



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาความหนาของน้ำยาเคลือบเลนส์
ระดับไมโครเมตรโดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

Mathematical Model for Determination of Thin Film Thickness
using Spectrophotometer

วัฒนชัย ม่วงเงิน

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559



T148596

รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาความหนาของน้ำยาเคลือบเลนส์
ระดับไมโครเมตรโดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

Mathematical Model for Determination of Thin Film Thickness
using Spectrophotometer

วัฒนชัย ม่วงเงิน

สาขาหมู่.....
เลขทะเบียน 148596
วันเดือนปี 6 7/11/2560

b. 92872375
l.

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาความหนาของน้ำยาเคลือบเลนส์
ระดับไมโครเมตรโดยใช้เครื่องเสปคโตรโฟโตมิเตอร์

ชื่อ - สกุล นักศึกษา นายวัฒนชัย ม่วงเงิน

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมการวัดและควบคุม

ชื่อ - สกุล อาจารย์นิเทศ รศ.ดร.เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์

ชื่อ - สกุล ผู้นิเทศงาน นายอมฤต นามบุตรดี

ชื่อสถานประกอบการ บริษัท ทรานซิชั่นส์ อ็อปติกัล (ประเทศไทย) จำกัด

บทคัดย่อ

รายงานสหกิจศึกษานี้แนะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาความหนาของน้ำยาเคลือบเลนส์โดยใช้เครื่องเสปคโตรโฟโตมิเตอร์ เนื่องจากบริษัท ทรานซิชั่นส์ อ็อปติกัล (ประเทศไทย) จำกัด ต้องการลดต้นทุนการผลิตด้วยการลดปริมาณน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์ จึงได้มอบหมายให้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหาความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์ ด้วยเหตุนี้จึงเลือกกลุ่มตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่มียอดการผลิตสูงที่สุดมาทำการศึกษา โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์ และค่าการสะท้อนแสงที่วัดโดยเครื่องเสปคโตรโฟโตมิเตอร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นได้ถูกนำไปทดสอบ ซึ่งผลที่ได้รับเป็นที่น่าพอใจยอมรับได้

Research Title: Mathematical Model for Determination of Thin Film Thickness using Spectrophotometer

Student Intern Name: Mr. Wattanachai Muangngoen

Faculty: Engineer **Department:** Instrumentation and Control Engineering

Advisor Name: Assoc. Prof. Dr. Kaset Sirisantisamrid

Mentor Name: Mr. Amarit Nambutdee

Company: Transition Optical (Thailand) Ltd.

ABSTRACT

This cooperative educational report presents a mathematical model for determination of thin film thickness using spectrophotometer. Due to a company requires reducing production cost by decreasing a quantity of solution cover on lens, the company assigned to study a mathematical model to determine film thickness. Thereby, the maximum production products are selected as samples. Then, the relation between film thickness and percentage of reflectance measured from spectrophotometer of each sample is determined the mathematical model. The established model is tested, in which the results are satisfied and acceptable.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานสหกิจศึกษาฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ทรานซิชั่นส์ อีอพิคัล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้โอกาสในการปฏิบัติการโครงการสหกิจศึกษา ขอขอบคุณบริษัท ทรานซิชั่นส์ อีอพิคัล (ประเทศไทย) จำกัด คุณอมฤต นามบุตรดี ผู้นิเทศงานและพนักงานบริษัททุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและประสบการณ์ในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ ที่ได้ให้ความเมตตาและคำแนะนำแก่ผู้จัดทำ ตลอดมา ขอขอบพระคุณอาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ และช่วยเหลืออันเป็นประโยชน์ต่อการทำรายงานสหกิจศึกษาฉบับนี้

วิฒนชัย ม่วงเงิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	3
1.4 วิธีดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ธรรมชาติเชิงคลื่นของแสง	4
2.2 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.3 แสงเชิงเรขาคณิต	7
2.3.1 การสะท้อน	7
2.3.2 การหักเห	8
2.4 การดูดกลืน	8
2.5 การสะท้อน	8
2.6 ความหมายและหลักการการวิเคราะห์การถดถอย	9
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ	17
3.1 บทนำ	17
3.2 การวัดค่าการสะท้อนแสงของเลนส์ ด้วย Spectrophotometer	17
3.3 การวัดความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนหน้าเลนส์โดยใช้อุปกรณ์ Filmetrics	18
3.4 เลนส์ที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่าง	18
3.4.1 กระบวนการในการเคลือบเลนส์ (Spin Coating)	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.2 ชั้นของน้ำยา	19
3.4.3 ค่าความโค้งของเลนส์ (Base Curve)	20
3.5 ทดลองหาความเป็นไปได้และแนวโน้มจากกลุ่มตัวอย่าง	21
3.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์กับความเร็วรอบของการหมุน	21
3.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์กับค่าความโค้งของเลนส์	24
3.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์กับค่าสะท้อนของแสง (%Reflectance)	26
3.6 หาความสัมพันธ์ของค่าความโค้งของเลนส์ และการสะท้อนแสงที่มีผลความหนาของน้ำยา	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง	34
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	37
บรรณานุกรม	39
ประวัติผู้เขียน	40

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงความหนาของเลนส์ ที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่าง	21
3.2 ความหนาของกลุ่มตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนค่าความโค้งของเลนส์	23
3.3 ตารางแสดงกลุ่มตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนค่าความโค้งของเลนส์	25
3.4 กลุ่มตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนค่าความความเร็วรอบในการเคลือบของเลนส์ที่ค่าความโค้ง 1.25 5.25 และ 8.00	30
4.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความหนาของน้ำยาที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความหนา Filmetrics กับความหนาที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่า %Reflectance	35
5.1 แสดงความหนาของชั้นน้ำยากับปริมาณน้ำยาที่ใช้ต่อหนึ่งเลนส์	37

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ข้อมูลของความหนาที่ได้จากการสุ่มวัดความหนาของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดในเดือนตุลาคม พ.ศ.2559	1
1.2 ผลหลังจากที่ลดความแปรปรวนของความหนาของน้ำยาลง 0.5 ไมโครเมตร	2
1.3 ผลหลังจากการลดค่าเป้าหมายจาก 18.5 ไมโครเมตร ลงมาที่ 18 ไมโครเมตร	2
2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
2.2 Reflectance และ Reflectance factor	8
2.3 โครงสร้างของเส้นถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย	9
2.4 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ของตัวแบบเส้นถดถอย	11
2.5 แสดงระยะห่างของจุดข้อมูลกับเส้นตรง	13
2.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า R-Squared ของทั้งสองภาพ	14
2.7 แสดงตัวแบบกับกลุ่มข้อมูล	15
2.8 แสดงกลุ่มของข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น	15
3.1 Spectrophotometer ที่ใช้วัดค่าการสะท้อนแสงของเลนส์	17
3.2 เครื่องมือที่ใช้วัดความหนาของชั้นฟิล์ม	18
3.3 การเคลือบโดยวิธีการหมุน	19
3.4 ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Transition Optical Thailand Limited	19
3.5 ชั้นของน้ำยาชั้นแรก	20
3.6 ค่าความโค้งของเลนส์และลักษณะโครงสร้างของเลนส์	20
3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาน้ำยากับความเร็วรอบ	22
3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาน้ำยากับความเร็วรอบ	24
3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยากับค่าความโค้งของเลนส์	25
3.10 กราฟแสดงความยาวคลื่นกับ %Reflectance ของเลนส์ 1 ชั้น	26
3.11 กราฟแสดงความยาวคลื่นกับ %Reflectance ของกลุ่มตัวอย่าง 72 เลนส์	27
3.12 กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่นต่างๆ	29
3.13 แสดงตำแหน่งของความยาวคลื่นที่ 410 นาโนเมตร	30
3.14 กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ของเลนส์ที่มีค่าความโค้ง 1.25 5.25 และ 8.00	32
3.15 กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ของเลนส์ที่มีค่าความโค้ง 1.25 5.25 และ 8.00 โดยทำการหารูปแบบของสมการเส้นตรง	32

สารบัญภาพ(ต่อ)

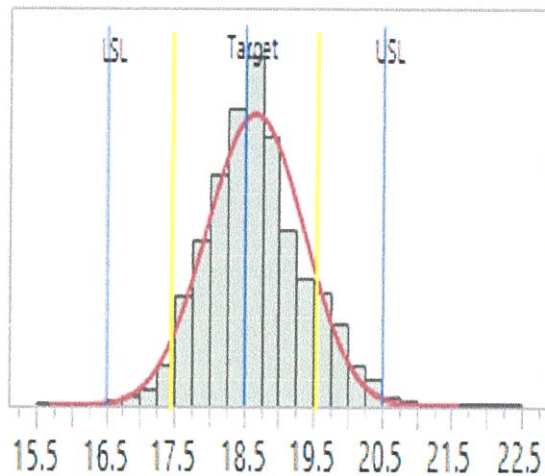
ภาพที่	หน้า
3.16 สูตรที่ได้จากการหารูปแบบสมการเส้นตรงของกราฟ %Reflectance กับความหนาของน้ำยาที่มีความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร	33
4.1 สูตรที่ได้จากการหารูปแบบสมการเชิงเส้น	34
4.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความหนาของน้ำยาที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด Filmetrics ที่ค่าความโค้ง 1.25 5.25 และ 8.00	36
5.1 สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ควรจัดซื้อมาใช้ในการวิจัยในอนาคต	38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

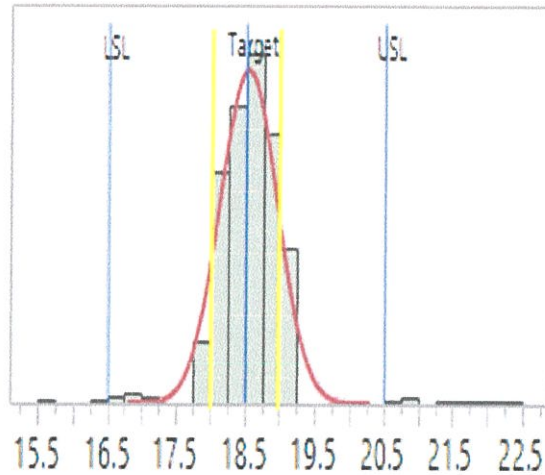
บริษัท Transition Optical Thailand Limited เป็นอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการเคลือบเลนส์แว่นตา มีเลนส์แว่นตาเป็นสินค้าที่จำหน่ายไปทั่วโลก และเป็นบริษัทแรกที่คิดค้นและผลิตเลนส์ปรับสีจากใสเป็นสีทึบเมื่อโดนแสงแดดที่มีรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อปกป้องดวงตาจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต สาร Photochromic ที่ถูกเคลือบบนหน้าเลนส์มีคุณสมบัติในการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต เพื่อไม่ให้ผ่านเลนส์เข้ามาทำร้ายดวงตา ซึ่งสารนี้สามารถปรับความเข้มได้อีกด้วย นั่นหมายความว่าสารจะเข้มขึ้นหรือเลนส์มีสีดำมากขึ้นเมื่อได้รับปริมาณรังสียูวีมาก และเลนส์นั้นจะโปร่งใสเมื่อไม่มีรังสียูวีมาตกกระทบเลนส์ สำหรับเทคโนโลยีการเคลือบเลนส์ของบริษัททรานซิชันส์ อ็อพติคอลล เป็นการเคลือบน้ำยาลงบนหน้าเลนส์ที่ความหนาในระดับ 18.5 ไมครอน และมีข้อกำหนดถูกควบคุมอยู่ที่ +/- 2 ไมครอน ดังภาพที่ 1.1



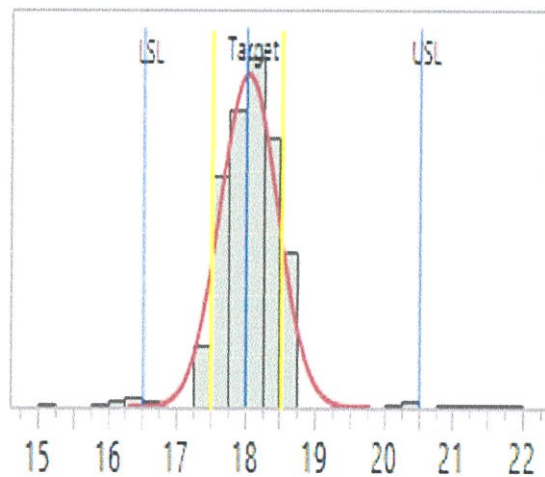
ภาพที่ 1.1 ข้อมูลของความหนาที่ได้จากการสุ่มวัดความหนาของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2559

ซึ่งปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมาก มีชิ้นงานประมาณสองหมื่นกว่าชิ้น และความแปรปรวนของความหนาของน้ำยาที่เคลือบนั้นมีมาก และเนื่องจากในทุกปีจะมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น เพื่อลดต้นทุนของการผลิต ดังนั้นจึงได้รับหัวข้อจากทางบริษัทแม่ให้ทำการลดต้นทุนการผลิต โดยทำการลดในเรื่องของความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของความหนาของฟิล์มให้

น้อยลง ดังภาพที่ 1.2 และลดค่าเป้าหมายจาก 18.5 ไมครอนลงมาที่ 18 ไมครอน ซึ่ง LSL และ USL คือขอบเขตของค่าความหนาที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ด้านล่างและด้านบนดังภาพที่ 1.3 เพื่อให้สามารถลดปริมาณน้ำยาที่ใช้เคลือบเลนส์ลงได้



ภาพที่ 1.2 ผลหลังจากที่ลดความแปรปรวนของความหนาของน้ำยาลง 0.5 ไมโครเมตร



ภาพที่ 1.3 ผลหลังจากการลดค่าเป้าหมายจาก 18.5 ไมโครเมตร ลงมาที่ 18 ไมโครเมตร

ดังนั้นในโครงการนี้จึงได้เลือกผลิตภัณฑ์ที่มียอดการผลิตสูงสุดมาทำการศึกษา ในที่นี้จะเรียกแทนว่า ผลิตภัณฑ์ A

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาและนำเสนอแนวทางที่สามารถวัดความหนาของเลนส์ได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ของ %Reflectance กับความหนาของฟิล์ม โดยใช้เครื่องมือ Agilent Technologies Cary Series 4000 UV-Vis Spectrophotometer เป็นตัวจำลองการวัด เพื่อนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์ที่มีราคาถูกเพื่อใช้ในกระบวนการ

2. นำเสนอแนวทางลดต้นทุนการผลิตต่อบริษัท

1.3 ขอบเขตของโครงการ

เป็นการศึกษาหาแนวทางเกี่ยวกับการวัดค่าความหนาของฟิล์ม เพื่อที่จะนำไปใช้จริงในกระบวนการผลิตในอนาคตโดยใช้อุปกรณ์ทางแสงภายในระยะเวลาสี่เดือน รวมไปถึงการประเมินความถูกต้องของการวัด

1.4 วิธีดำเนินงาน

ลำดับ	การดำเนินงาน	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน
1	ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	✓	✓		
2	ศึกษาคู่มือของเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทำงาน		✓		
3	ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ที่มีปัจจุบันเพื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ใหม่ที่จะสร้างขึ้น			✓	
4	ออกแบบการทดลอง เพื่อนำข้อมูลมาประมวลผล และดูความเป็นไปได้ โดยเลนส์กลุ่มเดียว		✓	✓	✓
5	เพิ่มกลุ่มตัวอย่างเพื่อให้สามารถคาดคะเนสมการได้ดีขึ้น			✓	✓
6	ประมวลผลที่รันใน mass production ในกลุ่มที่มีลักษณะโครงสร้างของเลนส์ที่หลากหลาย				✓
7	รวบรวมข้อมูลและสรุปผล				✓
8	นำเสนอทางบริษัท				✓

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการวัดโดยไม่สัมผัสชิ้นงาน แทนที่จะเป็นแบบสัมผัส และการวัดแบบ Real Time
2. ลดต้นทุนหรือการสูญเสียผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการผิดพลาดในการตรวจสอบ
3. สามารถต่อยอดงานวิจัยนี้และนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรรมชาติเชิงคลื่นของแสง

ค.ศ. 1678 คริสเตียน ฮอยเกนส์ (Christian Huygens) นักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ คนร่วมสมัยเดียวกันกับนิวตัน (Isaac Newton) มองภาพว่า แสงเคลื่อนที่แบบคลื่น คือแผ่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงในทุกทิศทาง และเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางยืดหยุ่นที่มีอยู่เต็มทั่วไป เรียกว่า อีเทอร์ (Ether) ฮอยเกนส์ใช้ทฤษฎีคลื่นอธิบายการสะท้อนและการหักเห การหักเหสองแนว (Birefringence) ในผลึกแคลไซต์ (Calcite: CaCO_3) ค.ศ. 1801 สองปีต่อมาหลังจากครบรอบ 100 ปีของการตีพิมพ์ตำราแสงของนิวตัน โทมัส ยัง (Tomas Young) ทำการทดลองเรียกว่าการทดลองสลิตคู่ โดยมีช่องเล็กๆยาวคู่ที่อยู่ใกล้กันกันแหล่งกำเนิดแสงเอกรงค์ (Monochromatic) ขนาดเล็กพบว่าเงาที่เกิดขึ้นบนฉากมีสวดลายการแทรกสอด เช่นเดียวกับการแทรกสอดของคลื่นน้ำ ซึ่งเป็นการชี้ชัดว่าต้องอธิบายการทดลองด้วยการพิจารณาแสงในเชิงคลื่น ทฤษฎีคลื่นของแสงจึงเป็นที่ยอมรับกันตั้งแต่บัดนั้นเป็นต้นมา ค.ศ. 1821 เฟรเนล (Augustin Fresnel) ตีพิมพ์ผลการทดลอง ที่แสดงว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง และการหักเหสองแนวในผลึกของแคลไซต์ สามารถอธิบายได้โดยการอาศัยปรากฏการณ์โพลาไรซ์ของแสง เฟรเนลได้พัฒนาสมการ เรียกว่า สมการของเฟรเนล เพื่อหาแอมพลิจูดของแสงสะท้อนและแสงส่ง ผ่านที่ระนาบของรอยต่อระหว่างสองตัวกลาง ค.ศ. 1864 แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) สร้างทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพบว่าอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอีเทอร์เท่ากับอัตราเร็วของแสง นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา จึงนิยมพิจารณาว่าแสงเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้า

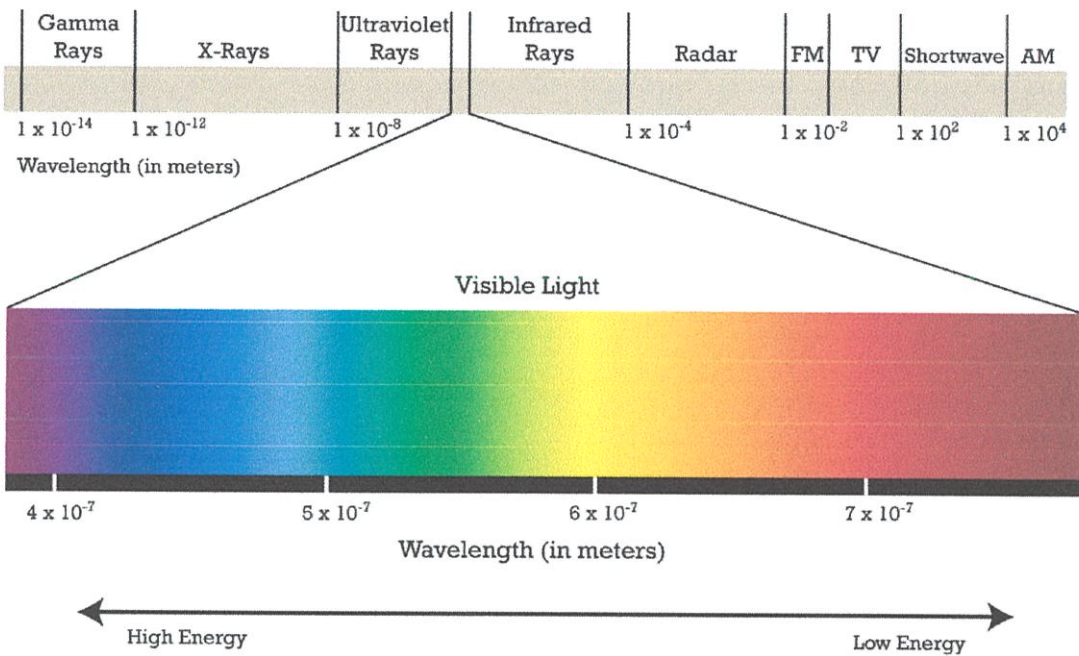
ค.ศ. 1887 ไฮน์ริช เฮิรตซ์ (Heinrich Rudolf Hertz) ทำการทดลองยืนยันทฤษฎีของแมกซ์ เวลล์ โดยกำเนิดและตรวจพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และในปีเดียวกันนี้ไมเคิลสันและมอร์ลีย์ (Albert Michelson and Edward Morley) ทำการทดลองโดยใช้แสงเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่ของโลกผ่านตัวกลางอีเทอร์ จากผลการทดลองและทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษของไอน์สไตน์ (Albert Einstein) นำไปสู่ข้อสรุปที่ว่าสมมติว่าแสงต้องอาศัยตัวกลางอีเทอร์ในการเคลื่อนที่ที่เป็นสมมติฐานที่เกินความจำเป็น

2.2 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิด เกิดจากอนุภาคไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ผ่านอวกาศอาจจะมีสีเดียว (Monochromatic) คือมีเพียงความยาวคลื่นเดียว หรือมีหลายสี (Polychromatic) คือมีหลายความยาวคลื่นทั้งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เราเรียกพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้ว่า “สเปกตรัมของการแผ่รังสี” ย่านของสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีชื่อเฉพาะแตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของการผลิตและการตรวจวัด เช่น คลื่น

วิทยุ รังสีคอสมิก แสง และรังสีอัลตราไวโอเล็ต ภาพที่ 2.1 แสดงความยาวคลื่น (λ) และความถี่ (V) ของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองจะเป็น

$$c = \lambda V \quad (2.1)$$



ภาพที่ 2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สเปกตรัมของการแผ่รังสีดังแสดงในภาพที่ 2.1 เป็นการแผ่ผ่านอวกาศด้วยความเร็วแสง c มีค่าประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที หน่วยของความยาวคลื่น นิยมระบุเป็น อังสตรอม ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) นาโนเมตร ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) หรือไมโครเมตร ($1 \text{ \mu m} = 10^{-6} \text{ m}$) ย่านต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจมีการซ้อนทับกัน เช่น ย่านรังสีเอกซ์ซ้อนทับกับย่านรังสีแกมมา ย่านแคบๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงประมาณ 380 นาโนเมตร ถึง 770 นาโนเมตร สามารถกระตุ้นความรู้สึกในการมองเห็นของตามนุษย์ เรียกย่านนี้ว่า “แสง” แสงที่ตามองเห็นนี้ประกอบด้วยสเปกตรัมของสีต่างๆ จากสีแดง ซึ่งอยู่ทางตอนปลายด้านความยาวคลื่นยาวมายังสีม่วง ซึ่งอยู่ทางตอนปลายด้านความยาวคลื่นสั้น โดยอยู่ระหว่างรังสีอัลตราไวโอเล็ตและย่านรังสีอินฟราเรด คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้ง 3 ย่านนี้ ประกอบกันเป็นสเปกตรัมเชิงแสง (Optical Spectrum) ซึ่งเป็นย่านที่เราสนใจเป็นพิเศษ เพราะความถี่เรโซแนนซ์ของอะตอมและโมเลกุลจะมีค่าอยู่ในย่านสเปกตรัมเชิงแสง ดังนั้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่นี้จะมีอันตรกิริยากับอะตอมหรือโมเลกุล

รังสีเหนือม่วง

รังสีเหนือม่วงหรือรังสียูวี มีความยาวคลื่นประมาณ 380 นาโนเมตร ถึง 10 นาโนเมตร อยู่ทางด้านความยาวคลื่นสั้นติดกับแสงย่านตามองเห็น รังสีเหนือม่วงสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 ชนิดตามความยาวคลื่น คือ ยูวีเอ (UV-A) ความยาวคลื่นในช่วง 380 นาโนเมตร ถึง 315 นาโนเมตร ยูวีบี (UV-B) ความยาวคลื่นในช่วง 315 นาโนเมตร ถึง 280 นาโนเมตร ยูวีซี (UV-C) ความยาวคลื่นในช่วง 280 นาโนเมตร ถึง 10 นาโนเมตร ดวงอาทิตย์จะแผ่รังสีเหนือม่วงทั้ง 3 ชนิด แต่จะถูกดูดกลืนในชั้นโอโซนของบรรยากาศโลก ดังนั้นประมาณ 99% ของการแผ่รังสีเหนือม่วงที่มาถึงโลกจะเป็นรังสียูวีเอ การแผ่รังสีเหนือม่วงจากดวงอาทิตย์จะเกี่ยวข้องกับสุขภาพของมนุษย์ รังสียูวีจะกระตุ้นผิวหนังให้สร้างวิตามินดี โดยจะทำให้ผิวเสื่อมสภาพเร็ว และอาจจะทำให้เกิดโรคมะเร็ง รังสียูวีบีจะทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังและผิวหนังใหม่แก่ริ้วรอยจากการตากแดด จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสียูวีบีกับมะเร็งผิวหนัง พบว่าเกี่ยวข้องกับการทำลายชั้นโอโซนของบรรยากาศของโลก ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากการใช้สารประกอบคลอโรฟลูโอโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon: CFC) ของมนุษย์ อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างรังสียูวีกับก๊าซออกซิเจนจะทำให้เกิดโอโซน (O_3) ในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญในการกรองรังสียูวีบีและ ยูวีซีจากรังสีคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่แผ่มายังพื้นผิวโลก สารประกอบ CFC จะมีส่วนร่วมในกระบวนการทางเคมีซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนโอโซนไปเป็นก๊าซออกซิเจน ดังนั้น CFC และสารเคมีตัวอื่นอาจจะเป็นตัวทำลายชั้นโอโซน

รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความยาวคลื่นในย่าน 10 นาโนเมตรถึง 10^{-4} นาโนเมตร สามารถผลิตได้จากอิเล็กตรอนพลังงานสูงตกกระทบเป้าโลหะ ในทางการแพทย์ใช้รังสีเอกซ์ในการวินิจฉัยโครงสร้างกระดูกและการรักษาโรคมะเร็ง การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการศึกษาโครงสร้างของผลึกของของแข็ง กล้องโทรทรรศน์รังสีเอกซ์เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับนักดาราศาสตร์

รังสีแกมมา

รังสีแกมมากำเนิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.1 นาโนเมตรถึง 10^{-4} นาโนเมตร รังสีแกมมาใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง

รังสีอินฟราเรด

รังสีอินฟราเรดจะอยู่ในบริเวณตอนปลายทางด้านความยาวคลื่นยาวของแสงย่านตามองเห็น รังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 770 นาโนเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร วัตถุในสภาวะสมดุลความร้อนบนพื้นผิวโลกจะแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มมากที่สุด ในย่านอินฟราเรด ดังนั้นบางครั้งการแผ่รังสีอินฟราเรดจึงเรียกว่า รังสีความร้อน ในการประยุกต์รังสีอินฟราเรดเข้ากับกล้องส่อง

ในเวลากลางคืนทำให้สามารถตรวจหารังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมาจากวัตถุในที่มีดสนิท การถ่ายภาพด้วยรังสีอินฟราเรดอาศัยหลักการของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน (ความเข้มสำหรับแต่ละความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาจะแตกต่างกัน) ทำให้เกิดภาพที่มีความสว่างแตกต่าง (Contrast) ภาพเหล่านี้สามารถใช้เป็นแผนที่แสดงการแปรผันของอุณหภูมิบนพื้นผิวโลก รังสีอินฟราเรดยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ด้านการแพทย์จะใช้รังสีอินฟราเรดในการรักษาตาที่มีความผิดปกติในการมองเห็น ด้านการสื่อสาร ใช้รังสีอินฟราเรดในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงและอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลต่างๆ

ไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟมีความยาวคลื่นประมาณ 1 มิลลิเมตรถึง 30 เซนติเมตร เตาไมโครเวฟใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้อาหารสุก คลื่นไมโครเวฟมีบทบาทสำคัญในระบบเรดาร์การสื่อสารทางไกล และสเปกโทรสโกปี

คลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความยาวคลื่นยาว สามารถกำเนิดได้จากการออสซิลเลตของอิเล็กตรอนในตัวนำซึ่งประพุดิตัวเป็นสายอากาศที่มีรูปร่างต่าง ๆ คลื่นวิทยุมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 1 เมตร ถึงหลายพันเมตร คลื่นวิทยุโดยทั่วไปใช้ในการแพร่สัญญาณวิทยุและโทรทัศน์ ซึ่งประกอบด้วยคลื่นวิทยุแอมเอ็ม (ความถี่ 540 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1600 กิโลเฮิร์ตซ์) ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 188 เมตร ถึง 556 เมตร และแกลวิทยุเอฟเอ็ม (ความถี่ 88 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 108 เมกะเฮิร์ตซ์) ความยาวคลื่นจาก 2.78 เมตร ถึง 3.41 เมตร

2.3 แสงเชิงเรขาคณิต

แสงเชิงเรขาคณิต หมายถึง การอธิบายสมบัติทางแสงต่างๆ โดยถือว่าแสงเดินทางเป็นเส้นตรงเป็นรังสีแสง เมื่อมีวัตถุทึบแสงกีดขวางทางเดินแล้ว แสงไม่สามารถแผ่กระจายไปรอบๆ สิ่งกีดขวางดังกล่าว ซึ่งความจริงก็คือการเลี้ยวเบนน้อยๆ เสมือนว่ามีการเดินทางเป็นเส้นตรง หรือบางกรณีก็มีการเลี้ยวเบนมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและขนาดของสิ่งกีดขวางนั่นเอง เช่น คลื่นเสียงความยาวคลื่น 0.1-20 เมตร ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนได้ดีพอสมควร เช่น การพูดกันระหว่างมุมตึกก็ทำให้ได้ยิน

2.3.1 การสะท้อน

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลาง แล้วบริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสองนั้น แสงบางส่วนจะหักเหเข้าไปในตัวกลางที่สอง และแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับมายู่ใน

ตัวกลางที่หนึ่งเหมือนเดิม ถ้าที่ผิวรอยต่อทั้งสองนั้นเรียบ การสะท้อนจะเป็นไปตามกฎคือ มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และรังสีสะท้อนจะอยู่ในระนาบของรังสีตกกระทบ

2.3.2 การหักเห

การหักเหของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปสู่ตัวกลางที่สอง ซึ่งทิศทางการของรังสีจะเหินไปจากแนวเดิม

2.4 การดูดกลืน

การดูดกลืน หมายถึง การที่แสงที่ผ่านตัวกลางใดๆ แล้วความเข้มแสงจะลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น การดูดกลืนมี 2 แบบ คือ

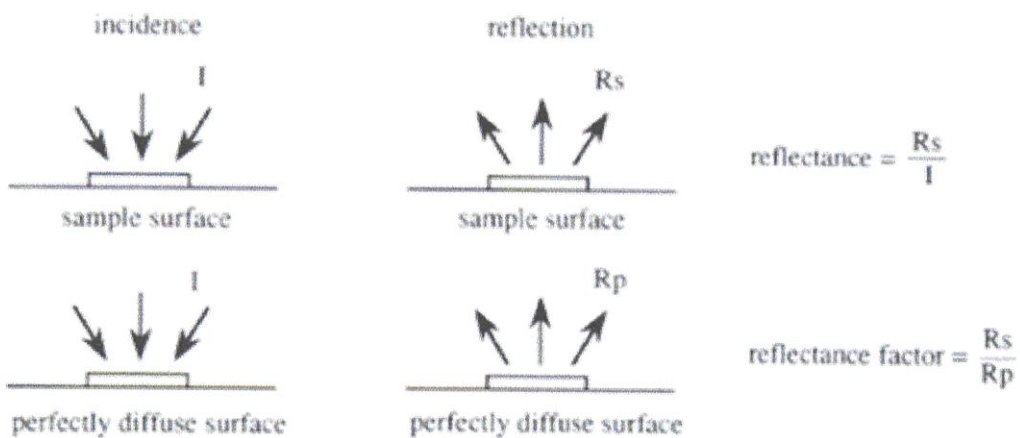
- ดูดกลืนทั่วไป คือ ความเข้มของทุกความยาวคลื่นลดลง
- การเลือกดูดกลืน ตัวกลางจะเลือกดูดกลืนเฉพาะความยาวคลื่น ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะ เช่น

กระจกสีแดง เพราะกระจกเลือกดูดกลืนสีต่างๆยกเว้นสีแดง

2.5 การสะท้อน

Reflectance คือ สัดส่วนระหว่างความเข้มของรังสีตกกระทบ (Incident Flux) กับรังสีสะท้อน (Reflected Flux) บนผิวของชิ้นงาน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 1

Reflectance Factor คือ สัดส่วนของความเข้มของรังสีสะท้อนบนผิวชิ้นงานเทียบกับรังสีที่สะท้อนบนผิวมาตรฐาน



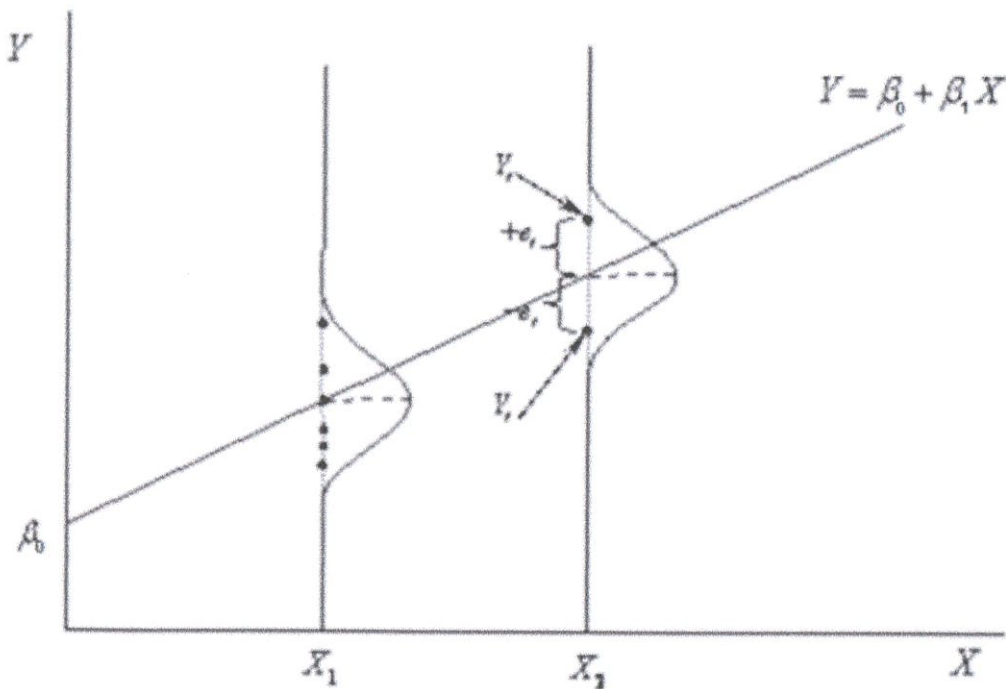
ภาพที่ 2.2 Reflectance และ Reflectance Factor

โดยทั่วไป ค่า Reflectance จะขึ้นกับความยาวคลื่น เป็นหลัก ซึ่งจะเรียกว่า “Spectral Reflectance” ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า วัตถุแต่ละชนิดจะมีค่า Spectral Reflectance เฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุแต่ละชนิด

2.6 ความหมายและหลักการการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอย หมายถึง กลวิธีทางสถิติหนึ่งที่ใช้ในการวินิจฉัยและสร้างตัวแบบสำหรับความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ให้ความสนใจ โดยที่ค่าถดถอย (Regression) จะหมายถึงจุดที่ข้อมูลมีแนวโน้มจะถดถอยเข้าหา ซึ่งจะมีความหมายเป็นค่าที่ควรจะเป็นของตัวแปรตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

ตัวแบบโดยทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยนี้ จะได้มาจากการกำหนดตัวแปรอิสระจำนวน k ตัว ซึ่งจะต้องเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ อาทิ มุมมิตัด ความเร็วรอบ ส่วนผสม อุณหภูมิ ฯลฯ โดยจะเรียกตัวแปรนี้ว่า ตัวแปรถดถอย (Regression) หรือ ตัวนำ (Carrier) หรือ ตัวทำนาย (Predictor) และเมื่อทำการกำหนดค่าของตัวแปรถดถอยค่าหนึ่ง ๆ แล้ว จะทำการศึกษาถึงค่าของตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่ม และจะเรียกตัวแปรประเภทนี้ว่าตัวแปรตอบสนอง (Response Variable)



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเส้นถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย

จากข้อสมมติที่กำหนดให้ X เป็นตัวแปรทางคณิตศาสตร์ และ Y เป็นตัวแปรสุ่ม ซึ่งมีความหมายว่า ที่แต่ละค่าควบคุมของ $X = x_i$ จะทำให้ได้ค่า Y มีหลายค่าเนื่องจากสาเหตุด้านรีพีทหะบิลิตี้ (Repeatability) จึงมีความจำเป็นต้องทำการ “เฉลี่ยออก” เป็น $E(Y/x_i)$ เพื่อให้ได้ค่าที่คาดหวังหรือค่าที่แสดงถึงผลจากสาเหตุที่ควบคุมได้ของ Y โดยจะเรียกจุดที่ได้นี้ว่า ค่าถดถอย (Regression Point) ดังนั้น อาจจะแสดงองค์ประกอบของสารสนเทศในข้อมูลแต่ละตัวว่า

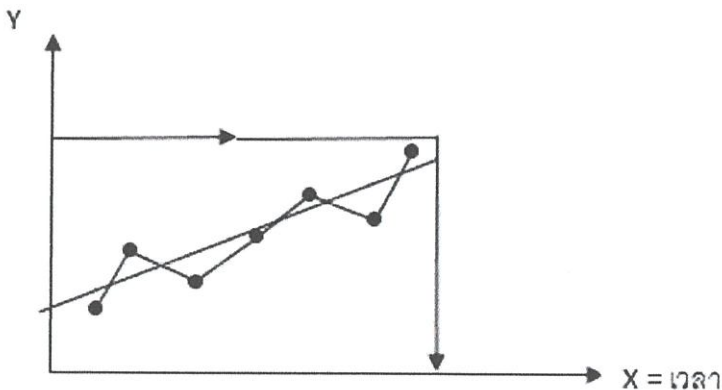
$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon \quad (2.2)$$

โดยที่ β_0 เป็นค่าชดเชย (Compensation Value) ของ y เมื่อ $x = x_i$ และ β_1 คือ ค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของ x_i และ y_i สำหรับ ϵ หมายถึง ผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ใน y เมื่อ $x = x_i$ ที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ และถ้าทำการ “เฉลี่ยออก” สาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้แบบรีพีทหะบิลิตี้ใน y ของสมการที่ (2.2) แล้ว จะได้ผลว่า

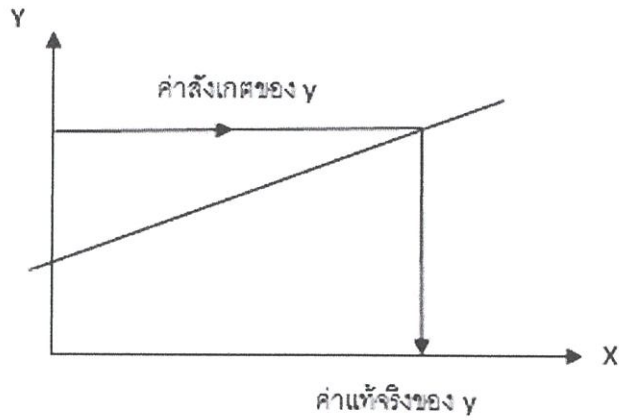
$$\begin{aligned} E(Y/x) &= E(\beta_0 + \beta_1 x_i) + E(\epsilon) \\ E(Y/x) &= \beta_0 + \beta_1 x_i \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยจะเรียกสมการที่ (2.3) นี้ว่า “สมการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย” ซึ่งมีโครงสร้างดังภาพที่ 2.3 กล่าวคือ β_0 เป็นระยะตัวแกน Y (Y-intercept) สำหรับเป็นค่าชดเชยของ $E(Y/x)$ และ β_1 คือค่าความชัน (Slope) ของเส้นถดถอยที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ $E(Y)$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า x ไป 1 หน่วย

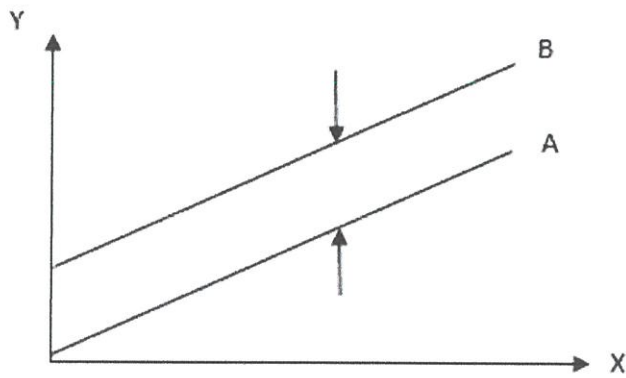
Crocker (1990) ได้แสดงถึงตัวอย่างของความสัมพันธ์ของตัวแบบเส้นถดถอยดังภาพที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วย



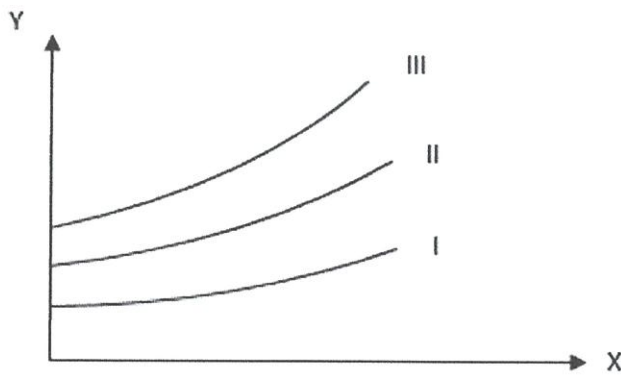
(ก) ตัวแบบแนวโน้มตามเวลา



(ข) ตัวแบบสอบเทียบ



(ค) ตัวแบบภายใต้เงื่อนไขเพิ่มเติม



(ง) สถานการณ์ที่ซับซ้อน

ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ของตัวแบบเส้นถดถอย

(ก) ตัวแบบแนวโน้มตามเวลา (Time Trend) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ก) โดยตัวแบบถดถอยดังกล่าวจะกำหนดให้ $x =$ เวลา และกำหนดพิกัดด้านบนของข้อกำหนดเฉพาะไว้ที่แกน Y เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินใจถึงช่วงเวลาในการทำการซ่อมบำรุงหรือยกเครื่องทางวิศวกรรม

(ข) ตัวแบบสอบเทียบ (Calibration Curve) หรือตัวแบบถดถอยผกผัน (Inverse Regression) เป็นตัวแบบที่สร้างจากการทดลองด้วยข้อมูล (x, y) ที่อาจได้จากห้องปฏิบัติการ แล้วหาค่าของ x (ซึ่งปกติจะหาได้ยาก) จากค่าสังเกตของ Y โดยตัวแบบดังกล่าวนี้จะมีประโยชน์อย่างมากในงานสอบเทียบเครื่องมือวัด

(ค) ตัวแบบภายใต้เงื่อนไขเพิ่มเติม (Additional Condition Model) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ค) ซึ่งเป็นการสร้างเส้นถดถอยขึ้นมาอีกหนึ่งเส้นที่ขนานกับเส้นเดิมแต่ระยะตัดแกน y ต่างกันเพื่อแสดงถึงค่าขดเซย์ที่แตกต่างออกไปเมื่อมีการใช้งานที่ต่างเงื่อนไขกัน และจะเรียกระยะความแตกต่างนี้ว่า “พารามิเตอร์ที่แสดงการเปลี่ยนเงื่อนไขไป (Shift Parameter)” ซึ่งจะแสดงถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขไป

(ง) สถานการณ์ที่ซับซ้อน (More Complex Situations) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ง) ซึ่งแสดงถึงแนวความคิดของการใช้พารามิเตอร์ที่แสดงการเปลี่ยนเงื่อนไขไปหลายๆค่า โดยใช้กลุ่มของเส้นเหล่านี้ว่าจะไม่ขนานกันและอาจมีใช้เส้นตรง จึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยเส้นถดถอยเชิงซ้อน แต่มีหลักการเช่นเดียวกับภาพที่ 2.4 (ค)

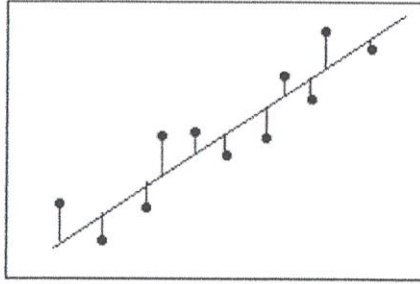
เมื่อทำการหาตัวแบบเชิงเส้นด้วยการวิเคราะห์การถดถอย ANOVA และการออกแบบการทดลอง เราจะต้องมีการประเมินตัวแบบนั้นด้วยว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ มีตัวสถิติที่ใช้ทดสอบความสมบูรณ์ของตัวแบบ (Goodness of Fit Statistics) ให้เลือกนำมาใช้ในการประเมินตัวแบบอยู่หลากหลายตัว แต่ในที่นี้จะพูดถึงตัวสถิติ ค่า R^2 (R -squared) โดยพูดถึงข้อจำกัดและความหมายอื่นๆ ซึ่งในบางครั้งการที่ค่า R^2 มีค่าต่ำ อาจไม่ได้หมายความว่าไม่ดีทุกครั้งไป และเช่นกัน ค่า R^2 ที่มีค่าสูงก็ไม่ได้มีความหมายในเชิงบวกเสมอไป

ตัวแบบการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model) ได้มาจากการคำนวณระยะห่างระหว่างเส้นตรงที่มาจากข้อมูลค่าสังเกตและค่าที่คำนวณได้จากสมการเส้นตรง (Fitted) และสมการเส้นตรงที่ได้จะให้เกิดค่าระยะห่างของจุดข้อมูลกับเส้นตรงโดยรวมน้อยที่สุด

ทางเทคนิคจะใช้ค่า OLS (Ordinary Least Square) เพื่อทำให้เกิดค่าผลรวมของค่าเศษเหลือกำลังสอง (Sum of the Square Residual) ให้น้อยที่สุด

โดยทั่วไปแล้วตัวแบบที่เหมาะสม จะมีความแตกต่างน้อยของค่าที่สังเกตได้กับค่าที่คำนวณตามสมการ และเป็นค่าที่ไม่เอนเอียง (Unbiased)

ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ทางสถิติ ควรที่จะทำการตรวจสอบแผนภาพเศษเหลือ (Residual Plots) ร่วมด้วยเสมอ ซึ่งจากแผนภาพเศษเหลือนี้จะทำให้เห็นรูปแบบของค่าเศษเหลือที่ไม่มีคุณภาพ ซึ่งบ่งบอกถึงความเอนเอียงได้ดีกว่าการวิเคราะห์ด้วยตัวเลข ถ้าแผนภาพเศษเหลือนี้แสดงให้เห็นว่าไม่มีความผิดปกติใดๆ การวิเคราะห์ด้วยตัวเลขก็ทำให้น่าเชื่อถือได้มากขึ้นแล้วจึงไปทำการวิเคราะห์ความสมบูรณ์ของตัวแบบอีกทีหนึ่ง



Definition: Residual = Observed value - Fitted value

ภาพที่ 2.5 ระยะห่างของจุดข้อมูลกับเส้นตรง

ค่า R-Squared คือ ตัวสถิติที่ใช้วัดว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้ี้มีความสมรूपกับข้อมูลมากน้อยอย่างไรหรือรู้จักกันในอีกความหมายหนึ่งว่าเป็น ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจเชิงซ้อน (Coefficient of Multiple Determination) สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression)

นิยามของค่า R-Squared คือ ค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองที่สามารถอธิบายได้มีอยู่ในตัวแบบเชิงเส้นนี้กี่เปอร์เซ็นต์ ค่า R-Squared จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0% - 100%

0% แสดงให้เห็นว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นไม่สามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองต่างที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เลย

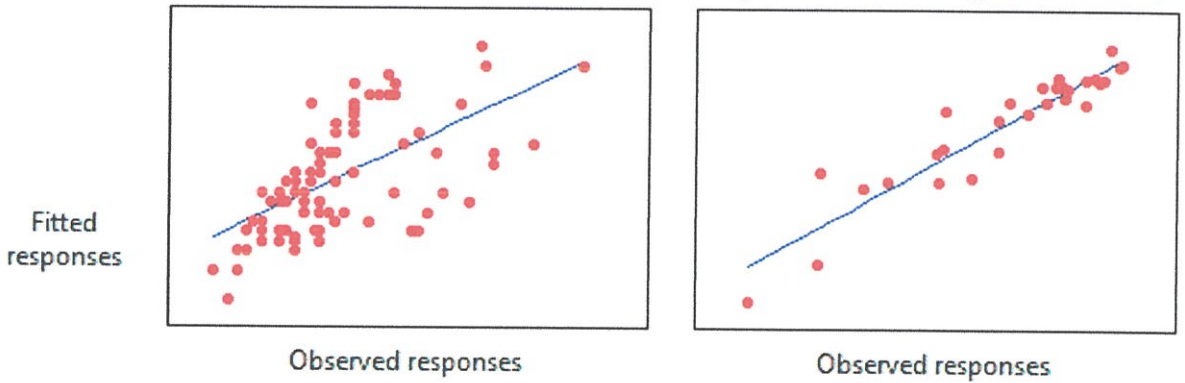
100% แสดงให้เห็นว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้มานั้นไม่สามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองต่างที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เป็นอย่างดี

โดยทั่วไปแล้ว ค่า R-Squared สูงๆ หมายความว่า ตัวแบบคณิตศาสตร์นั้นดี (เหมาะสมกับข้อมูล) แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีเงื่อนไขบางอย่างที่ต้องมีพร้อมกับค่า R-Squared สูงๆนี้ด้วย

ในแผนภาพนี้เป็นการพลอตค่าข้อมูลที่สังเกตได้ และค่าข้อมูลที่คำนวณได้จากตัวแบบคณิตศาสตร์ ซึ่งทั้งสองแผนภาพนี้มีค่า R-Squared แตกต่างกัน

ตัวแบบด้านซ้าย มีค่า 38% ของความแปรปรวน ส่วนของตัวแบบด้านขวามีค่า 87.4% ของความแปรปรวน ซึ่งถ้าค่าเปอร์เซ็นต์ยังมีค่ามาก หมายความว่าตัวแบบสามารถคำนวณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตมาก (หรือค่าสังเกตจะอยู่บนเส้นตรงของตัวแบบ) ในทางทฤษฎีถ้าตัวแบบสามารถอธิบายความแปรปรวนได้ 100% หมายความว่า ค่าที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับค่าที่สังเกตได้ ดังนั้นค่าข้อมูลที่สังเกตได้จะอยู่บนเส้นตรงของตัวแบบคณิตศาสตร์ทุกจุด

Plots of Observed Responses Versus Fitted Responses for Two Regression Models



ภาพที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า R-Squared ของทั้งสองภาพ

ข้อจำกัดของ R-Squared

ค่า R-Squared ไม่สามารถบอกได้ว่าค่าที่คำนวณได้นั้นมีความเอนเอียงหรือไม่ ซึ่งจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์แผนภาพเศษเหลือมาเป็นตัวช่วย

ค่า R-Squared ไม่สามารถบอกได้ว่าตัวแบบคณิตศาสตร์นี้มีความเหมาะสมดีแล้วหรือไม่ ซึ่งบางครั้งตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ดูอาจให้ค่า R-Squared ต่ำ และบางกรณีที่มีค่า R-Squared สูง ตัวแบบก็ไม่เหมาะสมกับข้อมูล

ค่า R-Squared ต่ำ ย่อมมีความหมายไม่ตีเสมอไปหรือไม่ คำตอบคือ ไม่ ด้วยเหตุผล 2 ข้อ คือ

ในบางสาขา เราารู้อยู่แล้วว่าค่า R-Squared ที่จะได้มาจะมีค่าต่ำ เช่น การทำนายพฤติกรรมมนุษย์ ในสาขาจิตวิทยา โดยทั่วไปค่า R-Squared ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่า 50% เนื่องจากมนุษย์เป็นสิ่งที่ยากจะคาดเดาได้ เมื่อเทียบกับกระบวนการทางกายภาพ

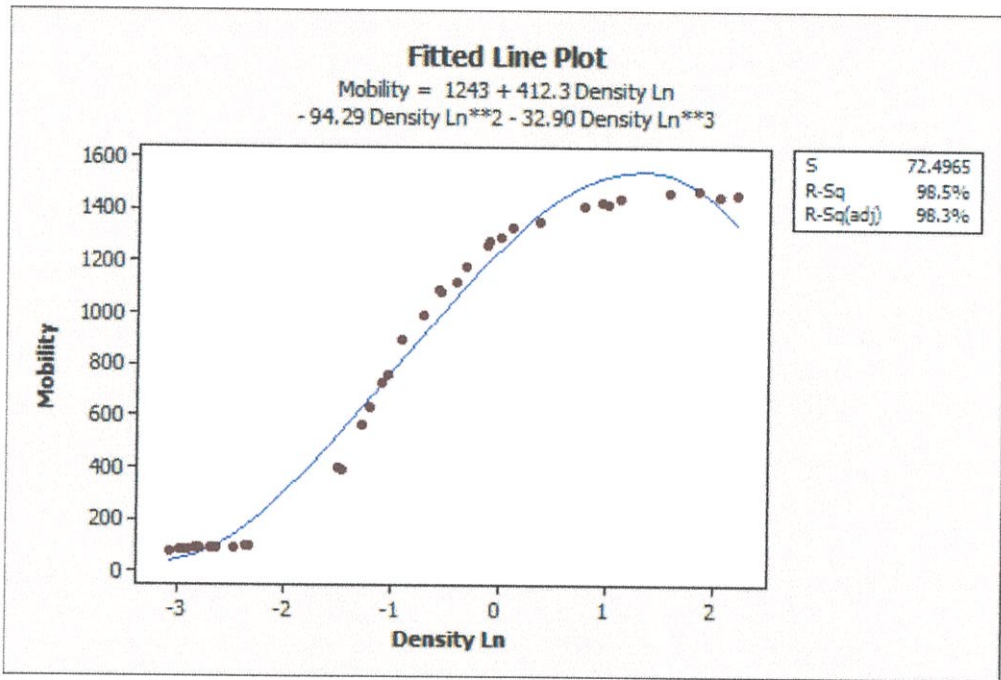
ถ้ากรณีที่มีค่า R-Squared มีค่าต่ำ แต่การทำนายมีนัยสำคัญทางสถิติ คุณยังสามารถใช้ผลสรุปว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวทำนายนี้เป็นแบบไหน จะทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นอย่างไร

และไม่ว่า R-Squared จะเป็นอย่างไร ค่าสัมประสิทธิ์ ในตัวแบบตัวใดที่มีนัยสำคัญ ก็ยังคงใช้ เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนองว่ามีจำนวนเท่าไร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวทำนาย (Predictor) 1 หน่วย (โดยที่ให้ค่าตัวทำนายที่เหลือมีค่าคงที่) ซึ่งถือว่าข้อมูลตรงนี้มีคุณค่าที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก ส่วนค่า R-Squared ที่มีค่าต่ำ จะเป็นปัญหาอย่างมากเมื่อต้องการทำนายค่าตัวแปรตอบสนองให้มีความแม่นยำของค่าที่มากขึ้น (ช่วงของการทำนาย (Prediction Interval) มีค่าช่วงไม่กว้างมากนัก)

ดังนั้นเพื่อให้การทำนายได้ผลอย่างเหมาะสม ค่า R-Squared ควรจะมีประมาณเท่าไร ? คำตอบก็ขึ้นอยู่กับว่าความต้องการของคุณ ที่อยากได้ช่วงของความกว้างของค่าที่ทำนายนั้นมีขนาด

ช่วงเท่าไร และความผันแปรที่จะมีในข้อมูลมีค่าเป็นเท่าไร เพราะค่า R-Squared ที่มีค่าสูงย่อมให้การทำนายค่าตัวแปรตอบสนองที่มีความแม่นยำสูงกว่า แต่เท่านี้อาจไม่เพียงพอ เพราะค่า R-Squared ที่มีค่าสูง อาจไม่ได้หมายความว่าตัวแบบที่ได้นั้นมีความสมรูปกับข้อมูลเป็นอย่างดี ซึ่งมีค่าตอบที่ซ่อนอยู่ดูจากแผนภาพเศษเหลือและแผนภาพของเส้นตัวแบบ ด้านล่างทั้ง 2 แผนภาพนี้

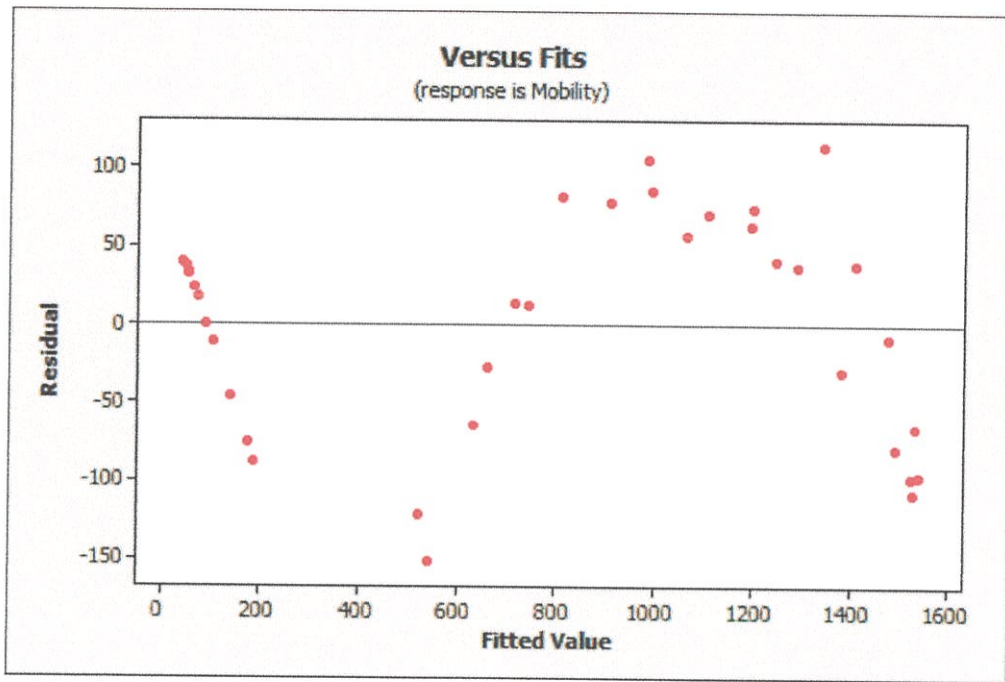
แผนภาพของเส้นตัวแบบ (Fitted Line Plot) เป็นแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Mobility ของอิเล็กตรอนในชั้นส่วน Semiconductor และค่า Natural Log (ln) ของ Density ที่เกิดขึ้นในการทดลอง



ภาพที่ 2.7 แสดงตัวแบบกับกลุ่มข้อมูล

จากแผนภาพจะเห็นได้ว่า ตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูล (ข้อมูลเรียงตัวอยู่บนเส้นสมการในแผนภาพ) และค่า R-Squared สูงถึง 98.5% ซึ่งถือว่าเป็นผลที่ดีมาก แต่ถ้าดูไปที่เส้นสมการถดถอยจะเห็นว่าในแต่ละช่วงของเส้นโค้ง จะมีความเบี่ยงเบน (Bias) ของข้อมูลอยู่ทั้งเหนือ และใต้เส้นโค้งตลอดช่วง

ซึ่งเมื่อพิจารณาที่แผนภาพเศษเหลือ (Residual Plot) จะเห็นได้ว่า ในแผนภาพเศษเหลือไม่แสดงรูปแบบ Random ของข้อมูล ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่าตัวแบบนั้นไม่ดี ดังนั้นทุกครั้งที่การวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจะต้องมีการวิเคราะห์แผนภาพเศษเหลือด้วยเสมอ



ภาพที่ 2.8 แสดงกลุ่มของข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้น

จากตัวอย่างนี้ จะเห็นได้ว่าการต้องเลือกระหว่างสมการถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ถ้าจะต้องนำมาพิจารณา คำตอบสำหรับตัวอย่างกรณีนี้คือ จะต้องมีการใช้ตัวแบบสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพราะว่าข้อมูลไม่สมรูปกับตัวแบบเชิงเส้นนั่นเอง

ค่า R-Squared ถือเป็นค่าที่นำมาใช้วัดว่าตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ แต่อย่างไรก็ตาม การมองเฉพาะค่า R-Squared อย่างเดียวอาจไม่สามารถตอบได้ว่าตัวแบบสมการนั้นเหมาะสมหรือไม่ แต่ต้องการการพิจารณาค่า R-Squared ร่วมกับการวิเคราะห์แผนภาพเศษเหลือ และตัวสถิติอื่นๆ

บทที่ 3

การหาแบบจำลองความหนาของน้ำยาเคลือบเลนส์

3.1 บทนำ

เลนส์ที่ถูกเคลือบด้วยน้ำยาที่มีความหนาต่างกัน ส่งผลทำให้มีคุณสมบัติทางแสงที่ต่างกัน ในการทดลองนี้จะนำเลนส์ที่ทราบความหนาของน้ำยาที่เคลือบไปวัดค่าการสะท้อนแสง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์ คือ ความเร็วรอบของการหมุนมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลือบเลนส์ ค่าความโค้งของเลนส์ และค่าการสะท้อนของแสง (%Reflectance) ของเลนส์ ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาความเป็นไปได้และแนวโน้มจากกลุ่มตัวอย่าง 2) ทำการเพิ่มขนาดของกลุ่มตัวอย่าง 3) วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการสะท้อนของแสงที่มีผลต่อความหนาของน้ำยา และวัดผลจากสูตรที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับความหนาที่วัดได้จากเครื่องมือวัดความหนาที่ใช้อยู่ในปัจจุบันในห้องปฏิบัติการ

3.2 การวัดค่าการสะท้อนแสงของเลนส์ ด้วย Spectrophotometer



ภาพที่ 3.1 Spectrophotometer ที่ใช้วัดค่าการสะท้อนแสงของเลนส์

สเปคโตรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้จำลองการวัดและในการทดลอง เพื่อหาค่าการสะท้อนแสงของเลนส์ที่แสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง (%Reflectance) ก่อนที่จะซื้ออุปกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานเหมือนกันแต่มีราคาที่ถูกกว่า สเปคโตรโฟโตมิเตอร์นี้เป็นเครื่องมือที่ถูกใช้งานอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ แต่ถูกใช้งานในหน้าที่อื่น การวัดเป็นแบบไม่สัมผัสกับชิ้นงาน ความยาวคลื่นที่เครื่องมือสามารถวัดได้คือ 175 ถึง 900 นาโนเมตร

3.3 การวัดความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนหน้าเลนส์โดยใช้อุปกรณ์ Filmetrics

Filmetrics คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดความหนาของชั้นฟิล์ม มีลักษณะการวัดเป็นแบบสัมผัสกับชิ้นงาน ปัจจุบันถูกใช้งานในห้องปฏิบัติการในการวัดความหนาของน้ำยาของเลนส์ที่ถูกสุ่มมาจากกระบวนการผลิต ซึ่งในการทดลองนี้จำเป็นต้องใช้เลนส์ที่รู้ค่าความหนาที่วัดได้จาก Filmetrics เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนแสงของเลนส์



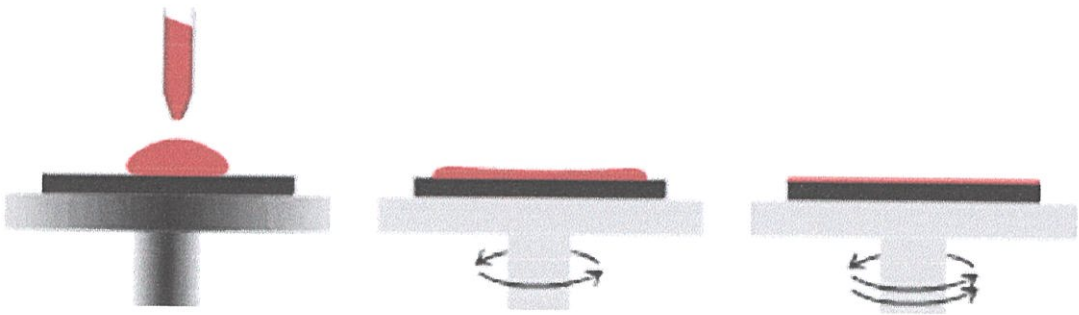
ภาพที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้วัดความหนาของชั้นฟิล์ม

3.4 เลนส์ที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่าง

ในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับวิธีที่ใช้ในการเคลือบ โครงสร้าง หรือค่าความโค้งของเลนส์ และชั้นของน้ำยาที่เคลือบ

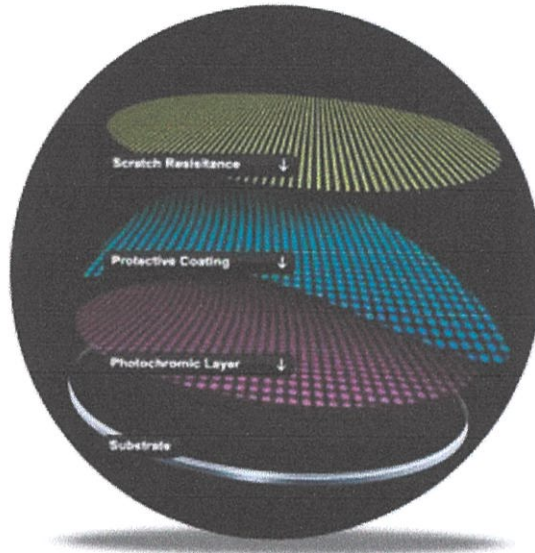
3.4.1 กระบวนการในการเคลือบเลนส์ (Spin Coating)

กระบวนการเคลือบเลนส์ของบริษัท Transition Optical Thailand Limited จะใช้เทคนิคการเคลือบแบบหมุนเลนส์ โดยเลนส์จะถูกวางลงบนจานหมุน และถูกฉีดด้วยน้ำยาตามชนิดที่ต้องการเคลือบ ความหนาของน้ำยาจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุน ยิ่งความเร็วของการหมุนมีมาก ความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์จะน้อยลง



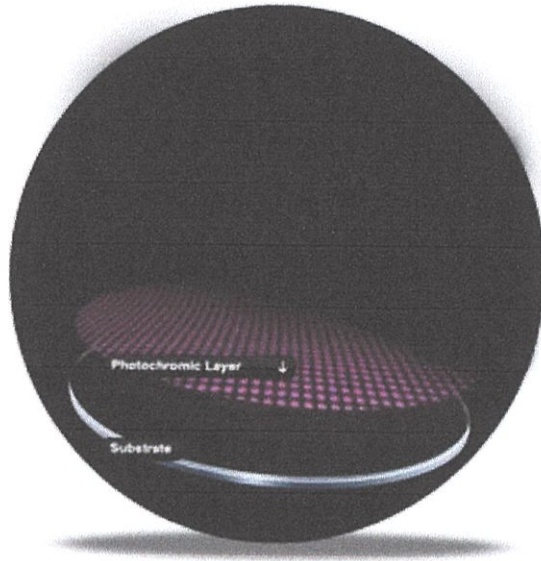
ภาพที่ 3.3 การเคลือบโดยวิธีการหมุน

3.4.2 ชั้นของน้ำยา



ภาพที่ 3.4 ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Transition Optical Thailand Limited

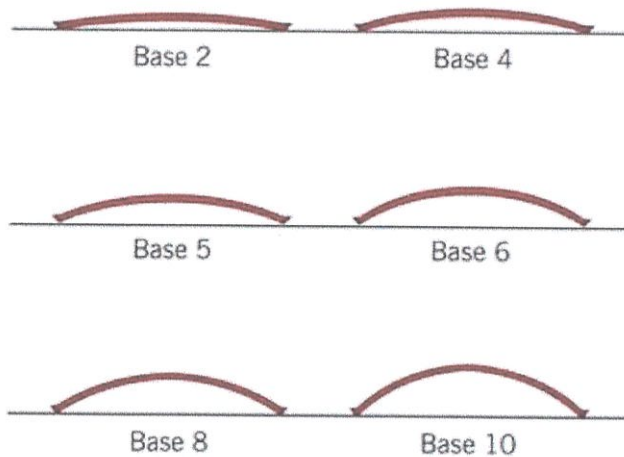
โดยปกติผลิตภัณฑ์ของบริษัททรานสิชั่นออปติคอลล จะมีการเคลือบเลนส์ด้วยกันทั้งหมด 3 ชั้น แต่สิ่งที่เราสนใจศึกษานั้นคือชั้นที่ถูกเคลือบเป็นลำดับแรก ซึ่งเป็นชั้นที่ทำหน้าที่ปรับความเข้มของเลนส์ตามสภาพแวดล้อม ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ชั้นของน้ำยาชั้นแรก

3.4.3 ค่าความโค้งของเลนส์ (Base Curve)

เลนส์ที่ถูกเคลือบจะมีความโค้งที่หลากหลายหรือเรียกว่า Base Curve ดังภาพที่ 3.6 ขึ้นอยู่กับการเลือกซื้อไปใช้งานของผู้บริโภค ซึ่งเทคโนโลยีการเคลือบแบบหมุนกับค่าความโค้งที่ต่างกันของเลนส์นี้ ส่งผลให้เลนส์ที่ถูกเคลือบด้วยความเร็วในการหมุนที่เท่ากันมีความหนาของน้ำยาที่เคลือบต่างกัน เช่น เลนส์ Base 2 กับ Base 10 ถูกเคลือบด้วยความเร็วในการหมุนเท่ากัน ผลที่ได้คือความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์ Base 2 จะมากกว่า Base 10 เพราะ Base 10 มีความโค้งมากกว่าทำให้น้ำยาไหลลงมาที่ขอบเลนส์ได้ดีกว่าเลนส์ที่มีค่าความโค้งน้อยกว่า



ภาพที่ 3.6 ค่าความโค้งของเลนส์และลักษณะโครงสร้างของเลนส์

เนื่องจากมีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงได้เลือกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองในกลุ่มที่มีการผลิตต่อปีสูงที่สุด ในที่นี้จะถูกเรียกแทนด้วยผลิตภัณฑ์ A

3.5 ทดลองหาความเป็นไปได้และแนวโน้มจากกลุ่มตัวอย่าง

ในส่วนของการเตรียมกลุ่มตัวอย่าง จะสร้างที่ความหนาต่างโดยปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาที่ทำการเคลือบกับค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง (%Reflectance) โดยกลุ่มหนึ่งเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความโค้งเดียวกัน

3.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์กับความเร็วรอบของการหมุน

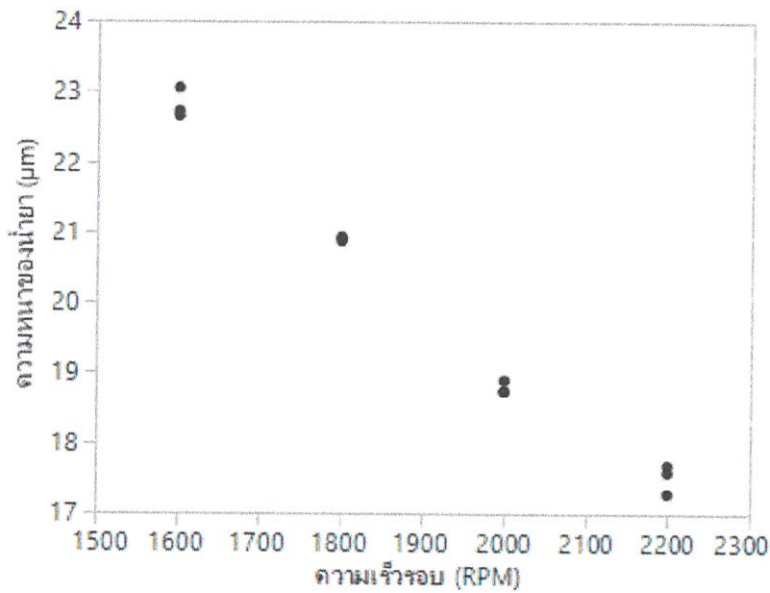
สร้างกลุ่มตัวอย่างโดยทำการเปลี่ยนตัวแปรของความเร็วรอบของการหมุนขึ้นงานเพื่อให้ได้กลุ่มของความหนาที่เคลือบเลนส์ต่างกัน จำนวน 4 กลุ่ม กลุ่มละ 3 เลนส์ หลังจากนั้นนำกลุ่มตัวอย่างเหล่านี้ไปทำการวัดค่าความหนาของการเคลือบน้ำยาโดยใช้เครื่องมือ Filmetrics จะได้ค่าดังตารางที่

3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงความหนาของเลนส์

กลุ่ม	ความเร็วรอบ (RPM)	ความหนาของน้ำยา (μm)		
		เลนส์ที่ 1	เลนส์ที่ 2	เลนส์ที่ 3
1	1600	17.28	17.58	17.68
2	1800	18.90	18.75	18.74
3	2000	20.93	20.87	20.90
4	2200	23.05	22.72	22.65

กลุ่มตัวอย่างเหล่านี้มีค่าความโค้งเท่ากัน แตกต่างกันเพียงความเร็วรอบของการหมุนที่ใช้ในการเคลือบ เพื่อศึกษาแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาและความเร็วรอบ



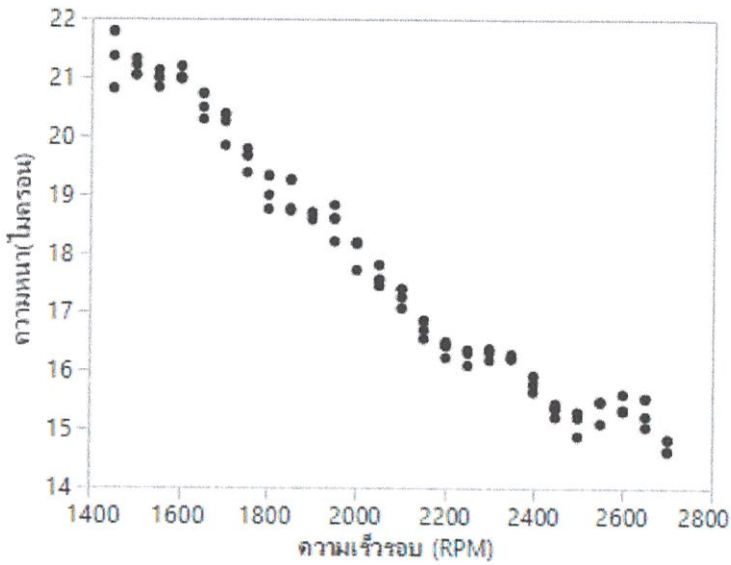
ภาพที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาน้ำยากับความเร็วรอบ

จากกราฟความหนาน้ำยากับความเร็วรอบในภาพที่ 3.7 พบว่าเมื่อความเร็วรอบในการหมุนเพิ่มขึ้น ความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์จะลดลง

เพื่อให้เห็นแนวโน้มและการเกาะกลุ่มของข้อมูลที่ชัดเจนขึ้น จึงทำการเพิ่มขนาดของกลุ่มตัวอย่าง โดยปรับพารามิเตอร์ความเร็วรอบของการหมุนที่ 1400, 1450, 1500 ถึง 2800 รอบต่อนาที โดยที่ค่าความเร็วรอบหนึ่งค่า จะมีเลนส์อยู่ 3 ชิ้น กลุ่มตัวอย่างจะมีทั้งหมด 26 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความหนาของกลุ่มตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนค่าความโค้งของเลนส์

กลุ่มที่	ความเร็วรอบ (RPM)	ความหนาของน้ำยาของสามเลนส์ต่อหนึ่งกลุ่ม (μm)		
1	1450	21.78	21.36	20.81
2	1500	21.04	21.21	21.32
3	1550	21.00	21.12	20.83
4	1600	21.00	21.19	20.97
5	1650	20.73	20.49	20.29
6	1700	20.38	20.25	19.84
7	1750	19.67	19.79	19.38
8	1800	19.33	19.00	18.76
9	1850	19.26	18.77	18.73
10	1900	18.70	18.58	18.63
11	1950	18.60	18.83	18.21
12	2000	18.19	18.17	17.72
13	2050	17.56	17.81	17.45
14	2100	17.40	17.25	17.06
15	2150	16.85	16.69	16.54
16	2200	16.42	16.49	16.22
17	2250	16.35	16.30	16.09
18	2300	16.37	16.31	16.18
19	2350	16.21	16.22	16.28
20	2400	15.91	15.77	15.64
21	2450	15.36	15.44	15.21
22	2500	15.29	15.20	14.88
23	2550	15.47	15.47	15.10
24	2600	15.33	15.60	15.31
25	2650	15.53	15.22	15.04
26	2700	14.83	14.64	14.62



ภาพที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเร็วน้ำยา

จากภาพที่ 3.8 พบว่าความเร็วน้ำยาที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดมีค่าลดลง มีความแปรปรวนเกิดขึ้นเล็กน้อยของข้อมูลในกราฟ เกิดจากกระบวนการผลิต เพราะความหนืดนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำยาที่มีผลกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะทำการผลิต และมีโครงการอื่นที่กำลังดำเนินอยู่แล้วในปัจจุบัน เพื่อลดความแปรปรวนของอุณหภูมิให้น้อยที่สุด ซึ่งผลที่เกิดจากอุณหภูมิจะไม่นำมาใช้ในการทดลองนี้

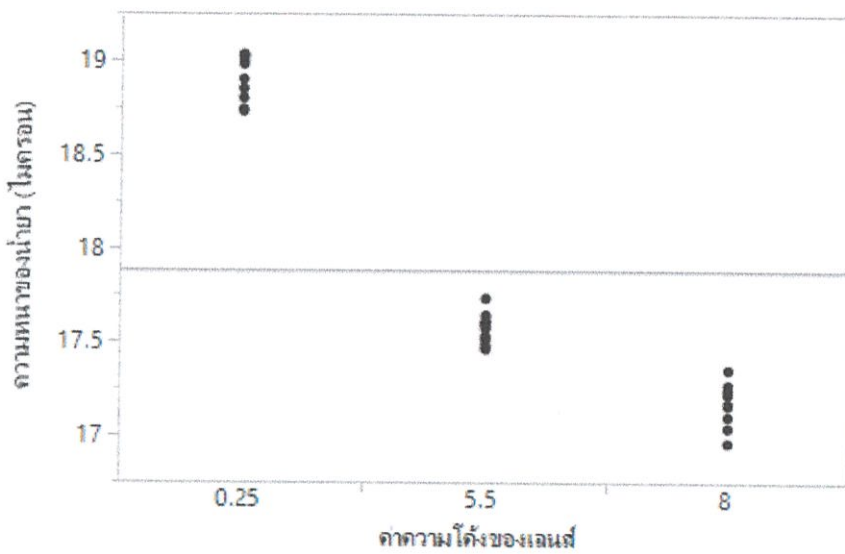
3.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์กับค่าความโค้งของเลนส์

ทำการสร้างกลุ่มตัวอย่างโดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 10 เลนส์ แต่ละกลุ่มจะมีค่าความโค้งต่างกัน และความเร็วรอบของการหมุนที่ใช้ในการเคลือบเท่ากันคือ 1,900 รอบ/นาที และนำไปวัดความหนาด้วยเครื่องมือ Filmetrics ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงกลุ่มตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนค่าความโค้งของเลนส์

ค่าความโค้งของเลนส์	ความหนาของน้ำยา (μm)	ค่าความโค้งของเลนส์	ความหนาของน้ำยา (μm)	ค่าความโค้งของเลนส์	ความหนาของน้ำยา (μm)
0.25	18.98	5.25	17.48	8.00	16.96
	19.02		17.59		17.24
	19.03		17.60		17.22
	18.90		17.46		17.17
	18.74		17.51		17.04
	18.85		17.73		17.35
	19.03		17.64		17.23
	18.80		17.61		17.10
	18.73		17.57		17.27
	19.00		17.53		17.16

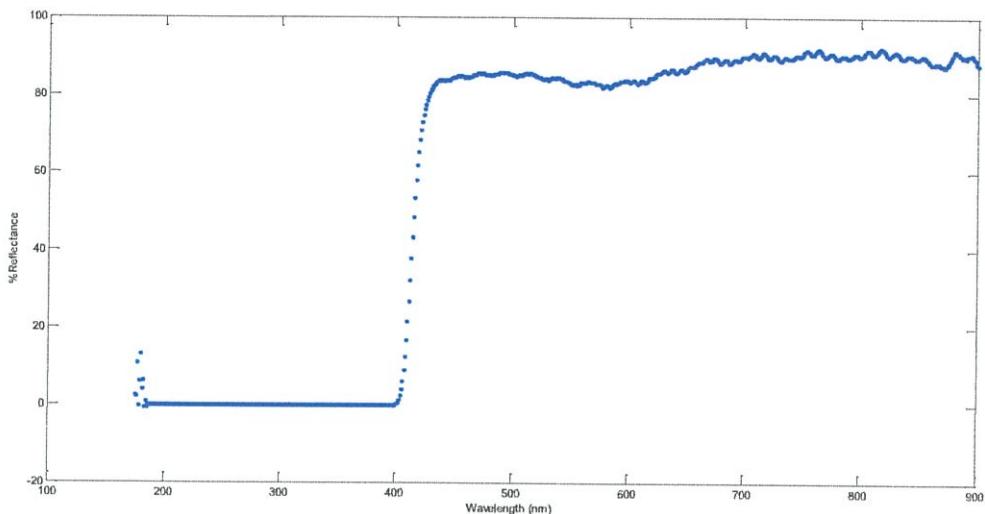
เมื่อพิจารณาความหนาของน้ำยาในแต่ละค่าความโค้งของเลนส์พบว่า ที่ค่าความโค้งเดียวกันจะมีค่าความหนาใกล้เคียงกันมากกว่าเลนส์ที่มีค่าความโค้งอื่นๆ



ภาพที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยากับค่าความโค้งของเลนส์

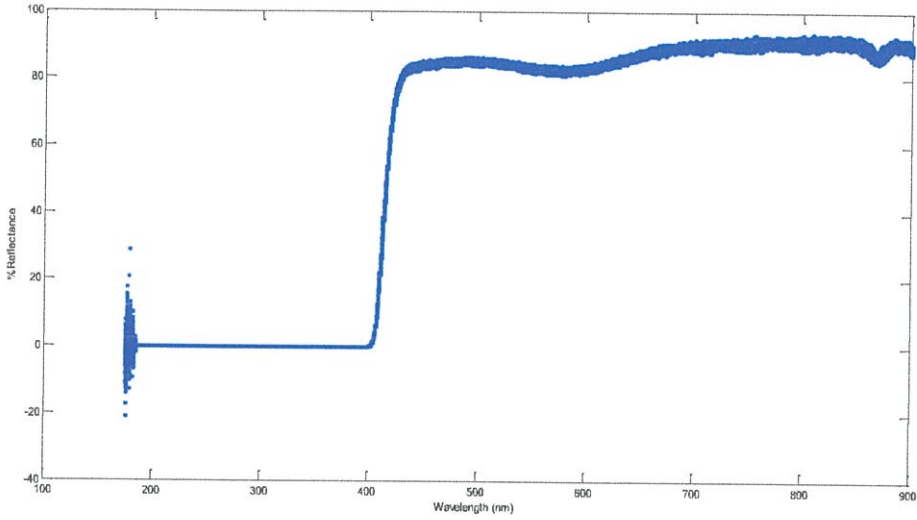
3.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์กับค่าสะท้อนของแสง (%Reflectance)

นำกลุ่มตัวอย่างจากตารางที่ 3.2 มาวัดค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง โดยวัดที่ความยาวคลื่น 175, 176, 177 ถึง 900 นาโนเมตร ตามที่เครื่องมือสามารถวัดได้



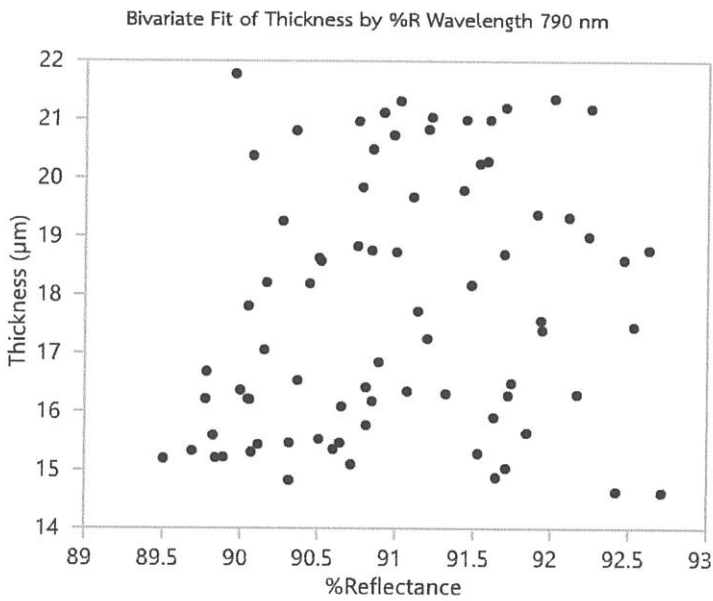
ภาพที่ 3.10 กราฟแสดงความยาวคลื่นกับ %Reflectance ของเลนส์ 1 ชั้น

จากภาพที่ 3.10 กราฟที่ได้เกิดจากการนำเลนส์ 1 ชั้น วัดด้วย Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 175 ถึง 900 นาโนเมตร จะสังเกตได้ว่าที่ความยาวคลื่น 175 – 400 นาโนเมตร มีค่า %Reflectance เท่ากับศูนย์ เพราะเป็นคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่สามารถดูดซับคลื่นอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นคือ 10-400 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 400 – 900 นาโนเมตร เป็นช่วงนี้เลนส์ยอมให้แสงผ่านได้ ดังนั้นเราจึงทำการศึกษาความยาวคลื่นในช่วงนี้ โดยการนำกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดมาวัดหาค่า %Reflectance แล้วนำมาสร้างกราฟในรูปเดียวกัน ภาพที่ 3.11

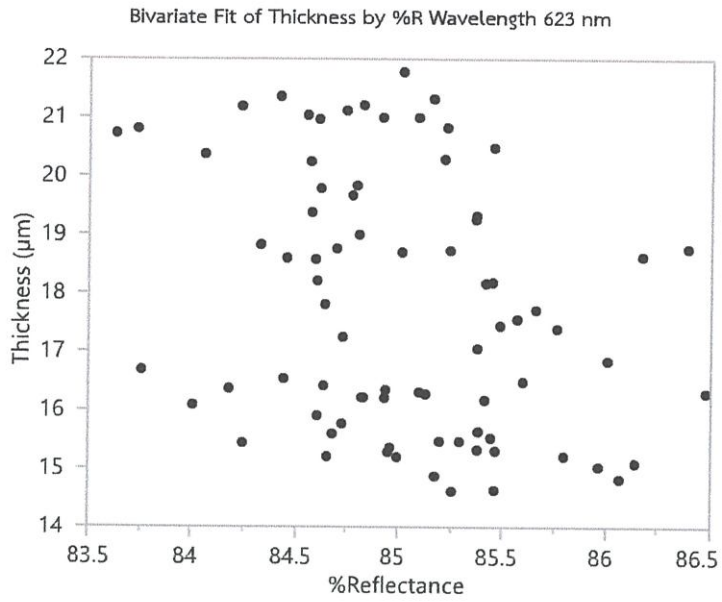


ภาพที่ 3.11 กราฟแสดงความยาวคลื่นกับ %Reflectance ของกลุ่มตัวอย่าง 72 เลนส์

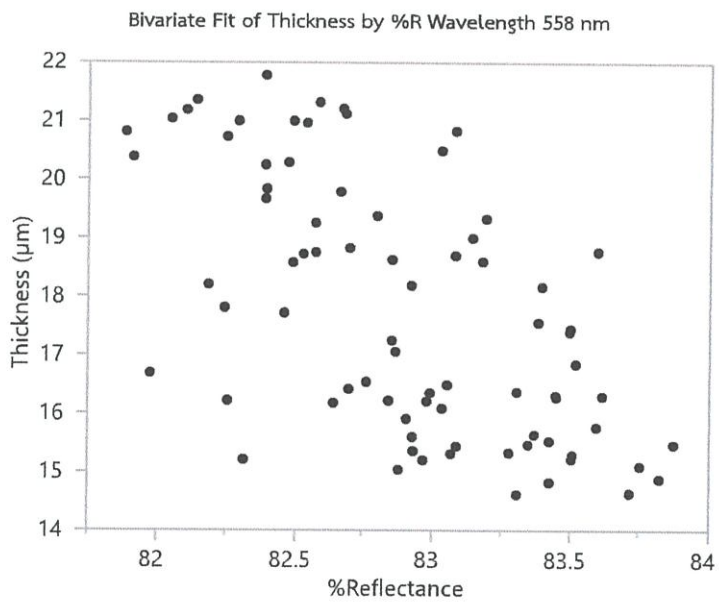
จากการสังเกตที่ความยาวคลื่น 401, 402, 403 ถึง 900 นาโนเมตร พบว่าที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ให้ลักษณะของข้อมูลที่เป็นเชิงเส้นที่สุด ภาพที่ 3.12(ก) ถึง 3.12(จ) แสดงตัวอย่าง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่นต่างๆ



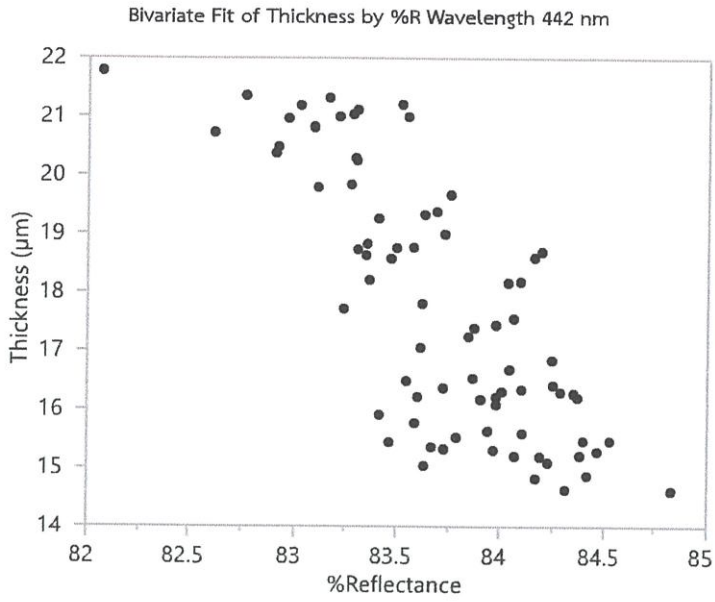
(ก) กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 790 นาโนเมตร



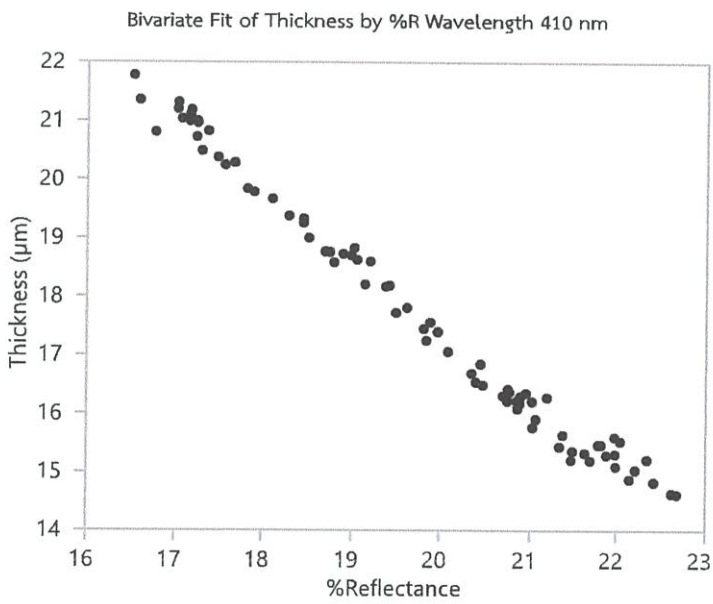
(ข) กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 623 นาโนเมตร



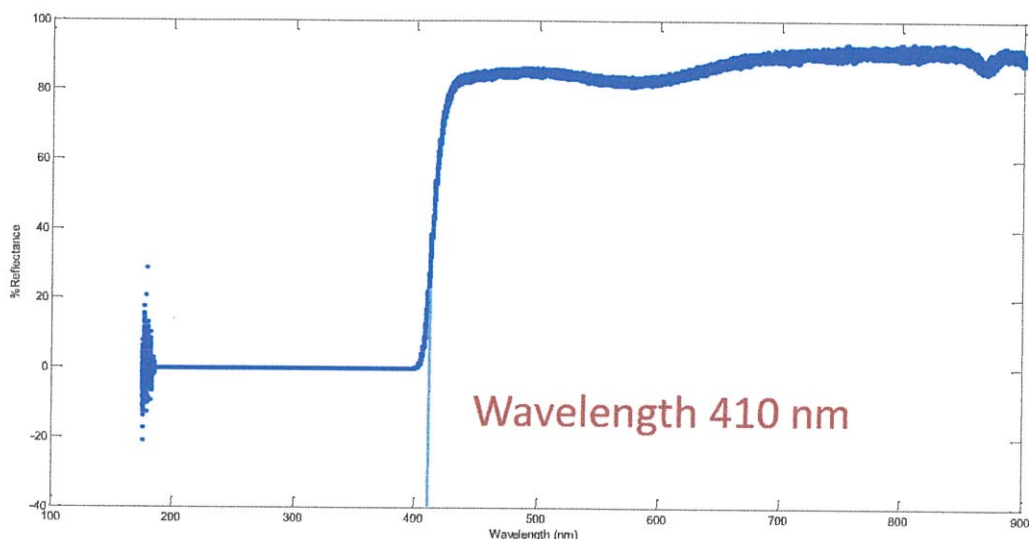
(ค) กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 558 นาโนเมตร



(ง) กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 442 นาโนเมตร



(จ) กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร
 ภาพที่ 3.12 กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่นต่างๆ



ภาพที่ 3.13 แสดงตำแหน่งของความยาวคลื่นที่ 410 นาโนเมตร

3.6 หาความสัมพันธ์ของค่าความโค้งของเลนส์ และการสะท้อนแสงที่มีผลความหนาของน้ำยา

ทำโดยการสร้างกลุ่มตัวอย่างที่มีค่าความโค้ง 1.25, 5.25 และ 8 โดยปรับความเร็วรอบของการหมุนเพื่อให้ น้ำยาที่เคลือบมีความหนาต่างกัน จากนั้นวัด %Reflectance ด้วย Spectrophotometer และวัดความหนาด้วยเครื่องมือ Filmetric แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 กลุ่มตัวอย่างที่ทำการเปลี่ยนค่าความความเร็วรอบในการเคลือบของเลนส์ที่ค่าความโค้ง 1.25 5.25 และ 8.00

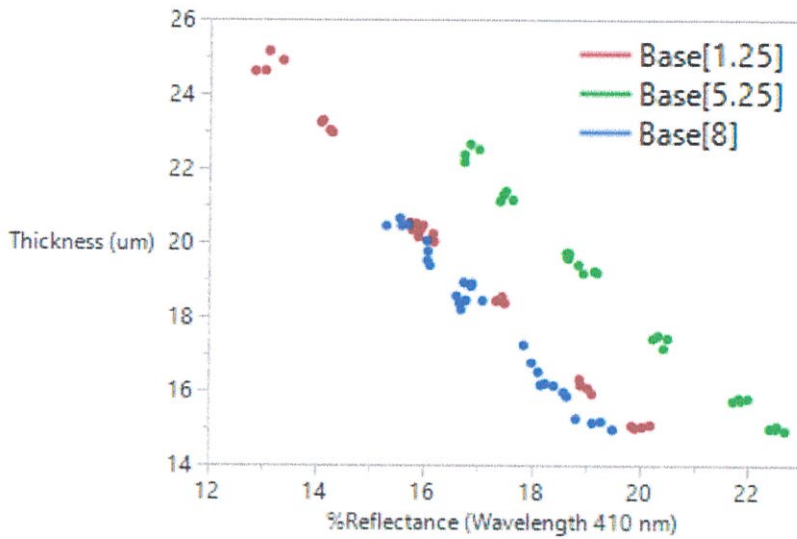
ค่าความโค้ง	ความเร็วรอบ (RPM)	ความหนาของน้ำยา (μm)			
		เลนส์ที่ 1	เลนส์ที่ 2	เลนส์ที่ 3	เลนส์ที่ 4
1.25	1400	24.9	24.61	24.62	25.15
1.25	1600	23.24	23.29	23.03	22.97
1.25	1800	20.52	20.33	20.5	20.15
1.25	2000	20.45	20.32	20.22	20.01
1.25	2200	18.43	18.42	18.36	18.53
1.25	2400	15.92	16.15	16.07	16.31
1.25	2600	15.06	15.03	15.08	15
5.25	1400	22.17	22.37	22.51	22.65
5.25	1600	21.27	21.13	21.1	21.37

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

ค่าความ โค้ง	ความเร็ว รอบ (RPM)	ความหนาของน้ำยา (μm)			
		เลนส์ที่ 1	เลนส์ที่ 2	เลนส์ที่ 3	เลนส์ที่ 4
5.25	1800	19.71	19.57	19.71	19.61
5.25	2000	19.23	19.4	19.17	19.19
5.25	2200	17.43	17.42	17.16	17.5
5.25	2400	15.74	15.8	15.72	15.79
5.25	2600	15.05	14.92	14.99	14.99
8.00	1400	20.44	20.46	20.64	20.44
8.00	1600	20.04	19.76	19.38	19.51
8.00	1800	18.2	18.38	18.44	18.56
8.00	2000	18.43	18.92	18.82	18.89
8.00	2200	17.24	16.75	16.5	16.15
8.00	2400	15.96	16.13	16.19	15.85
8.00	2600	15.25	14.96	15.14	15.17

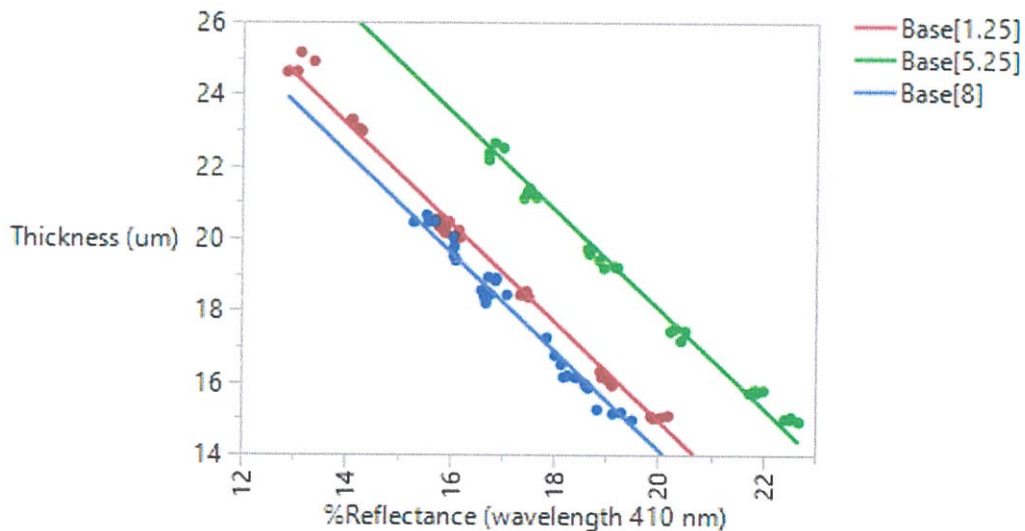
จากหัวข้อที่ 3.5.3 ทำให้ทราบว่าความยาวคลื่นที่ %Reflectance กับความหนาของน้ำยามีลักษณะเกาะกลุ่มค่อนข้างเป็นเชิงเส้น ในหัวข้อนี้จึงได้เลือกวิเคราะห์ผลของ %Reflectance ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร (ภาพที่ 3.12(จ)) และนำมาพล็อตกราฟรวมกันดังภาพที่ 3.14 โดยหนึ่งจุดแทนจำนวน 1 เลนส์ โดย สีน้ำแดง สีเขียว สีน้ำเงิน แทนเลนส์ที่มีค่าความโค้ง 1.25, 5.25 และ 8 ตามลำดับ

Bivariate Fit of Thickness by %Reflectance Wavelength 410 nm



ภาพที่ 3.14 กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ของเลนส์ที่มีค่าความโค้ง 1.25 5.25 และ 8.00

จากนั้นทำการ Fit Model โดยใช้คำสั่ง Linear Fit ในโปรแกรม JMP เพื่อหาสมการเส้นตรงของกราฟ %Reflectance กับความหนาของแต่ละ Base Curve ดังภาพที่ 3.14 และนำสมการไปใช้ในการคำนวณหาความหนาของน้ำยาจากค่า Reflectance ที่วัดได้



ภาพที่ 3.15 กราฟแสดง %Reflectance กับความหนาที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ของเลนส์ที่มีค่าความโค้ง 1.25 5.25 และ 8.00 โดยทำการหารูปแบบของสมการเส้นตรง

▲ Prediction Expression

$$43.162513664 + \text{Match}(\text{Base}) \begin{pmatrix} 1.25 \Rightarrow -0.760380925 \\ 5.25 \Rightarrow 2.3398392552 \\ 8 \Rightarrow -1.57945833 \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix} + -1.372860861 \cdot \%R$$

ภาพที่ 3.16 สูตรที่ได้จากการหารูปแบบสมการเส้นตรงของกราฟ %Reflectance กับความหนาของน้ำยาที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร

จากภาพที่ 3.16 คือสมการที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาของน้ำยาที่ถูกเคลือบบนเลนส์ โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงของเลนส์ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ที่วัดได้จากสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ และมีค่าความโค้งของเลนส์เป็นเงื่อนไขในการเลือกค่าคงที่ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณซึ่งค่าความโค้งในการทดลองนี้คือ 1.25 5.25 และ 8.00

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการทดลองสร้างกลุ่มตัวอย่าง เพื่อหาสมการเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์ที่ค่าความโค้งของเลนส์ต่างๆ และค่าการสะท้อนของแสง ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 แล้วนั้น ในบทนี้เป็นการทดสอบความผิดพลาดของการหาความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์ที่คำนวณได้จากสมการเชิงเส้น โดยการนำเลนส์ที่ผ่านกระบวนการเคลือบน้ำยาแล้ว มาวัดค่าการสะท้อนแสง (%Reflectance) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer แล้วแทนค่าการสะท้อนแสง ในสมการเพื่อหาความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์นั้น จากนั้นนำเลนส์ชิ้นเดียวกันไปวัดความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์ด้วยเครื่อง Filmetrics ผลการทดสอบและการเปรียบเทียบความหนาของน้ำยาที่เคลือบที่ค่าความโค้งต่างๆของเลนส์แสดงดังตารางที่ 4.1

Prediction Expression

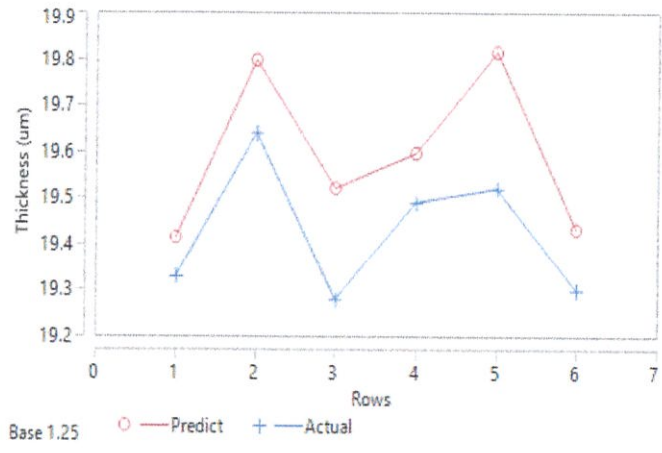
$$43.162513664 + \text{Match}(\text{Base}) \begin{pmatrix} 1.25 \Rightarrow -0.760380925 \\ 5.25 \Rightarrow 2.3398392552 \\ 8 \Rightarrow -1.57945833 \\ \text{else} \Rightarrow . \end{pmatrix} + -1.372860861 \cdot \%R$$

ภาพที่ 4.1 สมการเชิงเส้นสำหรับคำนวณความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์

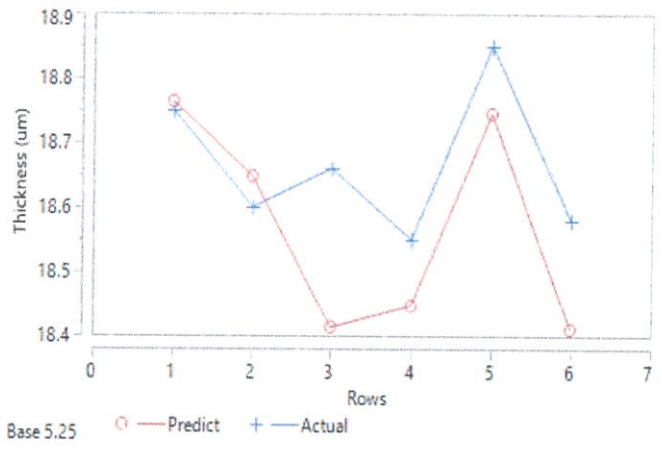
จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าความแตกต่างของความหนาน้ำยาที่เคลือบเลนส์ที่วัดด้วยเครื่อง Fil-metrics และที่คำนวณได้จากสมการ มีค่าน้อยกว่า 0.3 μm แสดงว่าสมการเชิงเส้นสามารถนำมาใช้งานได้จริง กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบความหนาของน้ำยาที่วัดด้วยเครื่อง Filmetrics และที่คำนวณได้จากสมการแสดงดังภาพที่ 4.2 โดยกำหนดให้สีแดงแทนผลการวัดเครื่อง Filmetric และสีน้ำเงินแทนค่าได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบระหว่างความหนาของน้ำยาที่คำนวณได้จากสมการเชิงเส้น
และความหนาของน้ำยาที่วัดด้วยเครื่อง Filmetrics

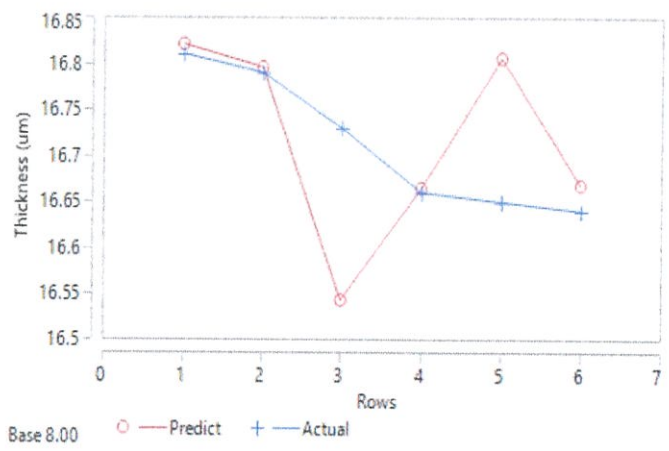
ค่าความโค้ง ของเลนส์	ความหนาที่วัดได้จาก Filmetrics (μm)	ความหนาที่คำนวณได้ จากสมการเชิงเส้น (μm)	Diff(μm)
1.25	19.33	19.41	-0.08
	19.64	19.80	-0.16
	19.28	19.52	-0.24
	19.49	19.60	-0.11
	19.52	19.81	-0.29
	19.30	19.43	-0.13
5.25	18.75	18.76	-0.01
	18.60	18.65	-0.05
	18.66	18.41	0.25
	18.55	18.45	0.10
	18.85	18.74	0.11
	18.58	18.41	0.17
8.00	16.81	16.82	-0.01
	16.79	16.80	-0.01
	16.73	16.54	0.19
	16.66	16.66	0.00
	16.65	16.81	-0.16
	16.64	16.67	-0.03



(ก) เลนส์ที่มีค่าความโค้ง 1.25



(ข) เลนส์ที่มีค่าความโค้ง 5.25



(ค) เลนส์ที่มีค่าความโค้ง 8.00

ภาพที่ 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความหนาของน้ำยาที่ได้จากการคำนวณ และที่ได้จากเครื่อง Filmetrics ที่ค่าความโค้ง 1.25 5.25 และ 8.00

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการหาสมการเชิงเส้นที่ใช้คำนวณหาความหนาของน้ำยาที่เคลือบบนเลนส์ โดยการใช้ค่าการสะท้อนแสงที่วัดโดย Spectrophotometer จากการทดลองวัดความหนาของน้ำยาที่เคลือบเลนส์ด้วยเครื่อง Filmetrics เปรียบเทียบกับความหนาที่ได้จากการคำนวณพบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก สามารถยอมรับได้ การหาสมการเชิงเส้นได้เลือกที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร เนื่องจากข้อมูลมีการเกาะกลุ่มคล้ายเชิงเส้นจึงใช้ข้อมูลที่มีความยาวคลื่นนี้ในการหาสมการเชิงเส้น

การตรวจวัดความหนาของฟิล์มชั้นแรกซึ่งเป็นชั้นป้องกันแสงยูวี ในปัจจุบันนี้ยังไม่สามารถตรวจวัดในกระบวนการผลิตได้ในทันทีหลังจากที่เลนส์ถูกเคลือบด้วยน้ำยา แต่ต้องผ่านกระบวนการอบให้เลนส์แห้งก่อนจึงจะวัดความหนาของน้ำยาได้ เครื่องตรวจวัดความหนาของฟิล์มที่ติดตั้งอยู่ในกระบวนการผลิตที่ใช้อยู่ปัจจุบันนี้ใช้วิธีสัมผัสกับเลนส์ การตรวจวัดความหนาจึงใช้วิธีการสุ่มตรวจ ทำให้ไม่ครอบคลุมทุกผลิตภัณฑ์ และมีราคาค่อนข้างสูงประมาณ 1.2 ล้านบาทต่อเครื่อง ผู้จัดทำได้รับมอบหมายให้หาวิธีตรวจวัดความหนาของน้ำยาแบบไม่สัมผัสกับเลนส์ หลังจากเลนส์ถูกเคลือบ เพื่อปรับแต่งความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้เคลือบน้ำยาให้เหมาะสม ทันที และเป็นการลดต้นทุนค่าน้ำยาเคลือบเลนส์และของเสียที่เกิดขึ้นหลังการอบแห้งอีกด้วย สำหรับเครื่องวัดความหนาที่ใช้ในโครงการนี้มีราคาประมาณ 5 หมื่นบาทต่อเครื่อง

ตารางที่ 5.1 ความหนาของฟิล์มชั้นแรกกับปริมาณน้ำยาที่ใช้ต่อหนึ่งเลนส์

ความหนา (μm)	ปริมาณน้ำยา (g)
16.0	0.2147
16.5	0.2253
17.0	0.2358
17.5	0.2464
18.0	0.2570
18.5	0.2676
19.0	0.2782
19.5	0.2888

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

ความหนา (μm)	ปริมาณน้ำยา (g)
20.0	0.2994
20.5	0.3100

จากตารางที่ 5.1 จะพบว่าความหนาของชั้นฟิล์มมีความแตกต่างกัน 0.5 ไมครอน ต้องการปริมาณน้ำยาเคลือบเลนส์เพิ่มขึ้น 0.0106 กรัมต่อหนึ่งเลนส์ หรือคิดเป็นเงิน 0.0378 บาทต่อหนึ่งเลนส์ หากทำการลดความหนาของผลิตภัณฑ์ A ลง 0.5 ไมครอน จาก 18.5 ไมครอน เป็น 18 ไมครอน ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ซึ่งผลิตภัณฑ์ A ถูกผลิตปีละประมาณ 18 ล้านเลนส์ จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในเรื่องของการลดปริมาณน้ำยาที่ใช้เคลือบได้ประมาณ 6 ล้านบาทต่อปี

5.2 ข้อเสนอแนะ

บริษัทควรสั่งซื้ออุปกรณ์ ในภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่ควรจัดซื้อมาใช้สำหรับการวิจัยในอนาคต

จากการทดลองในกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ A เพื่อตรวจสอบสมการคำนวณหาค่าความหนาของน้ำยาเคลือบเลนส์ และเพื่อให้การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เคลือบน้ำยาได้ทันที่และเหมาะสมกับความโค้งของเลนส์ ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นควรขยายผลการทดลองโดยการเพิ่มกลุ่มตัวอย่างให้มากขึ้น ทั้งนี้ก็เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการคำนวณหาค่าความหนาของน้ำยาเคลือบเลนส์ และเพื่อเตรียมการจัดซื้อเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ที่แสดงในภาพที่ 5.1 ต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 2 (ประมวลผลด้วย MINITAB). กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [2] สุรศักดิ์ เชียงกา. **ทศนศาสตร์เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] รศ.ดร.สมบัติ พุทธิจักร. **คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี**.
- [4] Regression Analysis. [Online]. Available:
<http://solutioncenterminitab.com/web2014/web/html/blogs/CaseStudy3.pdf>
- [5] สมบัติเชิงแสงของวัสดุ. [Online]. Available :
physics.science.cmu.ac.th/courses/210351/Large%205.pdf

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายวัฒนชัย ม่วงเงิน

วัน เดือน ปีเกิด 1 พฤศจิกายน 2537

ที่อยู่ 59/1 หมู่ 10 ตำบลหนองยาง อำเภอหนองฉาง จังหวัดอุทัยธานี 61110

Email aiwattanachai@gmail.com

โทรศัพท์ 086-4645727

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2553 – 2555 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนหนองฉางวิทยา
- พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนก Sale Engineer และ Service Engineer บริษัท Endress+Hauser (Thailand) Ltd.
- นักศึกษาโครงการสหกิจศึกษา แผนก Technology Process Engineer บริษัท Transition Optical (Thailand) Ltd.