สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฌ

สัญลักษณ์ ..... ป

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

2 หลักทางวิชาการของงานวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) 4

2.2 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) 4

2.3 สมบัติทางเรขาคณิตของรังสีดวงอาทิตย์ 6

2.3.1 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ 6

2.3.2 ทรงกลมท้องฟ้าและทางเดินปรากฏของเทหวัตถุ 7

2.3.3 ทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์ 9

2.3.4 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ 11

2.3.5 เวลาและตำแหน่งของดวงอาทิตย์ 14

2.3.6 มุมตกกระทบของลำแสงอาทิตย์บนพื้นเอียง 16

2.4 แสงสว่างธรรมชาติ (daylight) 17

2.4.1 แหล่งกำเนิดของแสงสว่างธรรมชาติ 17

2.4.2 ปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ 20

2.4.2.1 Direct Illuminance และ Diffuse illuminance 20

2.4.2.2 Sky luminance 21

2.5 แสงสว่าง (visible light) 22

2.5.1 การตอบสนองของสายตามนุษย์ 22

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

2.5.2 ปริมาณของแสงสว่าง 22
2.5.3 การหาค่าปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ 24
2.5.3.1 แสงสว่างธรรมชาตินอกบรรยากาศโลก 24
2.5.3.2 แสงสว่างธรรมชาติที่พื้นผิวโลก 25
2.5.3.3 การคำนวณปริมาณแสงสว่างธรรมชาติภายในอาคาร 26
2.5.4 การวัดปริมาณแสงสว่างธรรมชาติ 27
2.5.4.1 ข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่มาจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า 28
2.5.4.2 ข้อมูลปริมาณแสงสว่างธรรมชาติที่ตกกระทบระนาบต่าง ๆ 29
2.6 การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31
3 วิธีดำเนินการวิจัยและผล 47
3.1 การจัดเตรียมข้อมูล 47
3.1.1 การจัดเตรียมข้อมูลภาคพื้นดิน 47
3.1.2 การคำนวณดัชนีเมฆ (cloud index) 51
3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าเมื่อเทียบกับความเข้มแสงสว่างจากกลางท้องฟ้า (relative sky luminance) 58
3.2.1 การกำหนดพื้นที่เป้าหมายที่ใช้พัฒนาและทดสอบแบบจำลอง 59
3.2.2 การจัดกลุ่มข้อมูล 60
3.2.3 การหาค่าเฉลี่ยความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky luminance) 61
3.2.3.1 การหมุนชุดข้อมูล 61
3.2.3.2 การเฉลี่ยข้อมูล 61
3.2.4 การแบ่งข้อมูลเพื่อใช้แยกฟังก์ชัน φ ออกจาก f 62
3.2.4.1 การแบ่งโซนของเซลล์ข้อมูลเพื่อใช้แยกฟังก์ชัน φ ออกจาก f 62
3.2.4.2 การเตรียมข้อมูลสำหรับหาฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ 64
3.2.4.3 การเตรียมข้อมูลสำหรับหาฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Zs)$ 65
3.2.4.4 การวิเคราะห์หาฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ 67

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3.2.4.5 การวิเคราะห์หาฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Zs)$ 104

3.2.5 ผลการสร้างแบบจำลองความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าเทียบกับตำแหน่งกลางท้องฟ้า (relative sky luminance) 112

3.2.6 การทดสอบแบบจำลองความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าเทียบกับตำแหน่งกลางท้องฟ้า (relative sky luminance) 112

3.2.7 การใช้งานแบบจำลอง 114

4 สรุป 115

บรรณานุกรม 117

ภาคผนวก 119

ภาคผนวก ก ตารางแสดงการจัดข้อมูล (L/L_{ref}) สำหรับหาฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ 120

ภาคผนวก ข ตารางแสดงการจัดข้อมูล (L/L_{ref}) สำหรับหาฟังก์ชัน $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ 132

ภาคผนวก ค ตารางแสดงการจัดแบ่งหมายเลขของเซลล์ข้อมูลตามกลุ่มของ χ และ Zs สำหรับหาฟังก์ชัน φ และ f ที่ $\psi_{Z_s} = 0^\circ$ (ข้อมูลที่ rotation แล้ว) 146

ภาคผนวก ง ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่อง sky scanner 162

ภาคผนวก จ รูปแบบของไฟล์ข้อมูลจากเครื่อง sky scanner 166

ภาคผนวก ฉ การติดตั้งโปรแกรมใช้งานควบคุมเครื่อง sky scanner 169

ประวัติผู้วิจัย 174

มหาวิทยาลัยศิลปากร ศูนย์วิทยทรัพยากร

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_0 ของแบบจำลอง Brunger (1987) 34

2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_1 ของแบบจำลอง Brunger (1987) 34

2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_2 ของแบบจำลอง Brunger (1987) 35

2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_3 ของแบบจำลอง Brunger (1987) 35

2.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองของ Perraudeau (1988) 38

2.6 แสดงค่า $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3$ และ b_4 ตามแบบจำลองของ Perez และคณะ (1993) 41

2.7 แสดงค่า $c_1, c_2, c_3, c_4, d_1, d_2, d_3$ และ d_4 ตามแบบจำลองของ Perez และคณะ (1993) 42

2.8 แสดงค่า e_1, e_2, e_3 และ e_4 ตามแบบจำลองของ Perez และคณะ (1993) 42

2.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d, e ตามแบบจำลองของ Darula และ Kittler (2002) 44

3.1 แสดงตัวอย่างของค่าความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance) ในหน่วย kcd/m^2 ซึ่งวัดได้จาก sky scanner จากสถานีเชียงใหม่ 50

3.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก (ρ_g) ของสถานีเชียงใหม่ในปี 2005 และสถานีสงขลา ในปี 2006 52

3.3 แสดงตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดของเมฆ และพื้นผิวโลก (ρ) ของสถานีเชียงใหม่ ปี 2005 และสถานีสงขลา ปี 2006 53

3.4 แสดงข้อมูลดัชนีเมฆ ของสถานีเชียงใหม่ ปี 2005 และสถานีสงขลา ปี 2006 55

3.5 แสดงพิกัดของพื้นที่เป้าหมาย 59

3.6 แสดงตัวอย่างการจัดข้อมูลความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (L) ที่ค่า χ คงที่ เท่ากับ χ_1 ถึง χ_6 โดยแต่ละ χ จะมีค่า Z แปรค่าจาก Z_1 ถึง Z_8 ทั้งนี้เพื่อใช้หา $\varphi(Z)/\varphi(0)$ โดย L_{ref} เป็นความเข้มแสงสว่างบนท้องฟ้าที่ตำแหน่งอ้างอิง Z_{ref} ชุดข้อมูลดังกล่าวเป็นกลุ่มข้อมูลของกรณี $n = n_1$ และ $Zs = Zs_1$ 65

3.7 แสดงข้อมูลความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (L) ที่ค่า Z คงที่ เท่ากับ Z_1 ถึง Z_8 โดยแต่ละ Z จะมีค่า χ ที่แปรค่าจาก χ_1 ไปถึง χ_6 ทั้งนี้เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์หา $f(\chi)/f(Zs)$ โดยข้อมูลในตารางเป็นชุดข้อมูลของกรณี $n = n_1$ และ $Zs = Zs_1$ 66

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

ตารางที่ หน้า

3.8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ $a_1, a_2, ..., a_7$ 103

3.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ $a_8, a_9, ..., a_{16}$ 103

3.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการของ $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ 111

A1 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 0^\circ$ 121

A2 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 15^\circ$ 121

A3 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 30^\circ$ 122

A4 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 45^\circ$ 122

A5 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 60^\circ$ 122

A6 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 75^\circ$ 123

A7 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 0^\circ$ 123

A8 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 15^\circ$ 123

A9 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 30^\circ$ 124

A10 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 45^\circ$ 124

A11 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 60^\circ$ 124

A12 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 75^\circ$ 125

A13 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 0^\circ$ 125

A14 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 15^\circ$ 125

A15 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 30^\circ$ 126

A16 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 45^\circ$ 126

A17 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 60^\circ$ 126

A18 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 75^\circ$ 127

A19 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 0^\circ$ 127

A20 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 15^\circ$ 127

A21 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 30^\circ$ 128

A22 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 45^\circ$ 128

A23 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 60^\circ$ 128

A24 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 75^\circ$ 129

A25 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 0^\circ$ 129

A26 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 15^\circ$ 129

A27 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 30^\circ$ 130

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

ตารางที่ หน้า

A28 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 45^{\circ}$ 130

A29 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 60^{\circ}$ 130

A30 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 75^{\circ}$ 131

B1 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 15^{\circ}$ 133

B2 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 30^{\circ}$ 133

B3 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 45^{\circ}$ 134

B4 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 60^{\circ}$ 134

B5 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.1,\ Zs = 75^{\circ}$ 135

B6 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 15^{\circ}$ 135

B7 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 30^{\circ}$ 136

B8 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 45^{\circ}$ 136

B9 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 60^{\circ}$ 137

B10 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.3,\ Zs = 75^{\circ}$ 137

B11 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 15^{\circ}$ 138

B12 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 30^{\circ}$ 138

B13 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 45^{\circ}$ 139

B14 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 60^{\circ}$ 139

B15 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.5,\ Zs = 75^{\circ}$ 140

B16 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 15^{\circ}$ 140

B17 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 30^{\circ}$ 141

B18 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 45^{\circ}$ 141

B19 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 60^{\circ}$ 142

B20 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.7,\ Zs = 75^{\circ}$ 142

B21 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 15^{\circ}$ 143

B22 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 30^{\circ}$ 143

B23 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 45^{\circ}$ 144

B24 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 60^{\circ}$ 144

B25 แสดงข้อมูล L/L_{ref} กรณี $n = 0.9,\ Zs = 75^{\circ}$ 145

C1 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 0^{\circ},\ \chi = 0^{\circ} - 30^{\circ}$ 147

C2 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 0^{\circ},\ \chi = 30^{\circ} - 60^{\circ}$ 147

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

ตารางที่ หน้า

C3 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 0^\circ, \chi = 60^\circ - 90^\circ$ 148

C4 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 0^\circ, \chi = 90^\circ - 120^\circ$ 148

C5 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 0^\circ, \chi = 120^\circ - 150^\circ$ 149

C6 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 15^\circ, \chi = 0^\circ - 30^\circ$ 149

C7 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 15^\circ, \chi = 30^\circ - 60^\circ$ 150

C8 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 15^\circ, \chi = 60^\circ - 90^\circ$ 150

C9 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 15^\circ, \chi = 90^\circ - 120^\circ$ 151

C10 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 15^\circ, \chi = 120^\circ - 150^\circ$ 151

C11 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 30^\circ, \chi = 0^\circ - 30^\circ$ 152

C12 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 30^\circ, \chi = 30^\circ - 60^\circ$ 152

C13 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 30^\circ, \chi = 60^\circ - 90^\circ$ 153

C14 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 30^\circ, \chi = 90^\circ - 120^\circ$ 153

C15 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 30^\circ, \chi = 120^\circ - 150^\circ$ 154

C16 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 45^\circ, \chi = 0^\circ - 30^\circ$ 154

C17 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 45^\circ, \chi = 30^\circ - 60^\circ$ 155

C18 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 45^\circ, \chi = 60^\circ - 90^\circ$ 155

C19 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 45^\circ, \chi = 90^\circ - 120^\circ$ 156

C20 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 45^\circ, \chi = 120^\circ - 150^\circ$ 156

C21 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 60^\circ, \chi = 0^\circ - 30^\circ$ 157

C22 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 60^\circ, \chi = 30^\circ - 60^\circ$ 157

C23 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 60^\circ, \chi = 60^\circ - 90^\circ$ 158

C24 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 60^\circ, \chi = 90^\circ - 120^\circ$ 158

C25 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 60^\circ, \chi = 120^\circ - 150^\circ$ 159

C26 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 75^\circ, \chi = 0^\circ - 30^\circ$ 159

C27 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 75^\circ, \chi = 30^\circ - 60^\circ$ 160

C28 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 75^\circ, \chi = 60^\circ - 90^\circ$ 160

C29 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 75^\circ, \chi = 90^\circ - 120^\circ$ 161

C30 แสดงการแบ่งหมายเลขของเซลล์ กรณี $Zs = 75^\circ, \chi = 120^\circ - 150^\circ$ 161

D1 แสดงค่ามุมยก จำนวนเซลล์ต่อรอบการหมุน และระยะห่างของเซลล์ในรอบการสแกนข้อมูล ที่ระดับมุมยกค่าต่างๆ 164

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

ตารางที่ หน้า

E1 แสดงรูปแบบของไฟล์ข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่อง sky scanner ของวันที่ 10 มิถุนายน 48 168

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ 4

2.2 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นช่วงต่างๆ 5

2.3 แสดงวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ 6

2.4 แสดงโลกและท้องฟ้า 8

2.5 แสดงลักษณะของท้องฟ้า 9

2.6 แสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับศูนย์สูตรโลก 10

2.7 แสดงทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า 10

2.8 แสดงการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบอาซิมุธ-อัลติจูด 12

2.9 แสดงการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบศูนย์สูตร 13

2.10 แสดงการแปรค่าในรอบปีของความแตกต่างระหว่างเวลาดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย (E_t) (Iqbal, 1983) 15

2.11 แสดงมุมตกกระทบของลำแสงอาทิตย์บนพื้นเอียง 16

2.12 สเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Iqbal, 1983) 18

2.13 สเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ(Iqbal, 1983) 18

2.14 สเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ และการตอบสนองของสายตามนุษย์ 19

2.15 แสดงแสงตรงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และแสงกระจายจากท้องฟ้า (skylight) 20

2.16 แสดงความเข้มของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของ direct illuminance และ diffuse illuminance 21

2.17 แสดงความเข้มของแสงสว่างธรรมชาติในรูปของความเข้มของแสงสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า หรือ sky luminance 21

2.18 แสดงกราฟของฟังก์ชันการตอบสนองของสายตามนุษย์ (Kaufman and Hayes, 1981) 22

2.19 แสดงปริมาณแสงสว่างในรูปของ illuminance 23

2.20 แสดงปริมาณแสงสว่างในรูปของ luminance 24

2.21 แสดงลักษณะของปริมาณแสงสว่างธรรมชาติจากท้องฟ้าที่ผ่านช่องหน้าต่างเข้ามาภายในอาคาร 26

2.22 แสดงเครื่อง sky scanner 28

2.23 แสดงลักซ์มิเตอร์ 29

2.24 แสดงเครื่องวัดแสงสว่างธรรมชาติที่กระจายจากท้องฟ้า 30

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

รูปที่ หน้า

2.25 แสดงเครื่องวัดแสงสว่างธรรมชาติ บนระนาบในแนวดิ่ง 4 ทิศ 30
3.1 แสดงเครื่อง sky scanner ซึ่งติดตั้งที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ 47
3.2 แสดงเครื่อง sky scanner ซึ่งติดตั้งที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา 48
3.3 แสดงตำแหน่งของท้องฟ้าซึ่งเครื่อง sky scanner ทำการวัดความเข้มแสงสว่าง 48
3.4 แสดงอัลติจูดของตำแหน่งของท้องฟ้าที่เครื่อง sky scanner ทำการวัด 49
3.5 แสดง sky dome ที่เครื่อง sky scanner ทำการวัดค่า sky luminance 49
3.6 แสดงการแจกแจงความถี่ของข้อมูลดัชนีเมฆ ของสถานีเชียงใหม่ ปี 2005 56
3.7 แสดงการแจกแจงความถี่ของข้อมูลดัชนีเมฆ ของสถานีสงขลา ปี 2006 57
3.8 แสดงตำแหน่งของดวงอาทิตย์ และตำแหน่งของท้องฟ้าที่จะหาความเข้มแสงสว่าง ตามแบบจำลองที่จะพัฒนาขึ้น โดย Z เป็นมุมเซนิธของจุดที่พิจารณา Zs เป็นมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ χ เป็นมุมระหว่างจุดบนท้องฟ้าที่พิจารณากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ ψ_P เป็นมุมอาซิมุธของจุดที่พิจารณา ψ_{Zs} เป็นมุมอาซิมุธของดวงอาทิตย์ 58
3.9 แสดงการจัดกลุ่มข้อมูลความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky luminance) ตามสภาพท้องฟ้า ซึ่งบอกด้วยค่า cloud index (n) และตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่บอกด้วยมุมเซนิธของดวงอาทิตย์(Zs) (ค่า Zs เป็นค่ากึ่งกลางช่วง เช่น $Zs = 15^\circ$ หมายถึง ข้อมูลที่ Zs อยู่ในช่วง $Zs = 10^\circ$ ถึง $Zs = 20^\circ$) 60
3.10 แผนภูมิแสดงการหมุนเซลล์ข้อมูลความเข้มแสงสว่างให้ดวงอาทิตย์ไปอยู่ทางทิศใต้ 61
3.11 แสดงตัวอย่างการเฉลี่ยข้อมูลความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าแบบเซลล์ต่อเซลล์ กรณี n = 0.1 62
3.12 แสดงตัวอย่างของการแบ่งค่า χ ออกเป็นช่วง ๆ ในกรณีของ $Zs = 30^\circ$, n = 0.1 63
3.13 แสดงตัวอย่างของการแบ่งโซนของข้อมูลตามแนว Z คงที่ค่าต่าง ๆ ในกรณีของ $Zs = 30^\circ$, n = 0.1 63

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

รูปที่ หน้า

3.14 การแบ่งข้อมูลความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (L) ออกเป็นโซนตามช่วงของมุม χ และการกำหนดตำแหน่งของเซลล์อ้างอิงตามแนว Z (Z_{ref}) เพื่อเอาค่าของ L ตามโซนของ χ ไปหารด้วย $L(Z_{ref})$ สำหรับกำจัด f 64

3.15 การแบ่งข้อมูลความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าออกเป็นโซนมุม Z และการกำหนดตำแหน่งของเซลล์ อ้างอิงตามแนว χ เพื่อเอาค่าของ L ตามโซนของ Z ไปหาร $L(Z_i, \chi_{ref})$ สำหรับกำจัด φ 66

3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และ $n = 0.1$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 69

3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และ $n = 0.1$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 69

3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 30^{\circ}$ และ $n = 0.1$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 70

3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 45^{\circ}$ และ $n = 0.1$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 70

3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 60^{\circ}$ และ $n = 0.1$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 71

3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และ $n = 0.1$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 71

3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และ $n = 0.3$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 72

3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และ $n = 0.3$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 72

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

รูปที่ หน้า

3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 30^{\circ}$ และ $n = 0.3$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 73

3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 45^{\circ}$ และ $n = 0.3$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 73

3.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 60^{\circ}$ และ $n = 0.3$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 74

3.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และ $n = 0.3$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 74

3.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และ $n = 0.5$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 75

3.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และ $n = 0.5$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 75

3.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 30^{\circ}$ และ $n = 0.5$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 76

3.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 45^{\circ}$ และ $n = 0.5$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 76

3.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 60^{\circ}$ และ $n = 0.5$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 77

3.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ ดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และ $n = 0.5$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน

มหาวิทยาลัยศิลปากร ศูนย์วิทยทรัพยากร

รูปที่ หน้า
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 77
3.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และ $n = 0.7$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 78
3.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และ $n = 0.7$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 78
3.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 30^{\circ}$ และ $n = 0.7$โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 79
3.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 45^{\circ}$ และ $n = 0.7$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 79
3.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 60^{\circ}$ และ $n = 0.7$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 80
3.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และ $n = 0.7$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 80
3.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และ $n = 0.9$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 81
3.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และ $n = 0.9$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 81
3.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ $Zs = 30^{\circ}$ และ $n = 0.9$โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบน
ท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 82
3.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของ

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

ดวงอาทิตย์ $Zs = 45^{\circ}$ และ $n = 0.9$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 82

3.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 60^{\circ}$ และ $n = 0.9$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 83

3.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z ที่มุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และ $n = 0.9$ โดยที่ Z เป็นค่ามุมเซนิธของจุดบนท้องฟ้าและ Z_{ref} เป็นค่ามุมเซนิธอ้างอิง 83

3.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และค่า $n = 0.1$ 85

3.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และค่า $n = 0.3$ 85

3.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และค่า $n = 0.5$ 86

3.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และค่า $n = 0.7$ 86

3.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 0^{\circ}$ และค่า $n = 0.9$ 87

3.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และค่า $n = 0.1$ 87

3.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และค่า $n = 0.3$ 88

3.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และค่า $n = 0.5$ 88

3.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และค่า $n = 0.7$ 89

3.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 15^{\circ}$ และค่า $n = 0.9$ 89

3.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 30^{\circ}$ และค่า $n = 0.1$ 90

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

รูปที่ หน้า

3.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 30^\circ$ และค่า $n = 0.3$ 90

3.58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 30^\circ$ และค่า $n = 0.5$ 91

3.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 30^\circ$ และค่า $n = 0.7$ 91

3.60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 30^\circ$ และค่า $n = 0.9$ 92

3.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 45^\circ$ และค่า $n = 0.1$ 92

3.62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 45^\circ$ และค่า $n = 0.3$ 93

3.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 45^\circ$ และค่า $n = 0.5$ 93

3.64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 45^\circ$ และค่า $n = 0.7$ 94

3.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 45^\circ$ และค่า $n = 0.9$ 94

3.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 60^\circ$ และค่า $n = 0.1$ 95

3.67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 60^\circ$ และค่า $n = 0.3$ 95

3.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 60^\circ$ และค่า $n = 0.5$ 96

3.69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 60^\circ$ และค่า $n = 0.7$ 96

3.70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 60^\circ$ และค่า $n = 0.9$ 97

3.71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 75^\circ$ และค่า $n = 0.1$ 97

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

รูปที่ หน้า

3.72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และค่า $n = 0.3$ 98

3.73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และค่า $n = 0.5$ 98

3.74 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และค่า $n = 0.7$ 99

3.75 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับค่ามุมเซนิธ Z ที่มุมของดวงอาทิตย์ $Zs = 75^{\circ}$ และค่า $n = 0.9$ 99

3.76 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกราฟ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับ Z ที่ Zs ค่าต่าง ๆ และ $n = 0.1$ 100

3.77 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกราฟ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับ Z ที่ Zs ค่าต่าง ๆ และ $n = 0.3$ 100

3.78 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกราฟ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับ Z ที่ Zs ค่าต่าง ๆ และ $n = 0.5$ 101

3.79 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกราฟ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับ Z ที่ Zs ค่าต่าง ๆ และ $n = 0.7$ 101

3.80 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกราฟ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับ Z ที่ Zs ค่าต่าง ๆ และ $n = 0.9$ 102

3.81 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ กับ χ ที่ค่า $n = 0.1$ 105

3.82 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ กับ χ ที่ค่า $n = 0.3$ 106

3.83 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ กับ χ ที่ค่า $n = 0.5$ 106

3.84 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ กับ χ ที่ค่า $n = 0.7$ 107

3.85 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ กับ χ ที่ค่า $n = 0.9$ 107

3.86 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ เฉลี่ย กับ χ ที่ค่า $n = 0.1$ 108

3.87 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ เฉลี่ย กับ χ ที่ค่า $n = 0.3$ 108

3.88 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ เฉลี่ย กับ χ ที่ค่า $n = 0.5$ 109

3.89 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ เฉลี่ย กับ χ ที่ค่า $n = 0.7$ 109

3.90 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ เฉลี่ย กับ χ ที่ค่า $n = 0.9$ 110

3.91 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ กับ χ ในสภาพท้องฟ้าแบบต่างๆ 110

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

รูปที่ หน้า
3.92 แสดงการแบ่งข้อมูล จาก 145 เซลล์ เป็น 25 โซนท้องฟ้า 113
3.93 แสดงการเปรียบเทียบค่า L/L_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา 114
D1 แสดงตำแหน่งของเซลล์ข้อมูล output จำนวน 145 เซลล์ ของเครื่อง sky scanner 163
D2 แสดงมุมยกของแต่ละรอบการหมุนของข้อมูลวัดจากเครื่อง sky scanner 164
D3 แสดงลักษณะทิศทางการหมุนสแกนการวัดค่า L ของเครื่อง sky scanner 165

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สัญลักษณ์

A = พื้นที่ที่แสงตกกระทบหรือแผ่ออก [m^2]

C = ปริมาณเมฆ

d_n = ลำดับของวันในรอบปี [$d_n = 1$ สำหรับวันที่ 1 มกราคม]

E = illuminance [lux]

E_{ed} = ความเข้มรังสีกระจายบนพื้นราบ [W/m^2]

E_{eo} = ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก [W/m^2]

E_{esn} = ความเข้มรังสีตรง [W/m^2]

E_{kh} = ปริมาณแสงสว่างที่ตกกระทบ ณ จุดใดๆ ในห้องที่มองเห็นท้องฟ้าโดยบอกในรูปของ illuminance [lux]

E_0 = แฟคเตอร์สำหรับแก้ผลจากความรีของวงโคจร (eccentricity correction factor) [-]

E_t = สมการเวลา [นาที]

E_{vd} = ความเข้มแสงกระจาย (diffuse illuminance) บนพื้นราบ [lux]

E_{on} = illuminance ของแสงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกที่ระนาบตั้งฉากกับแสงจากดวงอาทิตย์ [lux]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

$f(\zeta)$ = scattering indicatrix function

$\frac{f(\chi)}{f(Z_s)}$ = Indicatrice function, ฟังก์ชันซึ่งแสดงอิทธิพลของระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งของจุดบนท้องฟ้ากับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ [-]

$G_{S\lambda}$ = ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ บนระนาบตั้งฉากกับแสงที่ระยะเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์

I_{bn} = ความเข้มรังสีตรง [W/m^2]

I_{dh} = ความเข้มรังสีกระจายบนพื้นราบ [W/m^2]

I_{on} = ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก [W/m^2]

k = diffuse fraction

k_o = diffuse fraction กรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ

k = maximum luminous efficacy [683 lm/W]

K = secondary scattering coefficient

K_d = diffuse fraction

K_0 = diffuse fraction กรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ

สัญลักษณ์ (ต่อ)

L = ความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า [kcd/m^2]

LST = เวลามาตรฐานท้องถิ่น [ชม. : นาที]

L_s = เส้นลองจิจูดมาตรฐาน [องศา]

L_{loc} = เส้นลองจิจูดของผู้สังเกต [องศา]

$Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ = ค่าสัมพัทธ์ของความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า [cd/m^2]

$Lva(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ = ค่าความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าในทุกสภาพท้องฟ้า [cd/m^2]

L_{vc} = ความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ บนท้องฟ้า [kcd/m^2]

$L_{vc\text{-}cie\text{-}c}$ = ความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ บนท้องฟ้าตามมาตรฐาน CIE กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ [kcd/m^2]

$L_{vc\text{-}cie\text{-}i}$ = ความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ บนท้องฟ้าตามมาตรฐาน CIE กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน [kcd/m^2]

$L_{vc\text{-}cie\text{-}o}$ = ความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ บนท้องฟ้าตามมาตรฐาน CIE กรณีท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทั้งหมด [kcd/m^2]

$L_{vc\text{-}cie\text{-}ct}$ = ความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ บนท้องฟ้าตามมาตรฐาน CIE กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆแบบมีความขุ่นมัวของบรรยากาศ [kcd/m^2]

L_{vcc} = ความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า กรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ [kcd/m^2]

L_{vco} = ความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า กรณีที่ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมทั้งหมด [kcd/m^2]

$Lvz(\gamma_s)$ = ค่าความเข้มแสงสว่าง ณ ตำแหน่งกลางท้องฟ้า [cd/m^2]

L_Z = ความเข้มแสงสว่าง ณ ตำแหน่งกลางท้องฟ้า [kcd/m^2]

m = air mass

n = ดัชนีเมฆ (cloud index, n) [-]

N_{evg} = normalized global illuminance [dimensionless]

P = primary scattering coefficient

r = ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ [km]

r_0 = ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ [1.496×10^8 km]

R_λ = การตอบสนองของสายตามนุษย์ต่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร ลิขสิทธิ์

สัญลักษณ์ (ต่อ)

ST	=	เวลาดวงอาทิตย์ [ชม. : นาที]
Z	=	มุมเซนิธของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [เรเดียน]
Z_s	=	มุมเซนิธของตำแหน่งดวงอาทิตย์ [เรเดียน]
α	=	มุมเงยของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [เรเดียน]
χ	=	ระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์กับตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [เรเดียน]
ψ	=	มุมอาซิมุธของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [เรเดียน]
ψ_S	=	มุมอาซิมุธของดวงอาทิตย์ [เรเดียน]
Δ	=	sky brightness index
ε	=	sky clearness index
Γ	=	มุมวัน (day angle) [เรเดียน]
δ	=	เดคลิเนชัน [องศา]
α	=	มุมอัลติจูด [องศา]
ω	=	มุมชั่วโมง [องศา]
ϕ	=	ละติจูด [องศา]
ϕ_E	=	ฟลักซ์ของแสงสว่าง [lumen]
ϕ_s	=	มุมอาซิมุธของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [เรเดียน]
$\phi(\gamma)$	=	gradation function
θ	=	มุมตกกระทบของลำแสงบนพื้นเอียง [องศา]
β	=	มุมที่พื้นเอียงทำกับพื้นราบ [องศา]
Ω	=	มุมตัน [steradian]
ρ	=	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆและพื้นผิวโลกในสภาพท้องฟ้าทั่วๆ ไป [-]
ρ_g	=	สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก [-]
ρ_c	=	สัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดของเมฆ [-]
$\frac{\varphi(Z)}{\varphi(0)}$	=	Gradation function, ฟังก์ชันซึ่งแสดงอิทธิพลของระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งของจุดบนท้องฟ้าที่จะหาความเข้มแสงสว่าง [-]
ζ	=	ระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์กับตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [เรเดียน]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์

สัญลักษณ์ (ต่อ)

γ_s = มุมเงยของตำแหน่งดวงอาทิตย์ [เรเดียน]

γ = มุมเงยของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [เรเดียน]

มหาวิทยาลัยศิลปากร สงวนลิขสิทธิ์