บทที่ 3

ขั้นตอนการออกแบบระบบการวัดอนุภาคต่าง ๆบนพื้นผิวเรียบ โดยใช้หลักการกระเจิงแสง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบระบบตรวจวัดอนุภาคทั้งขนาดและ ชนิดต่างๆ บนพื้นผิวเรียบ โดยมีขั้นตอนการออกแบบระบบที่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการนำแนวความคิดของงานวิจัยอื่นมาพิจารณา เพื่อยืนยันหลักการกระเจิงแสงที่ สามารถหาอนุภาคต่างๆได้จริงโดยทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรม MIST หลังจากนั้นได้ทำการ ออกแบบและสร้างระบบวัดหาอนุภาคบนพื้นผิวเรียบ โดยยึดหลักการสร้างแบบจำลองการกระเจิง แสงของ BRDF ที่อาศัยโปรแกรม MIST โดยทำการปรับเปลี่ยน 3 ตัวแปรหลัก คือ มุมตกกระทบ (θ_i) มุมการกระเจิง(θ_s) และมุมอชิมุต (φ_s) เพื่อหาค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคในแต่ ละชนิดที่มีขนาดแตกต่างกันและให้ค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่เหมาะสมขัดเจนกับงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ระบบนี้ยังสามารถนำไปปรับเปลี่ยนเพื่อตรวจวัดหาอนุภาคที่ขนาดและชนิดอื่นๆได้ โดย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงจากงานวิจัยอื่นกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงของงานวิจัยอื่นๆ กับผลแบบจำลอง BRDF ในโปรแกรม MIST เพื่อนำไปสู่การออกแบบสร้างระบบที่สามารถวัดหาชนิดและขนาดของ อนุภาคต่างๆได้ โดยอาศัยเทคนิคเชิงแสงคือ การนำค่าความเข้มการกระเจิงแสงมาอธิบาย ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแล้วยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการพิสูจน์และทดลองจริง โดยมี รายละเอียดดังนี้

- งานวิจัยของ Yuzo MORI และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาและสร้างระบบวัดอนุภาคบน พื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีค่าดัชนีหักเห 1.5 กับขนาดอนุภาคในช่วง 1 ถึง 30 นาโนเมตร ชนิด Ag, Au, SiC, Al₂O₃ และSiO₂ [5] รวม 5 ชนิด และมีค่าดัชนีหักเหของอนุภาค 0.23, 0.28, 2.64, 1.76 และ1.45 ตามลำดับรวม 5 ชนิด และความยาวคลื่นแสงตกกระทบ 488 นาโนเมตร โดยใช้ทฤษฎี การกระเจิงแสงในรูปแบบของเรย์ไล [13] (Rayleigh Scattering Theory) มาวิเคราะห์ ซึ่งมีผลการ ทดลองคือ วัดผลรวมเฉลี่ยของค่าความเข้มการกระเจิงแสงโดยรอบอนุภาคทั้ง 5 ชนิดเปรียบเทียบ กับขนาดของอนุภาคในช่วง 1 ถึง 30 นาโนเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์อยู่กับขนาดและ ชนิดของอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ระบบวัดอนุภาคบนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ของ Yuzo MORI [6]



รูปที่ 3.2 (ก) ผลแบบจำลอง BRDF_{part} เทียบกับ (ข) ผลทดลองของงานวิจัย Yuzo MORI [6]

- งานวิจัยของ David W. Hahn [10] ได้ทดลองในรูปแบบของการกระเจิงแสงบนอนุภาค ขนาด 1.7 ไมโครเมตร ที่อนุภาคลักษณะเป็นทรงกลม ค่าดัชนีหักเห 1.4 และมุมการกระเจิงแสง ในช่วง 0 ้ ถึง 180 ้ กับมุมตกกระทบในแนวตั้งทำมุม θ, เท่ากับ 90 ้ กับความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร โดยใช้ทฤษฎีการกระเจิงแสงในรูปแบบของไมล์ [13] (Mie Scattering Theory) มา วิเคราะห์ โดยมีผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 (ก) ผลแบบจำลอง BRDF_{par} เทียบกับ (ข) ผลทดลองของงานวิจัย David W. Hahn [10]

จากรูปที่ 3.3 สรุปได้ว่าผลที่ได้ทั้งสองมีรูปแบบการกระเจิงแสงในช่วงมุม 0° ถึง 180°ที่ เหมือนกัน และค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่น้อยที่สุดตกอยู่ในมุมการกระเจิงแสงที่ 90° - งานวิจัยของ A.R. Jones [9] ได้ทำการศึกษารวบรวมการกระเจิงแสงโดยใช้รูปแบบการ กระเจิงแสงแบบเรย์ไล และแบบไมย์ในการวัดหาขนาดของอนุภาคที่ค่าพารามิเตอร์ (α)

เปรียบเทียบกับค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่มุม 0°ถึง 180 °โดยมีรายละเอียดดังนี้ จากรูปที่ 3.4 (ก)และ(ข) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลแบบจำลองและผลงานวิจัยโดยทั้งสองมี ค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 532 นาโนเมตร และค่าพารามิเตอร์ α เท่ากับ 0.01 หรือกล่าวอีกอย่าง หนึ่งได้ว่าขนาดของอนุภาค (D) เท่ากับ (λα)/(π) คือ (0.532x0.01)/3.14 ได้ค่าเท่ากับ 0.00169 ไมโครเมตร ส่วนมุมตกกระทบในแบบจำลองนี้ใช้มุมที่ 89°ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่หามาได้จาก การทดลองและยืนยันว่าผลค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอัตราส่วนระหว่างมุมใดๆ: I_{sac}(θ) กับ มุมการกระเจิงที่ 0°: I_{sac}(0) ได้ตรงกันทั้งมุมตั้งฉาก (90°) กับมุมขนาน(0°) ของแสงที่ตกกระทบ



รูปที่ 3.4 (ก) ผลแบบจำลอง BRDF_{part} เทียบกับ (ข) ผลทดลองของงานวิจัย A.R. Jones [9]

สรุปผลได้ว่า กราฟทั้งสองที่ค่าความเข้มแสงกับมุมการกระเจิงแสงที่ $\alpha = 0.01$ ค่าดัชนี หักเห n = 1.33 มีความสอดคล้องกัน โดยมี อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงกับค่าความ เข้มที่ตกกระทบสูงสุดที่ค่าเท่ากับ 1 ที่มุมการกระเจิง 0° และที่มุม 180° และให้ค่าต่ำสุดที่ค่า เท่ากับ 0 ที่มุมการกระเจิงที่ 90° ของผลจากแบบจำลองให้ค่าเช่น เดียวกับผลการวิจัยที่ได้รับการ ตีพิมพ์ว่าถูกต้อง

จากรูปที่ 3.4 (ค)และ(ง) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลแบบจำลองและผลงานวิจัยโดย ทั้งสองมีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 532 นาโนเมตร และค่าพารามิเตอร์ α เท่ากับ 5 หรือกล่าวอีก อย่างหนึ่งว่าขนาดของอนุภาค (D) เท่ากับ (λα)/(π) คือ (0.532x5)/3.14 ได้ค่าเท่ากับ 0.85 ไมโครเมตร ส่วนมุมตกกระทบในแบบจำลองนี้ใช้มุมที่ 89[°] ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่หามาได้จาก การทดลองและยืนยันว่าผลเป็นไปในทำนองเดียวกันกับกรณีแรก คือ ลอการิทึมของค่าความเช้ม การกระเจิงแสงของอัตราส่วนระหว่างมุมใดๆ: I_{sac}(θ) กับมุมการกระเจิงที่ 0[°]: I_{sac}(0) ได้ตรงกันทั้ง มุมตั้งฉาก (90[°]) กับมุมขนาน (0[°]) ของแสงที่ตกกระทบ



รูปที่ 3.4 (ค) ผลแบบจำลอง BRDF_{nat} เทียบกับ (ง) ผลทดลองของงานวิจัย A.R. Jones [9]

สรุปผลได้ว่า กราฟทั้งสองที่ค่าความเข้มแสงกับมุมการกระเจิงแสงที่ α = 5 ค่าดัชนีหักเห n = 1.33 มีรูปแบบของค่าการกระเจิงที่มุมต่างๆ มีความสอดคล้องกันโดยมี อัตราส่วนระหว่างค่า ความเข้มการกระเจิงกับค่าความเข้มที่ตกกระทบ ที่มุมการกระเจิงทุกๆมุมตั้งแต่มุม 0° ถึงที่ 180° มีค่าเท่ากันตลอดทั้งหมด

จากรูปที่ 3.4 (จ)และ(ฉ) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลแบบจำลองและผลงานวิจัยโดยทั้ง สองมีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 532 นาโนเมตร และค่าพารามิเตอร์ α เท่ากับ 20 หรือกล่าวอีก อย่างหนึ่งว่าขนาดของอนุภาค (D) เท่ากับ (λα)/(π) คือ (0.532x20)/3.14 ได้ค่าเท่ากับ 3.4 ไมโครเมตร ส่วนมุมตกกระทบในแบบจำลองนี้ใช้มุมที่ 89° ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่หามาได้จาก การทดลองและยืนยันว่าผลที่ได้เหมือนกับทั้ง 2 กรณีข้างต้น



รูปที่ 3.4 (จ) ผลแบบจำลอง BRDF_{par} เทียบกับ (ฉ) ผลทดลองของงานวิจัย A.R. Jones [9]

สรุปผลได้ว่า กราฟทั้งสองที่ค่าความเข้มแสงกับมุมการกระเจิงแสงที่ α = 20 ค่าดัชนีหัก เห n = 1.33 มีรูปแบบของค่าการกระเจิงที่มุมต่างๆ มีความสอดคล้องกัน โดยมีอัตราส่วนระหว่าง ค่าความเข้มการกระเจิงกับค่าความเข้มที่ตกกระทบที่มุมการกระเจิงทุกๆมุมตั้งแต่มุม 0 ถึงที่ 180 มีค่าเท่ากันตลอดทั้งหมดนอกจากนี้ยังมีลักษณะรายละเอียดความเป็นรูปแบบของการ กระเจิงแบบไมย์ที่มากกว่า α = 5



รูปที่ 3.4 (ช) ผลแบบจำลอง BRDF_{part} เทียบกับ (ซ) ผลทดลองของงานวิจัย A.R. Jones [9]

สรุปผลได้ว่า กราฟทั้งสองที่ค่าความเข้มแสงกับมุมการกระเจิงแสงที่ α = 20 ค่าดัชนีหัก เห n = 1.33 กับ n = 1.33 –i0.1มีรูปแบบของค่าการกระเจิงที่มุมต่างๆ มีความสอดคล้องกัน โดยมี อัตราส่วนระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงกับค่าความเข้มที่ตกกระทบ ที่มุมการกระเจิงทุกๆมุม ตั้งแต่มุม 0 ถึงที่ 180 มีค่าเท่ากันตลอดทั้งหมดนอกจากนี้ยังมีลักษณะรายละเอียดความเป็น รูปแบบของการกระเจิงแบบไมย์ที่มากกว่า α = 5 และแสดงรูปแบบของค่าดัชนีหักเห (n) ที่ แตกต่างกันโดย ค่า n = 1.33–i0.1 มีค่าความลาดชันมากกว่า n = 1.33

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่าผลการจำลองของโปรแกรม MIST ที่ใช้หลักการ ของ BRDF ให้ผลที่สัมพันธ์และสอดคล้องกับผลงานวิจัยทั้ง 3 งาน และสามารถนำแนวความคิด เหล่านี้ไปออกแบบในการสร้างเครื่องต้นแบบการวัดอนุภาคต่างๆบนพื้นผิวเรียบโดยใช้หลักการ กระเจิงแสงได้ ส่วนในการออกแบบระบบต้นแบบการวัดอนุภาคของงานวิจัยนี้ได้แบ่งขนาดอนุภาค ออกเป็น 3 ช่วงขนาด คือ

- 1. ขนาดเล็ก 1 10 nm
- 2. ขนาดกลาง 0.2 0.6 μm
- 3. ขนาดใหญ่ 250 5000 μm

สำหรับเครื่องต้นแบบที่จะใช้ในงานจริง (โรงงานผลิตฮาร์ดดิสไดร์ฟกำหนด)สามารถวัด ขนาดของอนุภาคในช่วงที่ 2 คือ ขนาดกลาง 0.2 - 0.6 μm แต่อนุภาคในช่วงที่ 2 นี้มีขนาดเล็กมาก และไม่สามารถควบคุมปริมาณและตำแหน่งเพื่อใช้ในการทดลองได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างอนุภาคขนาด 2, 10, 20 μm ที่นำมาทดลองต้องสามารถระบุตำแหน่งได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้หาวิธีการในการออกแบบต้นแบบการวัดอนุภาคโดยใช้ขนาดอนุภาคที่ สามารถระบุตำแหน่งและปริมาณของอนุภาคได้มาใช้ในการทดลองดังมีขั้นตอนดังนี้

ในระบบการวัดอนุภาคนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ แหล่งกำเนิดความยาวคลื่น (เลเซอร์) ซึ่งมีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.6328 ไมโครเมตร ที่ให้แสงสีแดงและเป็นแสงตกกระทบ ้สำหรับงานวิจัยนี้ ส่วนที่สองมีอุปกรณ์ตรวจจับค่าความเข็มแสง ใช้เป็นโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ พิน ที่เลือกเฉพาะย่านความยาวคลื่นแสงในช่วง 0.620 - 0.700 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับการวัด ในย่านความยาวคลื่นในช่วงแสงสีแดง ทำหน้าที่เป็นตัววัดค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนพื้นผิวที่ มือนุภาคโดยเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และส่วนสุดท้าย คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลง ้สัญญาณทางไฟฟ้าให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณดิจิตอลและขยายระดับสัญญาณที่ได้ให้สูงขึ้น (DAQ: Data Acquisition board) โดยสามารถวิเคราะห์และบันทึกค่าที่ได้จากการตรวจวัด ้ตัวอย่างอนุภาคในแต่ละชนิดที่มีขนาดแตกต่างๆกันและอยู่บนพื้นผิวเรียบได้ นอกจากนี้ยังได้นำ แนวความคิดในงานวิจัยของ David W. Hahn [10], Yuzo MORI และคณะ [6], และงานวิจัยของ A.R. Jones [9] มาเปรียบเทียบกับผลแบบจำลอง BRDF โดยอาศัยโปรแกรม MIST เพื่อหา มุมตก กระทบ ($heta_i$) มุมการกระเจิง (hetas) และมุมอซิมุต (ϕ_s) ที่เหมาะสมตามรูปแบบการกระเจิงแสงบน อนุภาคชนิดและขนาดต่างๆ แล้วเปรียบเทียบกับทฤษฎีการกระเจิงแสงแบบไมย์ (Mie scattering) และการกระเจิงแสงแบบเรย์ไล (Rayleigh scattering) เพื่อยืนยันความสอดคล้องกันเพื่อนำไปสู่ แนวทางการออกแบบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป ซึ่งสามารถแสดงระบบตรวจวัดอนุภาค ชนิดและขนาดต่างๆบนพื้นผิวส่วนประกอบฮาร์ดดิสไดร์ฟ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบการวัดอนุภาคที่ถูกออกแบบไว้โดยใช้หลักการกระเจิงแสง ($m{\phi}_{
m s}$ = 0 \degree - 180 \degree)



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อของระบบการวัดอนุภาคที่ใช้หลักการกระเจิงแสง

การเชื่อมโยงพึงก์ชันการทำงานของระบบการวัดอนุภาคต่างๆ บนพื้นผิวเรียบโดยใช้ หลักการกระเจิงแสง เริ่มจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ขนาดลำแสง 2 mm ตกกระทบกับอนุภาคที่ อยู่บนพื้นผิวเรียบทำให้เกิดปฏิกิริยาการกระเจิงแสงเข้าสู่ตัวโฟโตไดโอด และได้สัญญาณความเข้ม การกระเจิงแสง ส่งผ่านสัญญาณต่อไปยังภาคขยายสัญญาณหรือ (Data acquisition board: DAQ) จากนั้นสัญญาณนี้จะถูกเก็บบันทึก และวิเคราะห์ผลด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป ซึ่งแสดงได้ดัง ไดอะแกรมรูปที่ 3.7

3.2 ขั้นตอนในการออกแบบและสร้างระบบการวัดอนุภาคต่าง ๆบนพื้นผิวเรียบ

สมการที่ (2.3) การหาค่า Size Parameter (α) กับกราฟ Size Parameter (α) และหัวข้อ 3.1 เพื่อเลือกย่านแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสม โดยใช้ทฤษฎีการกระเจิงแสงเพื่อบอก รูปแบบของค่าความเข้มการกระเจิงแสง (I_{sca}) ในรูปแบบเรย์ไล และไมย์ และใช้ผลจากแบบจำลอง BRDF เพื่อเลือกมุมตกกระทบ (θ_i) มุมการกระเจิง (θ_s) และมุมอซิมุท (φ_s) ที่เหมาะสมสำหรับ ออกแบบและสร้างระบบการวัดอนุภาคชนิดต่างๆที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การเลือกแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นเลเซอร์

การเลือกแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นเลเซอร์อาศัยเงื่อนไขการกำหนดและคำนวณหาค่า Size Parameter (α) ได้ดัง ตารางที่ 3.1 เพื่อเลือกช่วงความยาวคลื่นให้เหมาะสมกับการวัดขนาดของ อนุภาคที่ใช้คือ 0.2 - 0.6 ไมโครเมตร

โดยที่ lpha<<1 คือ รูปแบบของ Rayleigh scattering theory หรือ D<< λ lphapprox 1 คือ รูปแบบของ Mie scattering theory หรือ D $pprox \lambda$

lpha>>1 คือ รูปแบบของ Geometric scattering theory หรือ D>> λ

ขนาดอนุภาค	Size Parameter (α)		
(D) µ m	λ= 0.488 µm	λ= 0.6328 µm	รูปแบบ
0.2	1.30	1.00	Rayleigh
0.3	1.93	1.50	Rayleigh/Mie
0.4	2.60	2.00	Mie
0.5	3.22	2.50	Mie
0.6	3.90	3.00	Mie/Geometric

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า Size Parameter (**α**) ของอนุภาคขนาด 0.2 - 0.6 µm ที่ความยาวคลื่น 0.488 µm และ0.6328 µm

จากตาราง 3.1 สรุปได้ว่า ที่ขนาดอนุภาคในช่วง 0.2 - 0.6 ไมโครเมตร สามารถเลือกใช้ เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นได้ทั้ง 0.488 และ0.6328 ไมโครเมตร และจะให้รูปแบบค่าความเข้มการ กระเจิงแสงได้ทั้ง รูปแบบเรย์ไล และไมย์ นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันจากกราฟรูปที่ 3.8 และ กราฟรูปที่ 3.9 ได้ด้วย ซึ่งวิธีการคำนวณ Size Parameter (**α**)



รูปที่ 3.8 กราฟมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณสมการ Size Parameter (lpha) [14]



รูปที่ 3.9 กราฟที่แสดงค่า α ที่อนุภาคขนาด 0.2 และ0.6 μm กับความยาวคลื่น 0.488 และ 0.6328 μm ตามลำดับ

3.2.2 การเลือกมุมตกกระทบ($m{ heta}_i$) และมุมการกระเจิง($m{ heta}_{ m s}$) ที่เหมาะสม

การเลือกมุมตกกระทบ และมุมการกระเจิงที่เหมาะสมพิจารณาจากมุม **o**_s ที่ 0° - 180° และ0° - 360° จากค่าผลแบบจำลองความเข้มการกระเจิงแสงที่ใช้อนุภาคมาตรฐานชนิด Polystyrene latex (PSL) [6] และมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.59 โดยทำการกำหนดขนาดอนุภาคอยู่ ใน 3 ช่วง คือ (Small sizes),(Normal sizes) และ(Large sizes) ที่ครอบคลุมกับรูปแบบการ กระเจิง ทั้ง 3 รูปแบบ คือ การกระเจิงแสงแบบเรย์ไล (Rayleigh scattering) การกระเจิงแสงแบบ ไมย์ (Mie scattering) และ การกระเจิงแสงแบบ Geometric scattering เพื่อหาค่ามุมตกกระทบ และมุมการกระเจิงที่เหมาะสม และครอบคลุมการกระเจิงแสงทั้ง 3 รูปแบบมากที่สุดซึ่งมี รายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.2.1 รูปแบบการกระเจิงแสงของเรย์ไล (Rayleigh scattering)

การกระเจิงแสงแบบเรย์ไลมีหลักการการกระเจิงแสงที่ให้ค่าความเข้มการกระเจิง แสงเท่ากันหมดทุกทิศทุกทางโดยมีเงื่อนไข (D<<λ) ซึ่งเหมาะสมกับขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วง (Small sizes) ที่อนุภาคขนาด 1, 5 และ10 nm โดยใช้ความยาวคลื่น 0.6328 μm ทำการเลือก เปลี่ยนมุม θ_i กับ θ_s ในช่วง 0° – 90° ที่ 1°/1°, 45°/45° และ 89°/89° เพื่อหาค่าความเข้มการ กระเจิงแสงที่เหมาะสม



รูปที่ 3.10 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 1 nm



รูปที่ 3.11 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 5 nm



รูปที่ 3.12 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 10 nm

3.2.2.2 รูปแบบการกระเจิงแสงของไมย์ (Mie scattering)

การกระเจิงแสงแบบไมย์มีหลักการการกระเจิงแสงที่ให้ค่าความเข้มการกระเจิงแสงใน ทิศทางไปข้างหน้ามากกว่าทิศทางอื่นๆ ซึ่งเป็นทิศทางตรงข้ามกับแสงที่ตกกระทบ ที่เงื่อนไข (D ≈ λ) ซึ่ง เหมาะสมกับขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วง (Normal sizes) ที่อนุภาคขนาด 0.2, 0.4 และ0.6 µm โดยใช้ ความยาวคลื่น 0.6328 µm ทำการเลือกเปลี่ยนมุม θ_i กับ θ_s ในช่วง 0° – 90° ที่ 1°/1°, 45°/45° และ 89°/89° เพื่อหาค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่เหมาะสม





Normal Size : 0.2 μ m, $\lambda = 0.6328 \mu$ m, $\phi_s = 0^{\circ}$ - 360°

รูปที่ 3.13 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 0.2 μm



Normal Size : 0.4 μ m, λ = 0.6328 μ m, ϕ_s = 0°- 180°



รูปที่ 3.14 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 0.4 μm



Normal Size : 0.6 μ m, λ = 0.6328 μ m, ϕ_s = 0°- 180°



รูปที่ 3.15 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 0.6 μm

3.2.2.3. รูปแบบการกระเจิงแสงของ Geometric scattering

การกระเจิงแสงแบบ Geometric scattering มีหลักการการกระเจิงแสงที่ให้ค่าความเข้ม การกระเจิงแสงในแต่ละมุมมีค่าไม่คงที่ และไม่เป็นระเบียบที่เงื่อนไข (D >> λ) ซึ่งเหมาะสมกับขนาด ้อนุภาคที่อยู่ในช่วง (Large sizes) ที่อนุภาคขนาด 3, 100 และ1000 μm โดยใช้ความยาวคลื่น 0.6328 μ m ทำการเลือกเปลี่ยนมุม $heta_{
m l}$ กับ $heta_{
m s}$ ในช่วง 0 \degree – 90 \degree ที่ 1 \degree /1 \degree , 45 \degree /45 \degree และ 89 \degree /89 \degree เพื่อหาค่าความ เข้มการกระเจิงแสงที่เหมาะสม



รูปที่ 3.16 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 3 μm



รูปที่ 3.17 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 100 μm

(1) $\phi_{s} = 0^{\circ} - 360^{\circ}$

150°

170° 160°

210°

200° 190°



รูปที่ 3.18 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 1000 μm

จากรูปที่ 3.10 -3.18 เปรียบเทียบมุมตกกระทบ (1ໍ, 45ໍ, 89ໍ) กับมุมการกระเจิง (1ໍ, 45ໍ, 89ํ) อนุภาคขนาดเล็กที่ 1, 5 และ10 nm อนุภาคขนาดกลางที่ 0.2, 0.4 และ0.6 µm และ อนุภาคขนาดใหญ่ที่ 3, 100 และ1000 µm กับความยาวคลื่นที่ 0.6328 µm สรุปได้ว่าในช่วง มุม **\$\phi_s\$** \$\mathbf{n}\$ 0° -180° และ0° - 360° นั้น มุมตกกระทบและมุมการกระเจิงแสงที่ให้ค่าความ เข้มการกระเจิงแสงสูงที่สุดและแสดงรูปแบบการกระเจิงแสงที่เป็นของเรย์ไล และไมย์ ได้อย่าง ชัดเจน คือ มุมตกกระทบ(\$\mathbf{0}\$)ที่ 89° และมุมการกระเจิง(\$\mathbf{0}\$s)ที่ 89° และมุมอซิมุท(\$\mathbf{0}\$s)ทั้งมุมที่ 0° -180° และ 0° - 360° ซึ่งมุมดังกล่าวเป็นมุมที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้วัดหาชนิดและขนาดของ อนุภาคในรูปแบบต่างๆ ได้ ซึ่งจะนำค่าที่ได้เหล่านี้ไปทดลองจริงในงานวิจัย เพื่อให้ได้ผลยืนยันของ ระบบที่ถูกออกแบบมา และสามารถนำไปใช้ได้จริง ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

การหารูปแบบของค่าความเข้มการกระเจิงแสงจากแบบจำลองของอนุภาคมาตรฐานชนิด Polystyrene latex (PSL) ค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.59 ที่ λ เท่ากับ 0.6328 μm, มุม φ_s ที่ 0[°]-360[°] กับมุมตกกระทบ(θ_i) /มุมการกระเจิง(θ_s) เท่ากับ 89[°]/89[°] เป็นมุมที่เหมาะสมดีที่สุดทั้ง 3 รูปแบบ คือ Rayleigh scattering และ Mie scattering และ Geometric scattering และมุมนี้นำไปใช้จริง ในการทดลองโดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.19 - 3.21 ดังนี้



รูปที่ 3.19 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงรูปแบบ Rayleigh scattering ที่อนุภาคขนาดเล็ก 1, 5 และ 10 nm



Normal Size : $\lambda = 0.6328 \,\mu m$, $\theta_i / \theta_s = 89^{\circ}$ [Mie Scattering]





รูปที่ 3.21 ค่าความเข้มการกระเจิงแสงรูปแบบ Geometric scattering ที่อนุภาคขนาดกลาง 3, 100 และ1000 μm

จากรูปที่ 3.19 - 3.21 สรุปได้ว่าในช่วงมุม φ_s ที่ 0[°]- 360[°] และความยาวคลื่น 0.6328 µm กับอนุภาคขนาดเล็กในช่วง 1,5 และ10 nm ให้รูปแบบค่าความเข้มการกระเจิงแสงเป็นแบบ เรย์ไล (Rayleigh scattering) เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีขนาดที่เล็กกว่าความยาวคลื่นที่ตก กระทบอนุภาค (D<< λ) ส่วนอนุภาคขนาดกลางในช่วง 0.2, 0.4 และ0.6 µm ให้รูปแบบค่าความ เข้มการกระเจิงแสงเป็นแบบไมย์ (Mie scattering) เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกับ ความยาวคลื่นที่ตกกระทบอนุภาค (D ≈ λ) และอนุภาคขนาดใหญ่ในช่วง 3, 100 และ1000 µm ให้รูปแบบค่าความเข้มการกระเจิงแสงเป็นแบบ Geometric scattering เนื่องจากขนาดของ อนุภาคมีขนาดที่มากกว่าความยาวคลื่นที่ตกกระทบอนุภาค (D>>λ) และยังพบอีกว่าที่อนุภาค ขนาดใหญ่นั้นจะให้ค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่ง ตรงตามทฤษฏีที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 นอกจากนี้ยังนำผลจำลองเหล่านี้ไปสร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงแสงกับขนาดอนุภาค เพื่อดูความเป็นเชิงเส้นทั้ง 3 ช่วงขนาดดังนี้



รูปที่ 3.22 กราฟเชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงแสงกับอนุภาคขนาดเล็ก 1, 5 และ10 nm



รูปที่ 3.23 กราฟเชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงแสงกับอนุภาคขนาดกลาง 0.2, 0.4 และ0.6 μm



รูปที่ 3.24 กราฟเชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงแสงกับอนุภาคขนาดใหญ่ 3, 100 และ1000 μm

ผลแบบจำลองยืนยันความเป็น Rayleigh scattering ที่มุม $oldsymbol{\phi}_{
m s}$ ที่ 0่-180 \degree และความยาวคลื่น 0.6328 μ m ดังแสดงในรูปที่ 3.25



ผลแบบจำลองยืนยันความเป็น Mie scattering ที่มุม **φ**_s ที่ 0ໍ-180ໍ และความยาวคลื่น 0.6328 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.26



ผลแบบจำลองยืนยันความเป็น Geometric scattering ที่มุม φ_s ที่ 0ໍ-180ໍ และความยาวคลื่น 0.6328 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.27



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับวัดหา ความเป็นรูปแบบชนิดและขนาดจากทฤษฎีการกระเจิงแสงเฉพาะแบบไมย์เท่านั้นเนื่องจากค่า ความเข้มการกระเจิงแสงมีรูปแบบที่แสดงได้ดังรูปที่ 3.28, 3.29 และ 3.30



รูปที่ 3.28 ขนาดเล็ก Ultraviolet : (D ≈ λ) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33

สรุปได้ว่าที่ขนาดอนุภาคในช่วง 100 μm ใช้ Ultraviolet จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับความ เป็นรูปแบการกระเจิงแสงแบบไมย์ เพราะให้ค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่สูงที่สุดนั่นเอง



รูปที่ 3.29 ขนาดกลาง Visible light : VL (D ≈ λ) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33

สรุปได้ว่า ที่ขนาดอนุภาคในช่วง 0.6 μm ใช้ Visible light จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับความ เป็นรูปแบบการกระเจิงแสงแบบไมย์ เพราะให้ค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่สูงที่สุดนั่นเอง



รูปที่ 3.30 ขนาดใหญ่ Infrared-C : IR-C (D ≈ λ) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33

สรุปได้ว่า ที่ขนาดอนุภาคในช่วง 1000 μm ใช้ Infrared-C จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับความ เป็นรูปแบบการกระเจิงแสงแบบไมย์ เพราะให้ค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่สูงที่สุดนั่นเอง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับวัดหา ความเป็นรูปแบบชนิดและขนาดจากทฤษฎีการกระเจิงแสง สำหรับยืนยันแบบ Rayleigh scattering ที่ขนาดอนุภาค 0.06 µm กับความยาวคลื่น 0.6 µm และ Geometric scattering ที่ ขนาดอนุภาค 6 µm กับความยาวคลื่น 0.6 µm แสดงได้ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 รูปแบบการกระเจิงที่ D < 10 λ และ D < 10 λ

สรุปได้ว่า ที่ขนาดอนุภาค 0.06 μm กับความยาวคลื่น 0.6 μm ซึ่งมีขนาดอนุภาคน้อย กว่าความยาวคลื่นอยู่ 10 เท่า (D<10λ) จึงให้รูปแบบการกระเจิงแสงเป็น Rayleigh scattering สำหรับที่ขนาดอนุภาค 6 μm กับความยาวคลื่น 0.6 μm ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าความยาว คลื่นอยู่ 10 เท่า (D > 10λ) จึงให้รูปแบบการกระเจิงแสงเป็น Geometric scattering นั่นเอง

นอกจากนี้ยังยืนยันด้วยผลจากแบบจำลอง ใช้ 3 ชนิดอนุภาค คือ SiO₂ (n_D=1.45), Al₂O₃ (n_D=1.76) และ TiO₂ (n_D=2.75) ที่ขนาดอนุภาคระหว่าง 0.2–0.6 µm เป็นอนุภาคตัวอย่างที่ใช้ทด ลอบครั้งนี้ โดยกำหนด ความยาวคลื่น 0.6328 µm มุมตกกระทบ และมุมการกระเจิง เท่ากับ 89[°] บนพื้นผิวที่เป็นส่วนประกอบของฮาร์ดดิสไดร์ฟ โดยเลือกการจำลองเป็นรูปแบบไมย์ ให้ผลจำลอง ในรูปที่ 3.32-3.34 หลังจากนั้นจะทำการทดลองจริงกับชนิดและขนาดที่สามารถหาได้ในบทที่ 4 ต่อไป

ผลแบบจำลองค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างความยาวคลื่น 0.6328 μm กับขนาดอนุภาค 0.2–0.6 μm ชนิด SiO₂, Al₂O₃ และTiO₂ ที่เป็นรูปแบบของไมย์



รูปที่ 3.32 เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด SiO₂(n_D=1.45)

สรุปได้ว่า ชนิดอนุภาค SiO₂ ที่มีค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่ดีอยู่ที่ขนาด 0.6 μm ซึ่งมีค่าต่ำที่มุม 75° และ 145°พร้อมทั้งให้รูปแบบการกระเจิงแสงแบบไมย์ (D ≈ λ) ได้ชัดเจนที่สุด ทั้งสองรูป



รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด Al₂O₃(n_D=1.76)

สรุปได้ว่า ชนิดอนุภาค Al₂O₃ ที่มีค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่ดีอยู่ที่ขนาด 0.6 μm ซึ่งมีค่าต่ำที่มุม 55° 100° และ145° พร้อมทั้งให้รูปแบบการกระเจิงแสงแบบไมย์ (D ≈ λ) ได้ชัดเจนที่สุดทั้งสองรูป



รูปที่ 3.34 เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด TiO₂(n_D=2.75)

สรุปได้ว่า ชนิดอนุภาค TiO₂ ที่มีค่าความเข้มการกระเจิงแสงที่ดีอยู่ที่ขนาด 0.6 µm ซึ่งมีค่าต่ำที่มุม 75**°** พร้อมทั้งให้รูปแบบการกระเจิงแสงแบบไมย์ (D ≈ λ) ได้ชัดเจนที่สุดทั้งสองรูป จากข้อมูลต่างๆ ที่ได้พิสูจน์พร้อมทดสอบกับแบบจำลอง และเปรียบเทียบกับทฤษฎีการ กระเจิงแสงต่างๆแล้วข้างต้น สรุปได้ว่าระบบการวัดอนุภาคต่างๆบนพื้นผิวเรียบนี้ สามารถวัดค่า ความเข้มการกระเจิงแสงและบอกถึงความเป็นชนิดและขนาดของอนุภาคที่ดี ถูกต้องและแม่นยำ เหมาะสมและมีประสิทธิภาพดี ได้อย่างแน่นนอน และจะกล่าวรายละเอียดถึงวิธีการออกแบบและ ทดลองในบทที่ 4 ต่อไป