สารบัญภาพประกอบ

ภาท	ฟที่		หน้า
	2.1	ปรากฏการการกระเจิงแสงของอนุภาค	7
	2.2	โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์	9
	2.3	แสงสีขาวจากหลอดไฟฟ้าหรือดวงอาทิตย์เมื่อผ่านปริซึม	10
	2.4	แสงสีแดงจากเลเซอร์ฮีเลียม - นีออนเมื่อผ่านปริซึม	10
	2.5	ต้นกำเนิดแสงชนิดต่างๆ (ก) แสงจากหลอดไฟฟ้า (ข) แสงจากเลเซอร์	11
	2.6	ลักษณะการลู่ออกของลำแสงเลเซอร์	11
	2.7	ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn	17
	2.8	แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn	18
	2.9	ปฏิกิริยาทางแสงของ BRDF	19
	2.10	รูปแบบการกระเจิงแสงบนพื้นผิวเรียบ และบนพื้นผิวเรียบที่มีอนุภาค	19
	2.11	โครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF บนพื้นผิว	20
	2.12	โครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF บนครึ่งทรงกลมหนึ่งหน่วย	21
	2.13	พิกัดมุมต้นในทรงกลม	21
	2.14	การกระเจิงแสงแบบเรย์ไล (Rayleigh scattering)	23
	2.15	การกระเจิงแสงแบบไมย์ (Mie scattering)	23
	3.1	ระบบวัดอนุภาคบนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ของ Yuzo MORI	27
	3.2	(ก) ผลแบบจำลอง BRDF _{part} เทียบกับ	
		(ข) ผลทดลองของงานวิจัย Yuzo MORI	27
	3.3	(ก) ผลแบบจำลอง BRDF _{part} เทียบกับ	
		(ข) ผลทดลองของงานวิจัย David W. Hahn	28
	3.4	(ก) ผลแบบจำลอง BRDF _{part} เทียบกับ	
		(ข) ผลทดลองของงานวิจัย A.R. Jones	29
		(ค) ผลแบบจำลอง BRDF _{part} เทียบกับ	
		(ง) ผลทดลองของงานวิจัย A.R. Jones	29
		(จ) ผลแบบจำลอง BRDF _{part} เทียบกับ	
		(ฉ) ผลทดลองของงานวิจัย A.R. Jones	30

	(ช) ผลแบบจำลอง BRDF _{part} เทียบกับ
	(ซ) ผลทดลองของงานวิจัย A.R. Jones
3.5	ตัวอย่างอนุภาคขนาด 2, 10, 20 μm ที่นำมาทดลองต้องสามารถระบุ
	ตำแหน่งได้
3.6	ระบบการวัดอนุภาคที่ถูกออกแบบไว้โดยใช้หลักการกระเจิงแสง
	ที่มุม $oldsymbol{\phi}_{ m s}$ = 0 $ m \circ$ - 180 $ m \circ$
3.7	การเชื่อมต่อของระบบการวัดอนุภาคที่ใช้หลักการกระเจิงแสง
3.8	กราฟมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณสมการ Size Parameter (α)
3.9	กราฟที่แสดงค่า $lpha$ ที่อนุภาคขนาด 0.2 และ0.6 μ m
	กับ ความยาวคลื่น 0.488 และ0.6328 μm ตามลำดับ
3.10	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 1 nm (ก) $oldsymbol{\Phi}_{ m s}$ = 0 \degree -180 \degree และ
	(າ) φ _s = 0ໍ - 360ໍ
3.11	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 5 nm (ก) $oldsymbol{\phi}_{ m s}$ = 0 $ m ^{\circ}$ -180 $ m ^{\circ}$ และ
	(៕) \$\$ _S = 0° - 360°
3.12	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 10 nm (ก) $oldsymbol{\phi}_{ m s}$ = 0 \degree -180 \degree และ
	(៕) Φ _s = 0ໍ - 360ໍ
3.13	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนภาค 0.2 um (ก) $\mathbf{\Phi}_{\rm s}=0$ -180 และ
	(1) $\mathbf{\Phi}_{a} = 0^{\circ} - 360^{\circ}$
3 14	(-) $\psi_{\rm s}$ = 0.000 และ
0.111	(a) $\mathbf{\Phi} = 0^{\circ} - 360^{\circ}$
2 15	$(\underline{u}) \Psi_{S} = 0 = 0 = 0 = 0$
5.15	$φ_s = 0^{-100}$ and $φ_s = 0^{-100}$ and $φ_s = 0^{-100}$ and $φ_s = 0^{-100}$ and $φ_s = 0^{-100}$
	$(\mathbb{Y}) \psi_{\mathrm{S}} = 0 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - 300 - $
3.16	ศาความเขมการกระเจงแลงบนอนุภาค 3 μm (ก) φ _s = 0-1800 และ
	(៕)
3.17	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 100 μ m (ก) $oldsymbol{\phi}_{ m s}$ = 0-180 และ
	(៕) $\phi_{\rm s} = 0$ ⊂ 360 °

3.18	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงบนอนุภาค 1000 μm (ก) $oldsymbol{\varphi}_{ m s}$ = 0 $ m m \circ$ -180 $ m m m \circ$ และ	
	(1) þ _s = 0ໍ - 360ໍ	46
3.19	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงรูปแบบ Rayleigh scattering ที่อนุภาคขนาดเล็ก	
	1, 5 ແລະ10 nm	47
3.20	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงรูปแบบ Mie scattering ที่อนุภาคขนาดกลาง	
	0.2, 0.4 ແລະ0.6 µm	48
3.21	ค่าความเข้มการกระเจิงแสงรูปแบบ Geometric scattering ที่อนุภาคขนาดใหญ่	
	3, 100 ແລະ1000 μm	48
3.22	กราฟเชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงแสงกับอนุภาคขนาดเล็ก	
	1, 5 ແລະ10 nm	49
3.23	กราฟเชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงแสงกับอนุภาคขนาดกลาง	
	0.2, 0.4 ແລະ0.6 µm	50
3.24	กราฟเชิงเส้นระหว่างค่าความเข้มการกระเจิงแสงกับอนุภาคขนาดใหญ่	
	3, 100 ແລະ1000 µm	50
3.25	รูปแบบการกระเจิงของแบบ เรย์ไล (D < λ) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33	51
3.26	รูปแบบการกระเจิงของแบบไมย์ (D $pprox \lambda$) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33	51
3.27	รูปแบบการกระเจิงของแบบเรขาคณิต (D > λ) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33	52
3.28	ขนาดเล็ก Ultraviolet : (D $pprox \lambda$) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33	52
3.29	ขนาดกลาง Visible light : VL (D $pprox \lambda$) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33	53
3.30	ขนาดใหญ่ Infrared-C : IR-C (D ≈ λ) ที่ค่าดัชนีหักเห 1.33	53
3.31	รูปแบบการกระเจิงที่ D < 10 λ และ D < 10 λ	54
3.32	- เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด SiO ₂ (n _p =1.45)	
	(ก) \$ _s = 0 ° -180° และมุม (ข) \$ _s = 0 ° -360°	55
3.33	เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด Al ₂ O ₃ (n _D =1.76)	
	(ก) \$ _s = 0 ° -180° และมุม (ข) \$ _s = 0 ° -360°	56
3.34	เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด TiO ₂ (n _p =2.75)	
	(ก) \$ _s = 0 ° -180° และมุม (ข) \$ _s = 0 ° -360°	57
4.1	ภาพถ่ายจริงของระบบการวัดอนุภาคต่างๆ โดยใช้หลักการกระเจิงแสง	
	ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	59

4.2	โครงสร้างแบบจำลอง	62
4.3	ภาพการทดลองจริงในงานวิจัยนี้	63
4.4	ภาพถ่ายจริงของตัวอย่างชนิด Steel ทรงกลมที่ขนาด 1000 – 5000 µm	64
4.5	ตัวอย่างชนิด Steel ขนาด 1000-5000 µm ก่อนและหลังทำการวัด	64
4.6	(ก) 0 ° – 150 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	64
	(ข) 0 ° – 360 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	65
4.7	(ก) 0 ° – 150 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	65
	(ข) 0 ° – 360 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	66
4.8	ตัวอย่างชนิด Silica gel ทรงกลมที่ขนาด 2000 – 4000 μm	66
4.9	ตัวอย่างชนิด Silica gel ขนาด 2000 – 4000 μm ก่อนและหลังทำการวัด	67
4.10	(ก) 0 - 150 ที่อนุภาคเดี่ยว	67
	(ข) 0 ° – 360 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	68
4.11	(ก) 0 ° – 150 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	68
	(ข) 0 ° – 360 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	69
4.12	ตัวอย่างชนิด Zirconium dioxide ทรงกลมที่ขนาด 500 – 3000 μm	69
4.13	ตัวอย่างชนิด Zirconium dioxide ขนาด 500 – 3000 μm ก่อน และหลัง	
	ทำการวัด	70
4.14	(ก) 0 - 150 ที่อนุภาคเดี่ยว	70
	(ข) 0 ° – 360 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	71
4.15	(ก) 0 ° – 150 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	71
	(ข) 0 ° – 360 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	72
4.16	ตัวอย่างชนิด Polyethylene ทรงกลมที่ขนาด 250 – 750 μm	72
4.17	ตัวอย่างชนิด Polyethylene ขนาด 250 – 750 μm ก่อนและหลังทำการวัด	73
4.18	(ก) 0 - 150 ที่อนุภาคเดี่ยว	73
	(ข) 0 ° – 360 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	74
4.19	(ก) 0 ° – 150 ° ที่อนุภาคเดี่ยว	74
	(ข) 0 – 360 °ที่อนุภาคเดี่ยว	75

4.20	(ก) Particle size standard: Polystyrene latex (PSL) และ (ข) ผลแบบจำลอง	
	ที่มุม (φ _s) 0 °- 150° ขนาด 0.2 - 0.6 μm เพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้น	76
4.21	(ก) อนุภาคชนิด Fe ขนาด 1000-5000 μm เปรียบเทียบ (ข) ผลแบบจำลองกับ	
	(ค) ผลการทดลองที่มุม (\$ s) 0 °- 150 ° เพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้น	77
4.22	(ก) อนุภาคชนิด SiO ₂ ขนาด 2000-4000 μm เปรียบเทียบ (ข) ผลแบบจำลองกับ	
	(ค) ผลการทดลองที่มุม (þ _s) 0 °- 150 ° เพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้น	79
4.23	(ก) อนุภาคชนิด ZrO₂ขนาด 500-3000 μm เปรียบเทียบ (ข) ผลแบบจำลองกับ	
	(ค) ผลการทดลองที่มุม (þ _s) 0 °- 150 ° เพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้น	80
4.24	(ก) อนุภาคชนิด PE ขนาด 250-750 μm เปรียบเทียบ (ข) ผลแบบจำลองกับ	
	(ค) ผลการทดลองที่มุม (þ _s) 0 [°] -150 [°] เพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้น	81
4.25	จำนวนอนุภาค 3 จำนวน กับ ZrO₂ ที่ขนาด 500 µm และPE	
	ที่ขนาด 250 μm	82
4.26	จำนวนอนุภาค 1, 2 และ3 จำนวน ชนิด ZrO $_2$ 500 μm ที่มุม ($oldsymbol{\phi}_{ m S}$)	
	0 ໍ ຄື່ v360 ໍ	83
4.27	จำนวนอนุภาค 1, 2 และ 3 จำนวน ชนิด PE ขนาด 250 μm ที่มุม (φ _s)	
	0 ໍຄຳ360 ໍ	83
4.28	ค่าความเข้มผลแบบจำลอง 3 ขนาด และ 3 ชนิด	84
4.29	ค่าความเข้มการทดลอง 3 ขนาด และ 3 ชนิด	84
5.1	กราฟค่าของ Size Parameter (α) เท่ากับ 1.30 และ1.00 กับ 3.90 และ	
	3.00 ที่ขนาดอนุภาค 0.2 และ 0.6 μm กับความยาวคลื่น 0.488 μm และ	
	0.6328 μm ตามลำดับเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจำลองกับอนุภาค	
	ชนิด Fe ขนาด 1000-5000 μm เพื่อแสดงความเป็นเชิงเส้น	87
5.2	ความยาวคลื่นแสง 0.488 μm ที่ขนาด0.2 μm และ0.3 μm	88
5.3	ความยาวคลื่นแสง 0.6328 μm ที่ขนาด 0.2 μm และ0.3 μm	88
5.4	เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด SiO ₂ (n _D =1.45)	
	(ก) þ _s = 0 °- 180 ° และมุม (ข) þ _s = 0 °- 360 °	90
5.5	เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด Al ₂ O ₃ (n _D =1.76)	
	(ก) \$ _s = 0 ° -180 ° และมุม (ข) \$ _s = 0 ° -360 °	91

5.6	เปรียบเทียบค่าความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคชนิด TiO ₂ (n _D =2.75)	
	(ก) φ _s = 0°-180° และมุม (ข) φ _s = 0°-360°	92
5.7	เครื่องต้นแบบวัดอนุภาคขนาด 0.2-0.6 μm บนพื้นผิวเรียบที่มุมอซิมุท	
	$(\phi_{\rm S}) = 0^{\circ} - 360^{\circ}$	93
6.1	ประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดหาชนิด และขนาดของอนุภาค	96