคูลาร์จะเกิดขึ้นชัดเจนที่มุมแหล่งแสงประมาณ 70 ถึง 80 องศา และสัดส่วนการสะท้อนแสงแบบย้อนกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมแหล่งแสงเพิ่มขึ้น มีค่าสูงสุดเมื่อแหล่งแสงอยู่ที่มุม 80 องศา

เมื่อให้มุมแหล่งแสงคงที่และเปลี่ยนมุมตัวอย่างผ้าไหมพบว่าการสะท้อนแสงมีค่าลดลงเมื่อมุมตัวอย่างเพิ่มขึ้น และสัดส่วนการลดลงของการสะท้อนแสงในมุมแหล่งแสงใกล้เคียงกับเส้นปกติของพื้นผิวจะน้อยกว่ามุมแหล่งแสงที่ห่างจากเส้นปกติของพื้นผิวออกมา

เมื่อพิจารณาการสะท้อนแสงของผ้าไหมในลักษณะพื้นผิวสามมิติพบว่า การกระจายตัวของการสะท้อนแสงในแนวไหมเส้นพุ่งเกิดขึ้นมากกว่าแนวไหมเส้นยืน เนื่องจากลักษณะการทอผ้าไหมผ้าไหมทำให้เกิดปรากฏการณ์การบังและการเกิดเงาในแนวไหมเส้นยืน ซึ่งส่งผลต่อลักษณะการกระจายแสงตัวของการสะท้อนแสง

เปรียบเทียบค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดและค่าบีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองที่มีอยู่ทั้ง 6 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของฟอง, แบบจำลองของวอร์ด, แบบจำลองของวอร์ด-คูเออร์, แบบจำลองของบลินน์-ฟอง, แบบจำลองของคุก-ทอร์เรนซ์ และแบบจำลองของออเรน-นaylor ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม พบว่าแบบจำลองของวอร์ดให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด จึงใช้แบบจำลองของวอร์ดเป็นต้นแบบในการปรับปรุงต่อไป เนื่องจาก การกระจายตัวของการสะท้อนแสงพุ่งในแนวไหมเส้นพุ่งและแนวไหมเส้นยืนมีความแตกต่างกัน จึงได้ปรับปรุงแบบจำลองของวอร์ดในส่วนของ การสะท้อนแสงพุ่งโดยการเพิ่มพารามิเตอร์ในการควบคุมการกระจายตัวของการสะท้อนแสงพุ่งในแต่ละทิศทาง แบบจำลองที่นำเสนอสามารถเขียนได้ดังนี้ (สมการที่ 5-1)

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \rho_d(N \cdot L) \left[(V_x \beta_x)^2 + (V_y \beta_y)^2 + (V_z \beta_z)^2 \right] + \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x\alpha_y\sqrt{(N \cdot L)(N \cdot V)}} \exp \left[-2 \frac{\left[\frac{H_x}{\alpha_x} \right]^2 + \left[\frac{H_y}{\alpha_y} \right]^2}{1 + (H \cdot N)} \right] \quad (5-1)$$

α_x, α_y เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของพื้นผิวดระดับไมโคร
ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

β_x, β_y และ β_z เป็นพารามิเตอร์ควบคุมการกระจายตัวของการสะท้อนแสงพุ่ง
ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองที่นำเสนอกับแบบจำลองที่มีอยู่ โดยเฉพาะแบบจำลองของ วาร์ดที่ใช้เป็นต้นแบบ พบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าปีอาร์ดีเอฟที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้ จากการคำนวณของแบบจำลองที่นำเสนอให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในผ้าไหมทั้ง 3 ตัวอย่าง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวัดค่าปีอาร์ดีเอฟของผ้าไหมด้วยเครื่องโกนิโอสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น GSP-2S ถึงแม้ว่าจะมีการวัดที่มุมกล้อง มุมแหล่งแสง และมุมตัวอย่างต่างๆ แต่ค่าปีอาร์ดีเอฟที่ได้เป็นการ วัดในระนาบเดียวกับแหล่งแสงเท่านั้น หากมีการวัดค่าปีอาร์ดีเอฟในระนาบอื่นๆด้วยจะทำให้ ข้อมูลมีความสมบูรณ์ครบถ้วนมากขึ้น

แบบจำลองที่นำเสนอสามารถทำนายค่าปีอาร์ดีเอฟได้ใกล้เคียงกับค่าปีอาร์ดีเอฟของ ผ้าไหมที่วัดได้ แต่การเพิ่มพารามิเตอร์ในสมการของแบบจำลองของวาร์ดทำให้ใช้เวลาในการ คำนวณมากกว่าแบบจำลองต้นแบบถึงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ถ้าสามารถลดความซับซ้อนของ สมการในส่วนของการสะท้อนแสงกล้างจะช่วยทำให้ใช้เวลาในการคำนวณลดลงได้

ตัวอย่างผ้าไหมที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีเฉพาะผ้าไหมทอลายขัดธรรมดา จึงควรทดสอบ แบบจำลองเพิ่มเติมกับตัวอย่างผ้าไหมที่มีการทอแบบอื่นๆ เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของ ลักษณะการทอกับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองและแก้ไขข้อจำกัดของแบบจำลองในการทำนาย ค่าปีอาร์ดีเอฟของตัวอย่างผ้าไหมที่มีการทอแบบอื่นๆ

รายการอ้างอิง

- [1] พาณิชย์, กระทรวง. กรมทรัพย์สินทางปัญญา. สรุปผลงานสำคัญของกรมทรัพย์สินทางปัญญา ประจำเดือน กุมภาพันธ์ 2554 [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: http://www.ipthailand.go.th/ipthailand/images/Anual/february_54.doc [11 กรกฎาคม 2555]
- [2] พัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน), สำนักงาน. แนวโน้มการส่งออกไหม-มูลค่าการส่งออกและแนวโน้มการส่งออก [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.arda.or.th/kaset-info/silk/index.php?option=com_content&view=article&id=78&Itemid=70&limitart=2 [11 กรกฎาคม 2555]
- [3] เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมหม่อนไหม. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกไหม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.qsds.go.th/qthaisilk/upload_page/datasilk_Page_3.jpg [11 กรกฎาคม 2555]
- [4] เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมหม่อนไหม. มูลค่าการนำเข้าและส่งออกรังไหม เส้นไหม ผ้าไหม และผลิตภัณฑ์ไหม ปี 2553 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.qsds.go.th/qthaisilk/upload_page/import_export53.pdf [11 กรกฎาคม 2555]
- [5] เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมหม่อนไหม. มูลค่าการนำเข้าและส่งออกรังไหม เส้นไหม ผ้าไหม และผลิตภัณฑ์ไหม ปี 2554 (ม.ค.-ธ.ค.54) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.qsds.go.th/qthaisilk/upload_page/ImportExport54.pdf [11 กรกฎาคม 2555]
- [6] เกษตรและสหกรณ์, กระทรวง. กรมหม่อนไหม. ศูนย์สารสนเทศหม่อนไหมและประชาสัมพันธ์. กรมหม่อนไหมสร้างสรรค์เอกลักษณ์ผลิตภัณฑ์ไหมไทยเพิ่มโอกาสขยายสินค้าตลาดสากล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.qsds.go.th/qthaisilk/upload_page-ThaisilkNews1.pdf [11 กรกฎาคม 2555]
- [7] ประชาชาติธุรกิจออนไลน์. มิติใหม่ ผ้าไหมไทย พร้อมใจสู่สายตาโลก [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: http://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=13365639-73&grpId=03&catid=00&subcatid=0000 [15 กรกฎาคม 2555]

- [8] เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, กระทรวง. สำนักงานสถิติแห่งชาติ. รายงานเครื่องชี้การ
พัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารของประเทศไทย พ.ศ. 2554 [ออนไลน์].
2555. แหล่งที่มา : [http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/download/files/-
ictDev54.pdf](http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/download/files/-
ictDev54.pdf) [15 กรกฎาคม 2555]
- [9] เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, กระทรวง. สำนักงานสถิติแห่งชาติ. รายงานผลที่สำคัญ
สำรวจสถานภาพการพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทย พ.ศ.2554 [ออนไลน์].
2555. แหล่งที่มา : [http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/themes/files/elect-
ThaiRep54.pdf](http://service.nso.go.th/nso/nsopublish/themes/files/elect-
ThaiRep54.pdf) [15 กรกฎาคม 2555]
- [10] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [11] Sonthisombat, A.; and Speakman, T. P. Silk: Queen of fiber – the concise story
[Online]. Available from: [http://www.en.rmutt.ac.th/prd/Journal/Silk_with_figure-
snew.pdf](http://www.en.rmutt.ac.th/prd/Journal/Silk_with_figure-
snew.pdf) [2012, July 20]
- [12] เชียงใหม่, มหาวิทยาลัย. ศูนย์วิชาการและเทคโนโลยีสิ่งทอพื้นบ้าน. สถาบันวิจัยวิทยา-
ศาสตร์และเทคโนโลยี. วิธีการทอผ้าไหมไทย [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
http://www.ist.cmu.ac.th/cotton/natural_Fiber_MaiWeaving.php?subnav=3 [15
กรกฎาคม 2555]
- [13] Wynn C. An Introduction to BRDF-Based Lighting [Online]. Available from: [http://
developer.download.nvidia.com/assets/gamedev/docs/BRDFIntro.pdf](http://
developer.download.nvidia.com/assets/gamedev/docs/BRDFIntro.pdf) [2012,
July 20]
- [14] บุญเกียรติ นายเทพประสิทธิ์. การวัดบีอาร์ดีเอฟและการจำลองการสะท้อนแสงของผ้าไหม.
วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยี
ทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [15] Love R. C. Surface reflection model estimation from naturally illuminated image
sequences. Doctoral dissertation, School of Computer Studies, University of
Leeds, 1997.

- [16] Nicodemus, F. E.; Richmond, J. C.; Hsia, J. J.; Ginsberg, I. W.; and Limperis, T. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance, Technical Report National Bureau of standards, (1997).
- [17] Dorsey, J.; Rushmeier, H.; and Sillion, F. Digital modeling of material appearance. Burlington: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2008.
- [18] Haupt, R. L.; and Haupt, S. E. Practical Genetic Algorithm. 2nd edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [19] Chipperfield, A.; Fleming, P. J.; Pohlheim, H.; and Fonseca, C. M. Genetic Algorithm Toolbox for use with Matlab. Technical Report Department of automatic control and systems engineering, University of Sheffield (1994).
- [20] Kurt, M.; Edwards, D. A. Survey of BRDF Models for Computer Graphics. ACM SIGGRAPH Computer Graphics 43(2) (2009).
- [21] Matusik, W.; Pfister, H.; Brand, M.; and McMillan, L. A data-driven reflectance model. Proceedings International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (2003): 27–31.
- [22] Lawrence, J.; Rusinkiewicz, S.; and Ramamoorthi, R. Efficient BRDF importance sampling using a factored representation. ACM Transactions on Graphics (TOG) 23 (2004): 496–505.
- [23] Phong, B. T. Illumination for computer generated pictures. Communications of the ACM 18(6) (1975): 311–317.
- [24] Blinn, J. F. Models of light reflection for computer synthesized pictures. ACM SIGGRAPH Computer Graphics 11 (1977): 192–198.
- [25] Torrance, K.E.; and Sparrow, E.M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. Journal of the Optical Society of America 57(9) (1967): 1105–1114.
- [26] Cook, R. L.; and Torrance, K. E. A reflectance model for computer graphics. ACM SIGGRAPH Computer Graphics 15 (1981): 307–316.
- [27] Schlick, C.; An inexpensive BRDF model for physically-based rendering. Computer Graphics Forum 13(3) (1994): 233-246.

- [28] Oren, M.; and Nayar, S. Generalization of Lambert's Reflectance Model. Proceedings of ACM SIGGRAPH (1994): 239-246.
- [29] Poulin, P.; and Fournier, A. A model for anisotropic reflection. ACM SIGGRAPH Computer Graphics 24 (1990): 273–282.
- [30] Ward, G. J. Measuring and modeling anisotropic reflection. ACM SIGGRAPH Computer Graphics 26(2) (1992): 265–272.
- [31] DÜR, A. An Improved Normalization for the Ward Reflectance Model. Journal of Graphics Tools 11(1) (2006): 51-59.
- [32] Lafortune, E. P. F.; Foo, S. C.; Torrance, K. E.; and Greenberg; D. P. Non-linear approximation of reflectance functions. Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (1997): 117–126.
- [32] Feng, W.; Li, J.; Wei, Q.; and Chen, L. A hybrid model of polarized BRDF for rough surfaces. Infrared Physics & Technology 53(5) (2010): 336–34.
- [33] Westin, S. H.; Li, H.; and Torrance, K. E. A comparison of four BRDF models. Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering (2004): 1–10.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

สมการของแบบจำลองฟังก์ชันการกระจายความสะท้อนแสงสองทิศทางที่ใช้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่นำเสนอ ซึ่งรายละเอียดวิธีการคำนวณของแต่ละแบบจำลองสามารถดูได้จากบทความต้นฉบับตามรายการอ้างอิง

พารามิเตอร์

ρ_d และ ρ_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนแสงพุ่งและการสะท้อนแสงกล้ำตามลำดับ กำหนดให้ $\rho_s + \rho_d = 1$

N เป็นเส้นปกติ

L เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางแหล่งแสง

V เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตัวรับภาพ

H เป็นฮาร์ฟเวกเตอร์ ($H = L + V$)

สมการของแบบจำลอง

- แบบจำลองการสะท้อนแสงของแลมเบิร์ตเซียน (ใช้อธิบายส่วนการสะท้อนแสงพุ่งของทุกแบบจำลอง ยกเว้น แบบจำลองของออเรน-นาคาร์)

$$k_d = \rho_d (N \cdot L)$$

- แบบจำลองของฟอง

$$k_s = \rho_s (V \cdot R)^n$$

- แบบจำลองของวาร์ต

$$k_s = \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x\alpha_y\sqrt{(N\cdot L)(N\cdot V)}} \exp\left[-2\frac{\left[\frac{H_x}{\alpha_x}\right]^2 + \left[\frac{H_y}{\alpha_y}\right]^2}{1+(H\cdot N)}\right]$$

- แบบจำลองของวาร์ต-คูเออร์

$$k_s = \frac{\rho_s}{4\pi\alpha_x\alpha_y(N\cdot L)(N\cdot V)} \exp\left[-2\frac{\left[\frac{H_x}{\alpha_x}\right]^2 + \left[\frac{H_y}{\alpha_y}\right]^2}{1+(H\cdot N)}\right]$$

- แบบจำลองของบดินน์-ฟอง

$$k_s = \rho_s (N\cdot H)^n$$

- แบบจำลองของคูก-ทอร์เรนซ์

$$k_s = \frac{\rho_s}{\pi} \frac{FDG}{(N\cdot L)(N\cdot V)}$$

เมื่อ

$$F = f_0 + (1 - f_0)(1 - V\cdot H)^5$$

$$\text{เมื่อ } f_0 = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \delta} \exp\left[\frac{-\tan^2 \delta}{m^2}\right]$$

$$G = \min\left[1, \frac{2(N\cdot H)(N\cdot V)}{(V\cdot H)}, \frac{2(N\cdot H)(N\cdot L)}{(V\cdot H)}\right]$$

- แบบจำลองของออกเรน-นาการ์

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\rho_d}{\pi} (N \cdot L) [A + B \max(0, \cos(\phi_r - \phi_i)) \sin(a) \tan(b)]$$

เมื่อ

$$A = 1 - 0.5 \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + 0.33}$$

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

$$a = \max(\theta_r, \theta_i)$$

$$b = \min(\theta_r, \theta_i)$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวรพจน์ นิลพัทธ์ เกิดเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2542 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย โรงเรียนพนมสารคาม"พนมอดุลวิทยา"
- พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางภาพ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย