TESIS - DA 185401

PENGARUH *FOLDING SHUTTER* TERHADAP PERFORMA PENERANGAN ALAMI DI IKLIM TROPIS

(STUDI KASUS: RUMAH SUSUN)

YASMINE MAWADDAH GHUFRONA
NRP 08111850040005

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Asri Dinapradipta, M.B.Env.
FX Teddy Badai Samodra, S.T., M.T., Ph.D.

Departemen Arsitektur
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020

TESIS - DA 185401

PENGARUH *FOLDING SHUTTER* TERHADAP PERFORMA PENERANGAN ALAMI DI IKLIM TROPIS

(STUDI KASUS: RUMAH SUSUN)

YASMINE MAWADDAH GHUFRONA
NRP 08111850040005

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Asri Dinapradipta, M.B.Env.
FX Teddy Badai Samodra, S.T., M.T., Ph.D.

Departemen Arsitektur
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Arsitektur (M.Ars.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:
YASMINE MAWADDAH GHUFRONA
NRP: 08111850040005

Tanggal Ujian: 24 Juni 2020
Periode Wisuda: September 2020

Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Dr. Ir. Asri Dinapradipta, M.B.Env. .....
   NIP: 19670301 199203 2 002

2. FX Teddy Badai Samodra, S.T., M.T., Ph.D. .....
   NIP: 19800406 200801 1 008

Penguji:

1. Dr. Ima Defiana, S.T., M.T. .....
   NIP: 19700519 199703 2 001

2. Ir. Purwanita Setijanti, M.Sc., Ph.D. .....
   NIP: 19590427 198503 2 001

Kepala Departemen Arsitektur
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIAN DEPARTEMEN ARSITEKTUR

Dr. Dewi Septanti, S.Pd., S.T., M.T.
NIP: 19690907 1997022 001

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yasmine Mawaddah Ghufrona

NRP : 08111850040005

Program Studi : Magister (S2)

Jurusan : Arsitektur

Dengan pernyataan ini saya menyatakan bahwa tesis yang saya tulis dengan judul:

Pengaruh *Folding Shutter* Terhadap Performa Penerangan Alami Di Iklim Tropis (Studi Kasus: Rumah Susun)

adalah benar-benar karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila di kemudian hari diketahui terjadi penyimpangan dari pernyataan yang saya buat, maka saya siap menerima sanksi sesuai aturan yang berlaku.

Surabaya, 04 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan;

METERAI TEMPEL

E1809AHF497827349

6000

ENAM RIBU RUPIAH

Yasmine Mawaddah Ghufrona

NRP. 08111850040005

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGARUH *FOLDING SHUTTER* TERHADAP PERFORMA PENERANGAN ALAMI DI IKLIM TROPIS (STUDI KASUS: RUMAH SUSUN)

Nama mahasiswa	: Yasmine Mawaddah Ghufrona
NRP	: 08111850040005
Pembimbing	: Dr. Ir. Asri Dinapradipta, M.B.Env.
Co. Pembimbing	: FX Teddy Badai Samodra, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Pemanfaatan cahaya matahari yang berlimpah di iklim tropis sebagai penerangan alami dapat membantu menghemat konsumsi energi pada bangunan rumah susun. Dalam menghadapi kondisi di tropis, dibutuhkan strategi penerangan menggunakan sistem *shading* dinamis untuk menghadapi perubahan kondisi lingkungan. Adapun performa *shading* dinamis sangat dipengaruhi oleh sistem kontrol dan teknik gerak yang diterapkan. Kombinasi gerak lipat dan rotasi pada *folding shutter* berpotensi menghasilkan pergerakan dan konfigurasi yang lebih bervariasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh *folding shutter* terhadap performa penerangan alami dalam konteks bangunan rumah susun. Eksperimen dengan bantuan simulasi *Radiance* digunakan sebagai metode penelitian. Variabel *folding shutter* yang meliputi konfigurasi operatif, sudut kisi-kisi *shutter*, dan jarak penempatan model diuji pada kondisi langit dan posisi matahari berbeda sebagai landasan untuk menyusun konsep model yang sesuai untuk iklim tropis.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kontrol gerak lipat dapat membantu mengkontrol kuantitas cahaya, namun tidak berfungsi baik pada kondisi terkritis di iklim tropis. Adapun rotasi kisi-kisi *shutter* dapat mendifusikan serta mengkontrol pantulan cahaya lebih baik dibandingkan konfigurasi operatif. Konfigurasi tertutup dengan kisi-kisi *shutter* 0° dan 45° dapat mendistribusikan cahaya paling baik pada langit *partly cloudy*, dan kisi-kisi *shutter* 60° hingga 90° berfungsi baik pada langit *overcast*. Integrasi *folding shutter* dengan *overhang* 60 cm menghasilkan performa yang paling memenuhi kenyamanan visual, karena dapat mencegah paparan cahaya langsung sekaligus memantulkan cahaya ke dalam ruang.

Kata kunci: Strategi Penerangan Alami, Sistem *Shading* Dinamis, Gerak Lipat, Gerak Rotasi, Simulasi *Radiance*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

THE EFFECT OF FOLDING SHUTTER ON THE DAYLIGHTING PERFORMANCE IN TROPICAL CLIMATE (CASE STUDY: FLATS BUILDING)

By	:	Yasmine Mawaddah Ghufrona
Student Identity Number	:	08111850040005
Supervisor	:	Dr. Ir. Asri Dinapradipta, M.B.Env.
Co. Supervisor	:	FX Teddy Badai Samodra, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

The utilization of abundant sunlight in tropical climates as daylighting can help to save energy consumption in flats buildings. Based on the daylight conditions in tropics, there is a need for dynamic shading device applications in the façade to respond to environmental change. The dynamic shading device performance is greatly influenced by its control system and motion techniques. The combination of folding and rotation motion on the folding shutter has the potential to produce more varied movements and configurations.

This study aims to evaluate the effect of folding shutter on the daylighting performance in the context of flats buildings. Simulation using Radiance was conducted to test the sub-variables of folding shutter. The operative configurations, shutter’s rotation angles, and folding shutter’s placement were tested on different sky conditions and sun positions as a basis to make a model concept suitable for different conditions in tropics.

The results showed that the application of folding motion can help to control the daylight quantity, but does not function well in the most critical conditions in tropical climates. Whereas rotating the shutter can help to diffuse and control the direction of daylight reflection better than the operative configurations. A closed configuration with a shutter's angle of 0° and 45° can distribute daylight evenly in the partly cloudy sky, and shutter's angle of 60° to 90° performed the best in the overcast sky. The integration of the folding shutter with a 60 cm overhang produced the most stable performance that can meet the visual comfort because it can block the direct sunlight while reflecting enough daylight into the room.

Key words: Daylighting Strategy, Dynamic Shading Device, Folding Motion, Rotation Motion, Radiance Simulation.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala karunia-Nya, penulis dapat menyelesain laporan tesis ini dengan sebaik-baiknya. Tesis ini dibuat sebagai syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan kurikulum program S2 (Strata 2) pada Departemen Arsitektur, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tesis ini dapat terwujud berkat bantuan dari berbagai pihak yang telah membantu dan membimbing penulis selama proses penulisan tesis. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Pembimbing tesis Dr. Ir. Asri Dinapradipta, M.B.Env. dan FX Teddy Badai Samodra, S.T., M.T., Ph.D. atas kesabarannya dalam memberikan bimbingan, ilmu, saran, dan motivasi kepada penulis selama penulisan tesis ini,
2. Penguji tesis Dr. Ima Defiana, S.T., M.T. dan Ir. Purwanita Setijanti, M.Sc., Ph.D. atas kritik dan saran yang bermanfaat dalam penulisan tesis ini,
3. Segenap dosen dan staff Arsitektur ITS yang telah membantu penulis dalam penyusunan laporan tesis serta kelancaran pengambilan data tesis,
4. Keluarga penulis yang selalu memberi dukungan moral, semangat dan do’a kepada penulis sehingga tesis ini dapat diselesaikan,
5. Teman-teman penulis di Arsitektur ITS dan Arsitektur Lingkungan 2018, yang selalu memberikan waktu untuk berdiskusi, berbagi informasi dan memberi motivasi kepada penulis.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penulisan tesis ini, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat maupun kontribusi terhadap perkembangan bidang arsitektur, praktisi arsitektur, dan pembaca.

Surabaya, 04 Agustus 2020

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

Hal

JUDUL PENELITIAN ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **iii**
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS ..... **v**
ABSTRAK ..... **vii**
ABSTRACT ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xvii**
DAFTAR TABEL ..... **xxi**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **xxiii**
BAB 1. PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.1.1 Pemanfaatan Penerangan Alami 1
1.1.2 Permasalahan Penerangan Alami pada Rumah susun 1
1.1.3 Sistem *Shading* Dinamis sebagai Strategi Penerangan Alami 2
1.2 Perumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 5
1.4 Manfaat Penelitian 6
1.5 Batasan Penelitian 6
BAB 2. KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI **7**
2.1 Penerangan Alami 7
2.1.1 Tujuan dan Manfaat Penerangan Alami 8
2.1.2 Sumber Penerangan Alami 9
2.1.3 Pola Pergerakan Matahari 11
2.1.4 Strategi Penerangan Alami 13

2.2 Konteks Penerangan Alami di Iklim Tropis 15
2.2.1 Parameter dalam Pengukuran Performa Penerangan Alami 16
2.2.2 Permasalahan Penerangan Alami di Iklim Tropis 18
2.3 Rumah susun 18
2.3.1 Tipologi Bangunan dan Unit Rumah susun 19
2.3.2 Rumah susun di Kota Surabaya 22
2.3.3 Standar Penerangan di Rumah susun 24
2.3.4 Permasalahan Penerangan Alami di Rumah susun 27
2.4 Sistem *Shading* Dinamis 28
2.4.1 Konseptual *Folding* 29
2.4.2 *Folding Shutter* 30
2.4.3 Mekanisme *Folding Shutter* 31
2.4.4 Konfigurasi Operatif *Folding Shutter* 33
2.4.5 *Folding Shutter* sebagai Strategi Penerangan Alami 33
2.5 *State of Art* 40
2.6 Sintesis Kajian Pustaka 42
BAB 3. METODE PENELITIAN 45
3.1 Paradigma Penelitian 45
3.2 Metode Penelitian 46
3.3 Obyek dan Subyek Penelitian 47
3.4 Variabel Penelitian 48
3.4.1 Jenis Variabel 48
3.4.2 Definisi Operasional 49
3.5 Data Penelitian 53
3.5.1 Jenis data dan Teknik Pengumpulan data 53
3.5.2 Analisis Data 54

3.6 Pengumpulan Data Lapangan 57
3.6.1 Prosedur Pengukuran Lapangan 58
3.7 Prosedur Simulasi 60
3.7.1 Landasan Permodelan *Folding Shutter* 62
3.7.2 Model Simulasi 63
3.8 Tahap Penelitian 65
BAB 4. ANALISIS HASIL PENGUKURAN LAPANGAN 67
4.1 Deskripsi Kondisi Eksisting 67
4.1.1 Tipologi Unit dan Dimensi Ruang 68
4.1.2 Warna dan Reflektifitas Ruang 70
4.2 Analisis Hasil Pengukuran Lapangan 70
4.2.1 Analisis Kondisi Iklim 70
4.2.2 Performa Penerangan Alami di Unit rumah susun 72
4.3 Kesimpulan Hasil Pengukuran Lapangan 81
BAB 5. ANALISIS DAN PEMBAHASAN HASIL SIMULASI 83
5.1 Verifikasi Hasil Pengukuran dan Simulasi *Radiance* 83
5.2 Pengaruh *Folding Shutter* terhadap Performa Penerangan Alami 86
5.2.1 Iluminan dan Distribusi cahaya 86
5.2.2 *Daylight Factor* (DF) 98
5.3 Analisis Kuat Hubungan *Folding Shutter* terhadap Performa Penerangan Alami (Korelasi *Spearman*) 107
5.4 Konsep Model *Folding Shutter* 110
5.5 Diskusi Hasil Simulasi 113
5.6 Kesimpulan Hasil Simulasi 115
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN 119
6.1 Kesimpulan 119

6.2 Saran 121

DAFTAR PUSTAKA 123

LAMPIRAN 133

DAFTAR GAMBAR

Hal

Gambar 1.1 *Folding shutter* pada kondisi terbuka, semi-terbuka, tertutup 3
Gambar 2.1 Sumber Penerangan alami (Lechner, 2015) 9
Gambar 2.2 Distribusi cahaya di langit berawan tebal (Lechner, 2015)..... 9
Gambar 2.3 Distribusi cahaya di langit cerah (Lechner, 2015) 10
Gambar 2.4 Langit cerah, langit *partly cloudy* dan langit overcast (Illumination CIE) 10
Gambar 2.5 Refleksi cahaya matahari (Lechner, 2015)..... 11
Gambar 2.6 Pola pergerakan matahari pada variasi tahunan (Lechner, 2015) 12
Gambar 2.7 Sudut *Altitude* dan Radiasi matahari yang diserap permukaan (Lechner, 2015) 13
Gambar 2.8 Hukum *Cosine* (Sudut *Cosine* θ dan Cahaya) (Lechner, 2015) 13
Gambar 2.9 Urutan reflektivitas permukaan pada ruang (Lechner, 2015) 14
Gambar 2.10 Radiasi terdifusi pada iklim tropis lembab (Lechner, 2015)..... 16
Gambar 2.11 Pola pergerakan matahari pada iklim tropis (garis *equator*)..... 16
Gambar 2.12 *Simplex*, *Duplex*, dan *Triplex* (De Chiara, Joseph, 1995) 19
Gambar 2.13 Koridor *single-loaded* (De Chiara, Joseph, 1995)..... 20
Gambar 2.14 Koridor *double-loaded* (De Chiara, Joseph, 1995) 20
Gambar 2.15 Akses eksterior multiple (De Chiara, Joseph, 1995)..... 21
Gambar 2.16 Akses interior multiple (De Chiara, Joseph, 1995) 21
Gambar 2.17 Tower (De Chiara, Joseph, 1995)..... 21
Gambar 2.18 Multi Tower (De Chiara, Joseph, 1995)..... 22
Gambar 2.19 Unit rumah susun Siwalankerto 2 di Surabaya (Penulis, 2020)..... 24
Gambar 2.20 Posisi TUU dan TUS di dalam ruang (SNI 03-2396-2001)..... 25
Gambar 2.21 *Rigid folding* dan *Curved folding* (dari kiri) (Shen, 2017)..... 30
Gambar 2.22 Contoh ilustrasi *Folding shutter*..... 31
Gambar 2.23 Teknik lipat pada fasad Kiefer Technic Showroom..... 32
Gambar 2.24 Gerak translasi dan scaling pada *folding shutter* (Moloney, 2011) 32

Gambar 2.25 *Folding shutter* pada kondisi terbuka, semi-terbuka, tertutup 33
Gambar 2.26 Warna cerah membantu refleksi cahaya (Lechner, 2015) 34
Gambar 2.27 *Sloped external shading* (Kim, 2010) 35
Gambar 2.28 *Folding panel* (Kensek, 2011) 35
Gambar 2.29 Pengaruh sudut kemiringan kisi-kisi *shutter* pada pantulan cahaya (Lechner, 2015) 36
Gambar 2.30 Sudut *altitude* matahari pada *equinox* (21 Maret) 37
Gambar 2.31 Sudut *altitude* matahari pada 21 Juni dan 21 Desember 37
Gambar 2.32 Penelitian sudut kemiringan kisi-kisi oleh Lim (2013) dan Carletti (2016) 38
Gambar 2.33 Pemantulan cahaya dengan *light shelf* (Lechner, 2015) 39
Gambar 2.34 Integrasi *light shelf* dan *partial blinds* (Lim, 2012) 39
Gambar 2.35 Pembayangan untuk mendukung akses pemandangan (Lechner, 2015) 40
Gambar 3.1 *Site maps* Rusunawa Siwalankerto 2 (Google Maps) 47
Gambar 3.2 Tampak luar Rusunawa Siwalankerto 2 (Penulis, 2020) 47
Gambar 3.3 Gambar potongan dan perspektif 3D dari FS1, FS2, dan FS3 50
Gambar 3.4 Tahap Analisis Statistik Deskriptif (Penulis 2020) 55
Gambar 3.5 Korelasi dengan regresi linear 57
Gambar 3.6 Tampak samping posisi titik pengukuran (Penulis, 2020) 58
Gambar 3.7 Tampak atas posisi titik pengukuran (Penulis, 2020) 59
Gambar 3.8 Lux Meter (Penulis, 2020) 59
Gambar 3.9 Penempatan kamera pada model simulasi (Penulis, 2020) 60
Gambar 3.10 Grid analisis pada pengukuran lapangan dan simulasi 61
Gambar 3.11 Data input untuk simulasi *Radiance* (Penulis, 2020) 62
Gambar 3.12 Tahap Penelitian 66
Gambar 4.1 Layout keseluruhan Rusunawa Siwalankerto 2 (Penulis, 2020) 67
Gambar 4.2 Fasad Rusunawa Siwalankerto 2 (Penulis, 2020) 68
Gambar 4.3 Denah unit 501 (Penulis, 2020) 69
Gambar 4.4 Foto dokumentasi unit 501 (Penulis, 2020) 69
Gambar 4.5 Bukaan jendela dan pemandangan yang terlihat (Penulis, 2020) 69
Gambar 4.6 Langit *partly cloudy* dan *overcast* (Penulis, 2020) 71

Gambar 4.7 Lama Penyinaran Matahari di Bulan Maret 2020 (diolah dari data BMKG Surabaya tahun 2020) 71
Gambar 4.8 Rata-rata *daylight factor* pada kondisi langit *partly cloudy* 75
Gambar 4.9 Rata-rata *daylight factor* pada kondisi langit *overcast* 79
Gambar 5.1 Perbandingan nilai iluminan pengukuran lapangan dengan simulasi 84
Gambar 5.2 Perbandingan nilai DF pengukuran lapangan dengan simulasi 85
Gambar 5.3 Grid DF Pengukuran Lapangan 2 dan Simulasi *Radiance* 85
Gambar 5.4 Distribusi cahaya dari sudut kisi-kisi *shutter* (waktu pagi) 88
Gambar 5.5 Distribusi cahaya dari sudut kisi-kisi *shutter* (waktu siang) 90
Gambar 5.6 Distribusi cahaya dari sudut kisi-kisi *shutter* (waktu sore) 92
Gambar 5.7 Rasio uniformitas dari sudut kisi-kisi FS1, FS2 dan FS3 93
Gambar 5.8 Deviasi iluminan dari konfigurasi operatif pada waktu pagi 95
Gambar 5.9 Deviasi iluminan dari konfigurasi operatif pada waktu siang 96
Gambar 5.10 Deviasi iluminan dari konfigurasi operatif pada waktu sore 97
Gambar 5.11 Rata-rata DF dari penerapan sudut kisi-kisi *shutter* berbeda 98
Gambar 5.12 Persentase titik ukur yang memenuhi standar DF dari sudut kisi-kisi *shutter* berbeda 100
Gambar 5.13 Grafik DF dari penerapan FS1-0 dan FS1-135 101
Gambar 5.14 Grafik DF dari penerapan FS2-0 dan FS2-90 101
Gambar 5.15 Grafik DF dari penerapan FS3-0 dan FS3-45 101
Gambar 5.16 Rata-rata DF dari konfigurasi operatif *folding shutter* 102
Gambar 5.17 Persentase titik ukur yang memenuhi standar DF dari konfigurasi operatif *folding shutter* 103
Gambar 5.18 Regresi linear dari jarak penempatan model pada fasad 105
Gambar 5.19 Regresi linear dari jarak penempatan model (penambahan *overhang*) 106
Gambar 5.20 Persentase titik ukur yang memenuhi standar DF dari jarak penempatan model 106
Gambar 5.21 Kuat hubungan sub-variabel *folding shutter* dengan performa penerangan alami 108
Gambar 5.22 Konsep gerak operatif *folding shutter* berdasarkan kondisi di iklim tropis 111

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Hal

Tabel 2.1 Konteks Penerangan Alami di Iklim Tropis 15
Tabel 2.2 Standar *daylight factor* untuk negara beriklim tropis 17
Tabel 2.3 Contoh Rumah susun di Surabaya 23
Tabel 2.4 Faktor Langit pada Bangunan Tempat Tinggal 25
Tabel 2.5 Standar Kuat Penerangan pada Bangunan Tempat Tinggal..... 26
Tabel 2.6 Penelitian tentang Sistem *Shading* Dinamis dengan teknik lipat..... 41
Tabel 3.1 Kriteria pemilihan obyek penelitian (*base case*).....48
Tabel 3.2 Variabel Penelitian..... 48
Tabel 3.3 Jenis data dan Teknik Pengumpulan data 53
Tabel 3.4 Klasifikasi titik ukur berdasarkan rentang DF 56
Tabel 3.5 Interpretasi koefisien korelasi *Spearmen* 57
Tabel 3.6 Input Material pada Ecotect 61
Tabel 3.7 Kriteria model *folding shutter*..... 63
Tabel 3.8 Model Simulasi *Folding Shutter* 64
Tabel 3.9 Rencana Penelitian..... 65
Tabel 4.1 Jenis Material pada Unit Rusunawa Siwalankerto 2.....70
Tabel 4.2 Hasil pengukuran nilai iluminan pada eksisting (langit *partly cloudy*) 73
Tabel 4.3 Klasifikasi titik ukur berdasarkan rentang DF (langit *partly cloudy*) .. 76
Tabel 4.4 Hasil pengukuran nilai iluminan pada eksisting (langit *overcast*)..... 78
Tabel 4.5 Klasifikasi titik ukur berdasarkan rentang DF (langit *overcast*)..... 81
Tabel 5.1 Ilustrasi konfigurasi *folding shutter* berdasarkan kondisi di iklim tropis
.....112

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

Hal

Lampiran 1. Nilai Iluminan *outdoor* pada eksisting (langit *partly cloudy*) 133
Lampiran 2. Nilai Iluminan *outdoor* pada eksisting (langit *overcast*) 134
Lampiran 3. Nilai DF hasil pengukuran eksisting pada kondisi langit *partly cloudy* 136
Lampiran 4. Nilai DF hasil pengukuran eksisting pada kondisi langit *overcast* 137
Lampiran 5. Data iluminan pengukuran lapangan dan simulasi *Radiance* 138
Lampiran 6. Data *daylight factor* pengukuran lapangan dan simulasi *Radiance* 139
Lampiran 7. Hasil simulasi iluminan dari sudut kisi-kisi *folding shutter* 140
Lampiran 8 Persentase distribusi cahaya dari sudut kisi-kisi *folding shutter* 143
Lampiran 9. Hasil simulasi iluminan dari konfigurasi operatif *folding shutter* .. 144
Lampiran 10. Hasil simulasi *daylight factor* dari sudut kisi-kisi *folding shutter* 147
Lampiran 11. Hasil simulasi *daylight factor* dari konfigurasi operatif *folding shutter* 150
Lampiran 12. Hasil simulasi *daylight factor* dari jarak penempatan *folding shutter* 151
Lampiran 13. Grafik DF pada kondisi eksisting 149
Lampiran 14. Perhitungan Kuat hubungan dengan Korelasi *Spearman* 153

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

1.1.1 Pemanfaatan Penerangan Alami

Penerangan alami pada bangunan residensial memiliki banyak manfaat diantaranya yaitu untuk visualisasi mata, kenyamanan psikologis, meningkatkan kesehatan, serta produktivitas pengguna (Al Dakheel, 2017). Selain itu, penerangan alami juga dapat menurunkan total konsumsi energi bangunan untuk mendukung terciptanya lingkungan yang *sustainable* (Lechner, 2015). Oleh sebab itu, maka penerangan alami merupakan faktor yang penting untuk mendukung aktivitas dan kenyamanan pengguna. Manfaat dari penerangan alami tersebut hanya dapat direalisasikan jika kebutuhan visual dan kriteria kenyamanan telah dipertimbangkan dengan matang pada desain bangunan (Andersen, 2013). Namun, penerangan alami yang tidak terkontrol dapat menyebabkan efek silau, iluminan tinggi dan distribusi cahaya yang tidak merata, yang dapat mengganggu kenyamanan visual (Lim, 2016). Dengan ini maka untuk memanfaatkan penerangan alami dalam bangunan dengan sebaik-baiknya diperlukan adanya strategi kontrol cahaya yang disesuaikan dengan kondisi iklim setempat.

1.1.2 Permasalahan Penerangan Alami pada Rumah susun

Penerangan alami sebagai upaya konservasi energi memiliki manfaat yang besar jika diterapkan pada bangunan hunian untuk masyarakat berpenghasilan rendah (MBR). Hal ini karena pengelolaan bangunan dengan peran serta MBR seringkali memiliki kendala pada aspek pembiayaan dan prasarana bangunan (Suryani, 2017). Salah satu bangunan hunian yang dibangun secara khusus untuk memenuhi kebutuhan rumah tinggal untuk MBR adalah rumah susun. Pemanfaatan cahaya matahari sebagai penerangan utama di rumah susun dapat membantu menghemat konsumsi energi bangunan serta meningkatkan kenyamanan penghuni. Namun, kualitas penerangan alami sangat dipengaruhi oleh geometri bangunan, orientasi bangunan, alokasi ruang dan bukaan cahaya (Wong, 2017; Latifah, 2015).

Hal ini menunjukkan bahwa elemen-elemen arsitektur dan interior pada rumah susun berperan penting dalam menghasilkan performa penerangan alami.

Tipikal rumah susun di kota Surabaya memiliki koridor interior (*double-loaded*) dengan bukaan cahaya yang lebar. Dari penelitian terdahulu tentang tipe tersebut oleh Mufidah (2016) ditemukan bahwa cahaya matahari lebih mudah masuk ke dalam ruang melalui kedua sisi fasad, namun masih diperlukan adanya isolasi panas untuk menahan radiasi matahari. Penelitian Avesta (2017) menunjukkan bahwa penerangan alami yang masuk melalui bukaan cahaya yang lebar cenderung melebihi standar kenyamanan visual. Hal ini disebabkan karena tipikal bukaan cahaya pada rumah susun belum dilengkapi oleh sistem *shading* untuk menahan intensitas cahaya matahari yang tinggi. Jumlah cahaya matahari yang berlebihan tersebut dapat menyebabkan ketidaknyamanan visual dan permasalahan silau (Munaaim, 2016). Hal ini menunjukkan bahwa tipikal desain bukaan dan fasad di rumah susun masih kurang dapat mengantisipasi efek samping dari cahaya matahari. Dengan ini maka diperlukan penerapan sistem *shading* pada bukaan rumah susun untuk mengkontrol intensitas dan distribusi cahaya supaya dapat menghasilkan penerangan yang memenuhi kenyamanan visual.

1.1.3 Sistem *Shading* Dinamis sebagai Strategi Penerangan Alami

Kondisi langit dan pergerakan matahari di tiap iklim sangat mempengaruhi performa penerangan alami bangunan. Iklim tropis memiliki radiasi matahari yang tinggi antara 5,500-7,500 wh/m^2 (Koenigsberger, 1973), dan kondisi langit setengah berawan/*partly cloudy* yang menyebabkan kuat cahaya penerangan dapat mengalami perubahan yang cepat (Givoni, 1998). Adapun komposisi radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi dapat bervariasi yang dipengaruhi oleh sudut *altitude* matahari (Lechner, 2015). Berdasarkan kondisi tersebut, maka diperlukan strategi penerangan menggunakan sistem *shading* yang memiliki fleksibilitas gerak supaya dapat disesuaikan dengan perubahan kondisi langit dan matahari. Sistem *shading* dinamis (*dynamic shading device)* adalah *shading* yang adaptif dan responsif pada kondisi lingkungan karena karakternya yang bisa digerakkan (O'Brien, 2013) dan dapat dikendalikan sesuai dengan preferensi pengguna (Nicol, 2002). Penerapan sistem *shading* dinamis pada rumah susun

dapat berfungsi untuk mengkontrol intensitas dan distribusi cahaya yang masuk supaya dapat digunakan dalam rentang kenyamanan visual.

Performa dari sistem *shading* dinamis sangat dipengaruhi oleh sistem kontrol dan teknik gerak yang diterapkan. Sistem kontrol manual lebih sesuai diterapkan pada rumah susun karena memiliki biaya instalasi yang murah, dan pergerakannya dapat dimodifikasi langsung oleh pengguna (Kim, 2009). Pergerakan sistem *shading* dinamis dapat dilakukan dengan teknik gerak translasi, rotasi, *scaling* dan deformasi (Moloney, 2009). Teknik gerak yang cukup sering digunakan adalah teknik rotasi, seperti yang diterapkan pada *shutter/blinds*. Sedangkan pergerakan dinamis yang lebih kompleks belum banyak diteliti, khususnya sistem *shading* yang *foldable* dan *deployable* (Konstantoglou, 2016). Sehubungan dengan itu, penelitian ini akan melengkapi penelitian terdahulu dengan mengaplikasikan kombinasi beberapa teknik gerak pada sistem *shading* dinamis.

Folding shutter adalah pengembangan dari *shutter* yang dapat digerakkan dengan cara dilipat. *Folding shutter* mengkombinasikan gerak translasi, rotasi dan *scaling* (Moloney, 2009), yang dapat menghasilkan pergerakan dan konfigurasi bentuk yang lebih bervariasi. Gambar 1.1 menunjukkan konfigurasi yang dihasilkan *folding shutter* dari kondisi terbuka hingga tertutup ketika model dioperasikan. Setiap konfigurasi *folding shutter* memiliki persentase bukaan, sudut lipatan dan sudut kisi-kisi *shutter* berbeda yang berpotensi menghasilkan performa penerangan yang responsif pada kondisi langit dan pergerakan matahari di iklim tropis.

Gambar 1.1 Folding *shutter* pada kondisi terbuka, semi-terbuka, tertutup
Sumber : https://www.contemporist.com/watch-the-folding-*shutter*-on-this-house-open-vertically/

Penelitian terdahulu tentang penerangan alami di rumah susun bertipe *double-loaded* yang dilakukan oleh Mufidah (2016) menunjukkan bahwa

dibutuhkan pengelolaan fasad secara vertikal maupun horizontal untuk mendukung penerangan alami. Penelitian Avesta (2017) tentang desain bukaan rumah susun menunjukkan bahwa diperlukan penerapan sistem *shading* pada bukaan rumah susun untuk mengkontrol cahaya yang masuk. Penelitian sistem *shading* dengan teknik lipat yang telah dilakukan diantaranya oleh Kensek (2011), yang menunjukkan bahwa penerapan *folding panel* dapat mengurangi efek panas sebesar 32,7%; dan Baek (2018) menunjukkan bahwa *folding shading device* mampu mengkontrol proyeksi pembayangan terhadap sudut matahari dan mengurangi efek panas sebesar 61,74%. Kim (2010) mengkaji tentang *sloped external shading* dengan kisi-kisi *shutter*, hasil penelitian menunjukkan peningkatan nilai iluminan pada area terdalam ruang jika dibandingkan dengan *horizontal shutter* biasa. Al-Dakheel (2017) menyatakan bahwa potensi pergerakan *folding* perlu diteliti pada berbagai kondisi iklim. Selain itu, penelitian mengenai *shading* eksternal pada fasad bangunan vertikal di iklim tropis masih jarang dilakukan (Al-Masrani, 2018).

Berdasarkan penelitian terdahulu dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian mengenai sistem *shading* dinamis dengan pergerakan lipat/*folding* lebih berfokus pada performa termal. Sedangkan pengaruh dari kombinasi teknik gerak lipat dan rotasi pada *folding shutter* terhadap performa penerangan alami belum diteliti lebih mendalam. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk melengkapi penelitian terdahulu tentang sistem *shading* dinamis dengan kombinasi teknik gerak lipat dan rotasi dalam aspek performa penerangan alami. Selain itu, penelitian ini dilakukan sebagai upaya konservasi energi untuk bangunan rumah susun dengan memanfaatkan penerangan alami. Hasil yang diharapkan adalah bahwa *folding shutter* dapat menghasilkan performa penerangan alami yang memenuhi kenyamanan visual pada kondisi langit dan matahari berbeda di iklim tropis.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka ditemukan rumusan masalah dalam penelitian sebagai berikut:

a. Telah diketahui bahwa penerangan alami di iklim tropis memiliki kuat penerangan yang tinggi dan berubah dengan cepat karena kondisi langit yang setengah berawan. Hal tersebut dapat menyebabkan cahaya yang masuk

terlalu intens dengan distribusi tidak merata yang dapat mengganggu kenyamanan visual. Namun, tipikal fasad rumah susun di Surabaya tidak dilengkapi dengan sistem *shading* untuk mengkontrol cahaya yang masuk. Penerapan sistem *shading* dinamis memiliki kelebihan dalam menghadapi perubahan kondisi iklim karena karakternya yang dapat digerakkan. *Folding shutter* sebagai sistem *shading* dinamis memiliki dua teknik gerak, yaitu dengan cara dilipat yang menghasilkan konfigurasi operatif dan rotasi sudut kisi-kisi *shutter*. Namun, pengaruh dan kuat hubungan dari sub variabel *folding shutter* tersebut terhadap performa penerangan alami masih belum diteliti lebih mendalam, terutama dalam konteks iklim tropis.

b. Performa penerangan alami sangat dipengaruhi oleh kondisi langit dan posisi matahari pada waktu dan iklim setempat. Dalam menghadapi pola pergerakan matahari dalam periode tahunan, maka dibutuhkan konsep model atau strategi kontrol pada sistem *shading* dinamis. *Folding shutter* dapat menghasilkan konfigurasi operatif dengan persentase bukaan, sudut kemiringan lipatan dan sudut kisi-kisi *shutter* berbeda. Namun, setiap konfigurasi tersebut dapat menghasilkan kecenderungan performa penerangan alami yang berbeda pada tiap kondisi di iklim tropis. Oleh sebab itu, maka diperlukan adanya konsep model *folding shutter* untuk kebutuhan penerangan alami di rumah susun dengan mempertimbangkan perubahan kondisi iklim.

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan maka ditemukan pertanyaan penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *folding shutter* sebagai sistem *shading* dinamis terhadap performa penerangan alami di iklim tropis?
2. Bagaimana konsep model *folding shutter* yang sesuai untuk kebutuhan penerangan alami di rumah susun?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah yang telah dijelaskan, maka dapat diketahui tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi performa penerangan alami dari *folding shutter* sebagai sistem *shading* dinamis dalam menghadapi kondisi langit dan matahari di iklim tropis.
2. Menghasilkan konsep model *folding shutter* yang disesuaikan untuk kebutuhan penerangan alami di rumah susun.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan berbagai manfaat secara teoritis maupun praktis, yaitu sebagai berikut:

1. Manfaat teoritis, yaitu bahwa penelitian ini dapat bermanfaat untuk perkembangan strategi penerangan alami di iklim tropis. Khususnya mengenai performa penerangan alami dari sistem *shading* dinamis dengan kombinasi teknik gerak yang kompleks, seperti *folding* dan rotasi.
2. Manfaat praktis, yaitu bahwa penelitian ini dapat bermanfaat untuk berbagai pihak yang terlibat dalam perancangan bangunan, khususnya arsitek dalam memberikan acuan dan saran dengan penerapan *folding shutter* sebagai upaya konservasi energi cahaya pada bangunan rumah susun.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan-batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Batasan lokasi penelitian, yaitu dilakukan di Kota Surabaya, Indonesia.
2. Batasan spesifikasi model, yaitu bahwa model *folding shutter* yang diteliti disesuaikan dengan konteks rumah susun dan kondisi iklim tropis. Dalam hal ini, *folding shutter* difungsikan sebagai *shading* eksternal dengan sistem kontrol manual yang digerakkan secara vertikal.
3. Batasan simulasi, yaitu bahwa simulasi menggunakan program *Radiance* memiliki keterbatasan dalam menghasilkan nilai iluminan *outdoor* dan cahaya langsung yang sesuai dengan kondisi di iklim tropis.
4. Batasan lingkup pembahasan, yaitu bahwa pembahasan mengenai sistem *shading* dinamis lebih berfokus pada performa penerangan alami. Adapun pembahasan mengenai performa termal tidak termasuk dalam fokus penelitian.

BAB 2
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini dilakukan pembahasan mengenai teori-teori dan kajian pustaka yang melandasi pokok pemikiran penelitian. Adapun teori-teori yang menjadi landasan utama adalah teori terkait penerangan alami dan konteks penerangan di iklim tropis, serta kajian pustaka mengenai penerangan di rumah susun dan sistem *shading* dinamis. Pembahasan yang lebih mendalam dikhususkan pada kajian mengenai faktor-faktor dari penerangan alami, strategi penerangan alami di iklim tropis, permasalahan penerangan alami di rumah susun, jenis-jenis sistem *shading* dinamis, serta mekanisme dan konseptual dari *folding shutter*. Setelah itu, dilakukan juga pembahasan mengenai penelitian-penelitian terkait hingga sintesis kajian pustaka.

2.1 Penerangan Alami

Pada kehidupan sehari-hari, cahaya adalah salah satu elemen alamiah yang memiliki banyak peran dan manfaat bagi makhluk hidup. Menurut Baker (2002), cahaya adalah medium yang dapat menampilkan ruang, bentuk, tekstur, dan warna pada mata. Keberadaan cahaya tidak pernah luput dalam arsitektur karena melalui cahaya, seluruh elemen-elemen bangunan dan lingkungan sekitar dapat terdefinisi oleh mata sehingga dapat menghasilkan pengalaman visualisasi pada pengguna. Selain itu, penerangan juga dibutuhkan untuk membantu aktivitas manusia sehari-hari dan mengenali lingkungan sekitar (Frick, 2008).

Penerangan terbagi menjadi dua jenis, yaitu penerangan alami dan buatan. Penerangan alami adalah pemanfaatan cahaya yang berasal dari benda penerang alam seperti matahari, bulan, dan bintang sebagai penerang ruang (Dora dan Nilasari, 2011). Menurut Steffy (2002), cahaya yang dihasilkan oleh matahari dan mengenai permukaan bumi secara langsung, tidak langsung, maupun keduanya disebut dengan cahaya alami (*daylight*). Cahaya alami dibagi menjadi tiga jenis berdasarkan sumber cahaya yaitu cahaya matahari (*sunlight*), cahaya langit (*skylight*) dan cahaya refleksi (*reflection light*) dari cahaya alami dan langit.

2.1.1 Tujuan dan Manfaat Penerangan Alami

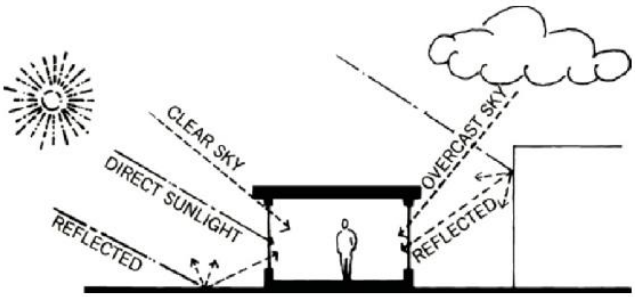
Pemanfaatan penerangan alami pada kehidupan sehari-hari dilakukan untuk memenuhi tujuan-tujuan tertentu bagi kehidupan manusia. Menurut Lechner (2009), penerangan alami memiliki tujuan yang dibedakan secara kuantitatif dan kualitatif. Penjelasan dari masing-masing aspek tersebut adalah sebagai berikut.

a) Kuantitatif: tujuan penerangan alami secara kuantitatif adalah untuk mengumpulkan penerangan yang cukup untuk mendukung performa visual dan meminimalisir penggunaan penerangan artifikal sesuai dengan kebutuhan tertentu. Adapun tujuan kuantitatif dapat ditinjau melalui nilai iluminan dan nilai *daylight factor* berdasarkan standar yang ada.
b) Kualitatif: tujuan penerangan alami secara kualitatif adalah untuk memasukkan penerangan ke dalam ruang secara menyeluruh, meminimalkan kesilauan (*glare*), meminimalkan refleksi terselubung dan menghindari rasio kecerlangan yang berlebihan.

Penerangan alami pada bangunan residensial memiliki banyak manfaat diantaranya yaitu untuk visualisasi mata, kenyamanan psikologis, meningkatkan kesehatan, serta meningkatkan produktivitas pengguna (Al Dakheel, 2017). Penerangan alami juga terbukti dapat membantu menyembuhkan penyakit medis (Hraska, 2015), dan mengurangi kesedihan secara psikologis terkait dengan *Seasonal Affective Disorder* (Sapia, 2013). Diketahui bahwa penerangan buatan (*lighting*) dapat mengkonsumsi hingga 40% dari konsumsi energi bangunan per tahun (Krarti, 2005). Sehubungan dengan hal itu, penerangan alami dapat menurunkan total konsumsi energi bangunan yaitu seperti energi *lighting*, energi pemanas dan energi pendingin secara signifikan (Lechner, 2015). Namun, manfaat dari penerangan alami tersebut hanya dapat direalisasikan jika kebutuhan visual dan kriteria kenyamanan telah dipertimbangkan dengan matang pada desain bangunan (Andersen, 2013). Oleh sebab itu, maka diperlukan strategi penerangan alami yang dirancang dengan memperhatikan kebutuhan dari konteks bangunan dan iklim.

2.1.2 Sumber Penerangan Alami

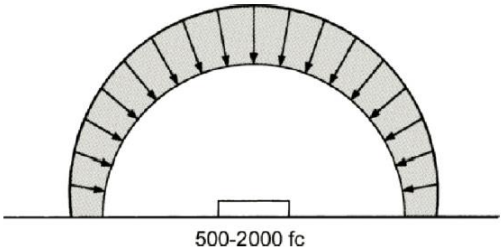
Sumber utama penerangan alami berasal dari cahaya matahari. Cahaya matahari dapat diterima oleh permukaan bumi melalui dua cara, yaitu secara *direct*/langsung (*sunlight*) dan secara difusi (*skylight*) melalui redistribusi kembali oleh atmosfir. Menurut Al-Obaidi (2015), *direct sunlight* memiliki cahaya yang sangat intens dan menghasilkan bayangan, sedangkan *skylight* memiliki cahaya terdifusi yang tersebar di berbagai arah, serta tidak menghasilkan bayangan. Menurut Lechner (2015), sumber penerangan alami dapat berasal dari cahaya matahari langsung, langit, awan dan refleksi cahaya (Gambar 2.1). Jenis-jenis sumber penerangan alami tersebut akan dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2.1 Sumber Penerangan alami (Lechner, 2015)

a. Langit berawan tebal (*overcast sky*)

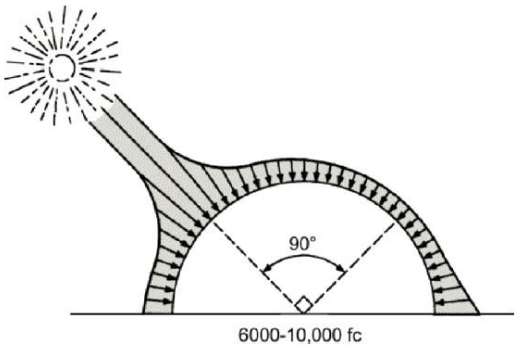
   Langit berawan tebal dapat mengurangi lebih dari 90% cahaya matahari dan intensitas iluminan bervariasi dengan kepadatan awan dan *altitude* matahari (Lam, 1986). Kondisi langit ini memiliki hingga 95% kubah langit yang ditutupi oleh awan. Tingkat iluminan cahaya pada langit ini relatif rendah yaitu 5,000-20,000 lux (Lechner, 2015). Distribusi cahaya tiga kali lebih besar pada bagian puncak/zenith dibandingkan pada horizon (Gambar 2.2). Pada kondisi langit ini warna cahaya tidak memiliki perbedaan signifikan.



Gambar 2.2 Distribusi cahaya di langit berawan tebal (Lechner, 2015)

b. Langit cerah (*clear sky*)

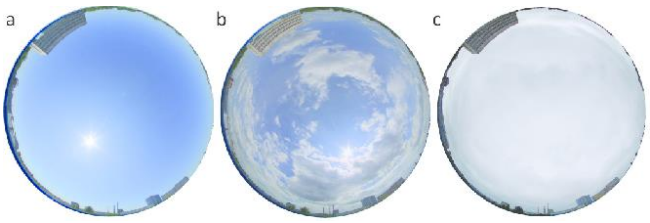
Pada kondisi langit cerah, sebagian besar dari iluminan cahaya bersumber langsung dari matahari dan intensitas iluminan bervariasi yang dipengaruhi oleh *altitude* matahari (Lam, 1986). Tingkat iluminan pada langit cerah relatif tinggi yaitu berkisar sebesar 60,000-100,000 lux (Lechner, 2015). Bagian tercerah dari langit yang merupakan arah haluan matahari adalah sepuluh kali lebih besar dibandingkan bagian tergelap dari langit yang berada sekitar 90º dari matahari (Gambar 2.3). Pada kondisi langit ini warna cahaya lebih lembut pada siang hari dan lebih hangat pada sore hari.



Gambar 2.3 Distribusi cahaya di langit cerah (Lechner, 2015)

c. Langit setengah berawan (*partly cloudy sky)*

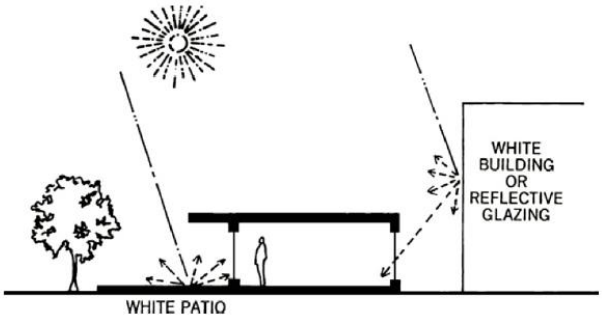
Menurut Givoni (1998), kondisi langit pada daerah tropis lembab umumnya merupakan kondisi langit setengah berawan. Kondisi langit ini memiliki 30% hingga 80% kubah langit yang ditutupi oleh awan. Kuat penerangan cahaya bervariasi dari satu area ke area lain dan mengalami perubahan yang cepat. Pada kondisi langit ini, cahaya matahari langsung memerlukan beberapa waktu untuk mencapai bangunan dikarenakan kondisi langit yang berawan. Perbandingan antara tiga jenis kondisi langit ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 (dari kiri) Langit cerah, langit *partly cloudy* dan langit overcast (Illumination CIE)

d. Refleksi cahaya

Cahaya yang direfleksikan dari permukaan dan struktur di sekitar bangunan merupakan sumber penerangan alami yang signifikan. Tingkat reflektivitas dari material permukaan adalah faktor penting yang mempengaruhi tingkat cahaya yang direfleksikan. Bangunan yang memiliki cat putih dan menerapkan kaca reflektif dapat merefleksikan hingga 70% persen dari cahaya insiden, sedangkan rumput hijau yang subur hanya dapat merefleksikan sekitar 10%. Material berwarna putih dapat menghasilkan refleksi cahaya seperti yang ditunjukkan di Gambar 2.5.



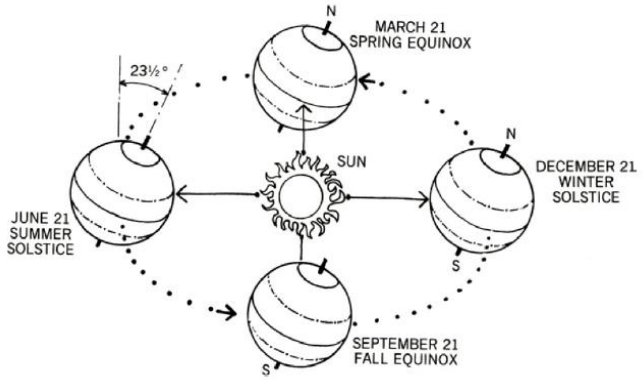
Gambar 2.5 Refleksi cahaya matahari (Lechner, 2015)

Terdapat dua jenis komponen penerangan alami pada langit cerah, yaitu cahaya langit (*skylight*) dan cahaya matahari langsung (*direct sunlight*). Cahaya yang berasal dari langit berupa difusi dan memiliki tingkat kecerahan yang rendah. Sedangkan cahaya dari matahari langsung memiliki arah yang tajam dan tingkat kecerahan tinggi yang dapat berpotensi menghasilkan efek kesilauan dan panas yang berlebih. Cahaya matahari langsung yang diterima pada permukaan bumi memiliki kuantitas berbeda yang dipengaruhi oleh sudut dan pergerakan matahari. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa kondisi langit pada tiap iklim dapat mempengaruhi distribusi dan intensitas penerangan alami yang dapat dihasilkan.

2.1.3 Pola Pergerakan Matahari

Intensitas dan distribusi cahaya matahari yang diterima pada permukaan bumi sangat dipengaruhi oleh pola pergerakan matahari. Menurut Lechner (2015), jarak dari bumi dan matahari terus bervariasi selama bumi terus berputar mengelilingi matahari. Perbedaan jarak tersebut menyebabkan pola pergerakan

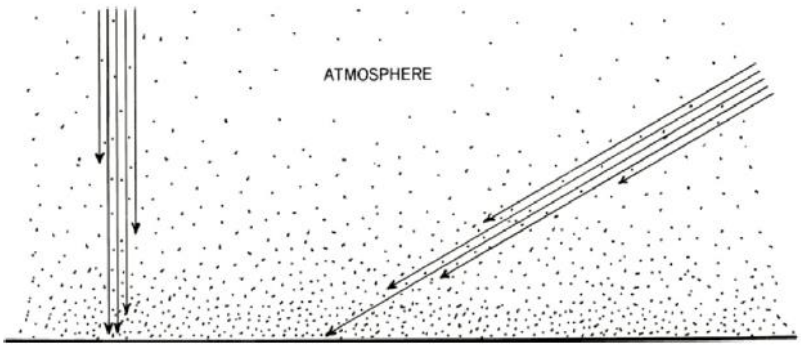
matahari yang memiliki variasi tahunan kecil pada intensitas radiasi matahari (Gambar 2.6). Kemiringan sumbu bumi yang konstan membuat belahan bumi utara (*northern hemisphere*) menghadap matahari di bulan Juni dan belahan bumi selatan (*southern hemisphere*) menghadap matahari di bulan Desember. Kondisi ekstrim terjadi pada 21 Juni dimana kutub utara menunjuk ke arah matahari, dan 21 Desember dimana kutub utara menjauh dari arah matahari. Sedangkan pada 21 Maret dan 21 September yang disebut *equinox* yang bertepatan dengan musim semi dan gugur, matahari menghadap langsung ke garis tengah bumi (*equator*).



Gambar 2.6 Pola pergerakan matahari pada variasi tahunan (Lechner, 2015)

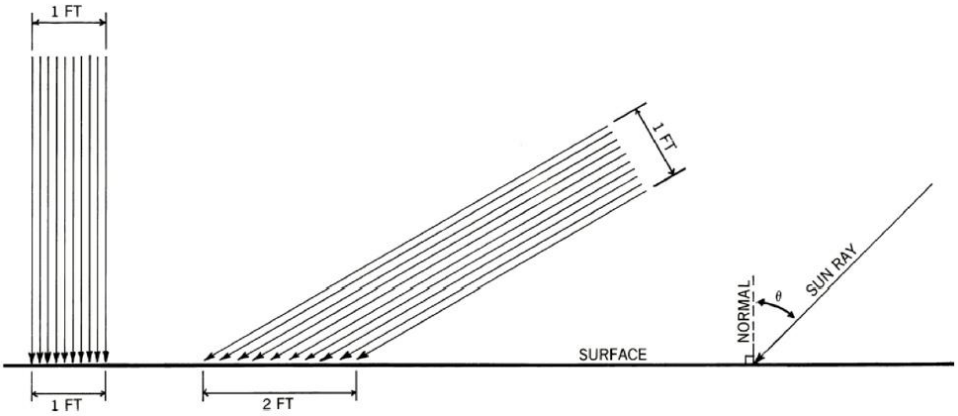
Jumlah dan komposisi radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi dapat bervariasi yang dipengaruhi oleh sudut matahari, elevasi, dan komposisi atmosfir (Lechner, 2015). Sudut vertikal dimana pancaran matahari mengenai bumi disebut dengan sudut *altitude* dan merupakan fungsi dari *latitude*, waktu dalam tahun, dan waktu dalam hari. Sudut *altitude* memiliki konsekuensi penting pada adanya iklim dan musim. Telah diketahui bahwa pada saat *equinox*, sudut *altitude* matahari hampit tegak lurus dengan bumi yaitu sebesar 90° minus sudut *latitude*. Adapun sudut *altitude* dapat berpengaruh pada efek cahaya yang dihasilkan ke permukaan, yang dijelaskan sebagai berikut:

a. Efek pertama dari sudut *altitude* yaitu adalah pada sudut *altitude* yang rendah, maka sinar matahari menjadi lebih mudah melewati atmosfir. Namun, radiasi matahari yang sampai di permukaan menjadi lebih lemah dan mengalami perubahan komposisi (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Sudut *Altitude* dan Radiasi matahari yang diserap permukaan (Lechner, 2015)

b. Efek kedua disebut dengan hukum *cosine*, yaitu bahwa sinar matahari akan menerangi area yang lebar jika matahari mencapai posisi rendah dari langit, dan menyebabkan jumlah cahaya pada tiap unit persegi permukaan tersebut menjadi semakin sedikit. Jumlah cahaya yang diterima di permukaan berubah sesuai dengan sudut *cosine*, yaitu sudut antara sinar matahari (*sun rays*) dan garis tegak lurus dari permukaan (*normal*) (Gambar 2.8).



Gambar 2.8 Hukum *Cosine* (Sudut *Cosine* θ dan Cahaya) (Lechner, 2015)

2.1.4 Strategi Penerangan Alami

Penerangan alami pada bangunan merupakan sesuatu yang dihasilkan dari proses desain yang terintegrasi dimana interaksi dari keputusan-keputusan desain dapat mempengaruhi performa penerangan alami yang dihasilkan. Menurut Lechner (2015), terdapat strategi-strategi basis yang perlu diperhatikan dalam mendesain penerangan alami pada bangunan, yaitu sebagai berikut:

1. Orientasi bangunan

   Orientasi menghadap selatan memperoleh cahaya matahari yang konsisten tiap hari dan tahun sehingga termasuk orientasi yang baik untuk penerangan alami. Orientasi utara memiliki kuantitas cahaya yang rendah namun memiliki kualitas cukup baik jika memperoleh cahaya putih dingin. Sedangkan orientasi barat dan timur hanya memperoleh cahaya selama setengah hari, namun cahaya matahari yang didapat adalah maksimum pada musim panas.

2. Bentuk bangunan

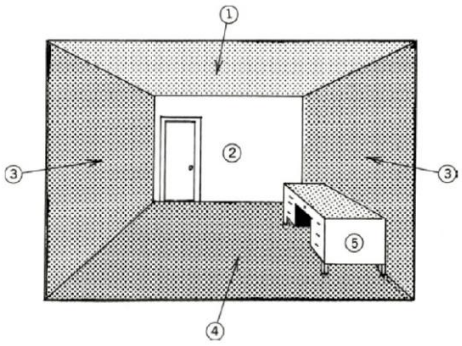
   Bentuk bangunan mempengaruhi jumlah jendela yang perlu dipasang pada tiap orientasi serta jumlah area lantai yang dapat memperoleh akses penerangan.

3. Perencanaan ruang

   Perencanaan ruang mempengaruhi akses cahaya ke dalam ruang. *Open space plan* memiliki kelebihan dalam membawa cahaya masuk ke ruang interior. Perencanaan fungsi bangunan juga dapat mempengaruhi dimensi, ketinggian, dan subdivisi atau alokasi pembagian ruang di dalamnya (Phillips, 2004).

4. Warna dan reflektivitas permukaan

   Penerapan warna yang cerah pada permukaan indoor maupun outdoor dapat membantu merefleksikan cahaya ke dalam bangunan. Urutan kepentingan untuk reflektivitas permukaan dalam ruang yaitu adalah plafon, dinding belakang, dinding samping, lantai dan furniture kecil (Gambar 2.9).



Gambar 2.9 Urutan reflektivitas permukaan pada ruang (Lechner, 2015)

5. Pemandangan (*view*) dan penerangan alami

   Perlu adanya pemisahan antara bukaan untuk pemandangan dan pemasukan cahaya alami, yaitu jendela atas untuk penerangan alami dan jendela bagian bawah untuk akses pemandangan yang setinggi dengan level mata pengguna.

2.2 Konteks Penerangan Alami di Iklim Tropis

Iklim Tropis dapat diartikan sebagai suatu daerah yang terletak di antara garis *equator* di bumi bagian utara dan selatan, atau daerah yang terdapat di 23,5° lintang utara dan 23,5° lintang selatan. Secara klasik iklim tropis dibagi menjadi dua jenis, yaitu tropis lembab dan tropis kering. Indonesia termasuk dalam negara tropis lembab karena hanya memiliki dua musim, yaitu musim hujan dan musim kemarau. Koenigsberger (2013) mengemukakan bahwa konteks lingkungan pada iklim tropis adalah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

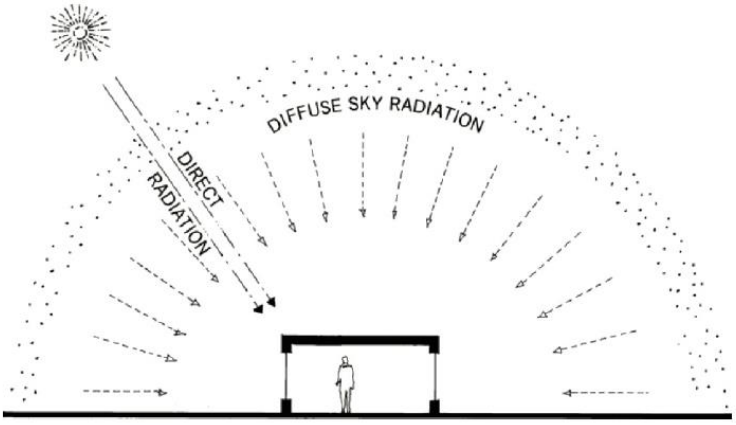
Tabel 2.1 Konteks Penerangan Alami di Iklim Tropis

Parameter Lingkungan	Kondisi
Suhu udara	DBT, maksimum siang = 27 - 32º C; dan minimum malam = 21 - 27º C
	Bulan terdingin; April - Juli
	Bulan terhangat; Oktober - Februari
Kondisi Langit	Cukup berawan (*partly cloudy*), *cloud cover* 60 - 90%; *Luminance* = 7000 cd / m^2
Radiasi Matahari	Tinggi, 5.500 - 7.500 wh/m^2

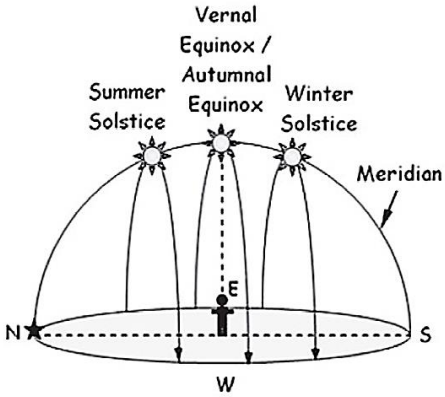
Sumber: Koenigsberger (2013)

Radiasi matahari di iklim tropis cukup tinggi yaitu memiliki nilai antara 5000-7500 wh/m^2 (Koenigsberger, 1973), dengan intensitas cahaya yang dapat mencapai 130,000 lux (Lim, 2012). Sebagian dari radiasi matahari direfleksikan dan sebagian lainnya disebarkan oleh lapisan awan dan konten uap air atmosfir. Hal ini menyebabkan radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi menjadi terdifusi (Gambar 2.10), namun tetap kuat dan dapat menyebabkan kesilauan. Area yang panas dengan banyak debu atau polusi semakin meningkatkan jumlah radiasi yang terdifusi (Lechner, 2015). Kondisi langit pada area tropis adalah cukup berawan di sepanjang tahun, dengan tutupan awan (*cloud cover*) bervariasi antara 60-90%. Pada kondisi langit cerah, tingkat *luminance* dapat mencapai 7000 cd/m^2, dan pada langit mendung hanya sekitar 850 cd/m^2 atau lebih rendah.

Telah diketahui bahwa Indonesia terletak tepat pada garis *equator*, hal ini membuat sudut *altitude* matahari hampir tegak lurus di atas permukaan tanah pada siang hari waktu *equinox* (puncaknya pada 21 Maret dan 21 September). Gambar 2.11 menunjukkan posisi matahari pada waktu *equinox*. Hal ini menyebabkan durasi siang hari di iklim tropis hampir sama sepanjang tahun yaitu sekitar 12 jam.



Gambar 2.10 Radiasi terdifusi pada iklim tropis lembab (Lechner, 2015)



Gambar 2.11 Pola pergerakan matahari pada iklim tropis (garis *equator*)
Sumber : https://www.mydarksky.org/

2.2.1 Parameter dalam Pengukuran Performa Penerangan Alami

Performa penerangan alami memiliki nilai yang bervariasi dan dipengaruhi oleh waktu, cuaca dan musim dalam setiap tahun. Dalam hal ini, maka perhitungan performa penerangan alami dilakukan pada basis yang relatif, dan tidak menggunakan nilai yang absolut (Phillips, 2004). Terdapat berbagai macam parameter yang dapat digunakan dalam pengukuran penerangan, diantaranya yaitu *Daylight Factor* (DF). DF adalah rasio dari iluminan di dalam bangunan dengan iluminan di luar bangunan. Iluminan (E) merupakan konsentrasi dari insiden flux cahaya yang mencapai permukaan yang disinari (Moore, 1991). Adapun perhitungan DF dijelaskan pada rumus berikut:

$$Daylight\ Factor = \frac{Indoor\ illuminance}{Outdoor\ illuminance} \times 100\% \qquad (2.2.1)$$

Sumber: Baker (2002)

Dalam menghitung nilai DF maka pada bangunan eksisting dilakukan pengukuran iluminan interior pada poin tertentu, kemudian iluminan eksterior dibawah langit yang terdifusi. Pada kondisi langit *overcast*, DF memiliki persentase yang cenderung konstan dikarenakan distribusi *luminance* relatif pada langit mendung adalah konstan dan tidak mudah berubah seiring waktu. Sedangkan pada kondisi langit cerah, DF memiliki nilai yang berbeda-beda karena adanya perubahan distribusi *luminance* langit dengan posisi matahari. Nilai rata-rata DF adalah sebesar 1% yang menandakan bahwa penerangan sudah cukup baik, sedangkan DF sebesar 5% dikategorikan sebagai cahaya terang benderang.

Terdapat berbagai macam standarisasi nilai DF yang telah dirilis oleh berbagai autoritas, diantaranya seperti rilisan dari CIBSE, BREEAM, dan LEED. Namun, sebagian besar standar DF tersebut disusun berdasarkan konteks lingkungan negara beriklim dingin dan tidak dapat diaplikasikan untuk negara beriklim tropis yang memiliki tingkat intensitas cahaya relatif lebih tinggi. Adapun standar DF yang telah disusun berdasarkan konteks iklim tropis diantaranya yaitu standar DF dari Malaysia (MS 1525:2007). GBCI (*Green Building Council of Indonesia*) juga menyatakan bahwa minimum sebanyak 30% dari total area harus dapat memenuhi standar penerangan alami yang telah ditentukan. Pada penelitian ini, standar DF yang digunakan adalah standar yang telah disesuaikan untuk iklim tropis, yang memiliki rentang dan keterangan seperti pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Standar *daylight factor* untuk negara beriklim tropis

Rentang DF	**Keterangan**
< 2%	Penerangan tidak cukup terang, cenderung gelap
2 – 5%	Penerangan memadai/cukup terang
> 5%	Penerangan terlalu terang, cenderung silau
Catatan: Minimum sebesar 30% dari total area dalam ruang harus dapat memenuhi standar DF yang telah ditentukan.	

Sumber: Standar Malaysia MS-1525 (2007) dan GBCI (2012)

2.2.2 Permasalahan Penerangan Alami di Iklim Tropis

Indonesia yang merupakan bagian dari negara beriklim tropis memiliki kondisi langit bersifat dinamis dimana komposisi awan dapat berubah sewaktu-waktu dan menghalangi cahaya matahari langsung yang menyebabkan pola irregular (Tang dan Chin, 2013; Ahmed, 2002). Situasi ini menyebabkan ketidakstabilan level iluminan dari cahaya alami pada lingkungan indoor (Al-Obaidi, 2015). Seperti yang telah disebutkan bahwa tingkat radiasi matahari di tropis cukup tinggi yaitu sebesar 5000-7500 wh/m^2, dan jumlah cahaya matahari yang berlebihan dapat menyebabkan ketidaknyamanan visual dan permasalahan kesilauan (Munaaim, 2016). Kondisi-kondisi di iklim tropis tersebut dapat menyebabkan kurang meratanya distribusi cahaya pada ruang dan juga terjadinya efek silau dari intensitas cahaya yang terlalu tinggi pada poin tertentu.

Menurut Lechner (2015), ketika cahaya matahari dimasukkan ke dalam bangunan dengan cara yang sangat terkontrol, maka dapat diperoleh penerangan alami dengan kualitas tinggi yang juga dapat mengurangi panas yang diperoleh. Dengan ini maka diperlukan sistem kontrol cahaya matahari dengan melalui penerapan sistem *shading*. Lim (2013) menyatakan bahwa sistem *shading* yang dirancang dengan sesuai pada fasad bangunan tropis dapat meningkatkan kondisi penerangan alami, dan dapat mengurangi kebutuhan energi penerangan buatan. Dengan demikian, pada negara beriklim tropis diperlukan sistem pembayangan / *shading* pada bukaan jendela sebagai sistem kontrol cahaya untuk dapat menghasilkan penerangan alami yang baik dan berkualitas.

2.3 Rumah susun

Menurut UU No. 20 tahun 2011, rumah susun adalah bangunan gedung bertingkat yang dibangun dalam suatu lingkungan yang terbagi dalam bagian-bagian yang distrukturkan secara fungsional, baik dalam arah horizontal maupun vertikal. Rumah susun adalah bagian dari RPJMD Kota Surabaya tahun 2016-2021 dalam rangka memenuhi kebutuhan rumah tinggal bagi masyarakat. Pengadaan perumahan dengan peran serta masyarakat berpenghasilan rendah dapat memiliki kendala pada pembiayaan, ketersediaan lahan dan prasarana bangunan (Suryani,

2017). Rumah susun di Indonesia memiliki tinggi maksimum 4-6 lantai, dan sebagian besar menggunakan tangga sebagai alat penghubung lantai.

Berdasarkan Undang-undang No. 16 tahun 1985 tentang rumah susun, tujuan dari pembangunan rumah susun adalah sebagai berikut:

a. Memenuhi kebutuhan perumahan yang layak bagi rakyat, terutama bagi golongan masyarakat yang berpenghasilan menengah kebawah, yang menjamin kepastian hukum dalam pemanfaatannya.
b. Meningkatkan daya guna dan hasil guna tanah di daerah perkotaan dengan memperhatikan kelestarian sumber daya alam dan menciptakan lingkungan permukiman yang lengkap, serasi dan seimbang.

2.3.1 Tipologi Bangunan dan Unit Rumah susun

Menurut De Chiara (1995), tipologi bangunan rumah susun dibedakan berdasarkan penyusunan lantai, pencapaian secara vertikal dan akses sirkulasi horizontal. Ketiga jenis tipologi ini akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Penyusunan Lantai
   a. *Simplex* : tipe ini memiliki bentuk paling sederhana dan ekonomis dimana satu unit hunian dilayani oleh satu lantai yang terdiri dari beberapa unit hunian (Gambar 2.12).
   b. *Duplex* : Pada tipe ini kebutuhan satu hunian dilayani dalam dua lantai dan dalam setiap hunian terdapat tangga untuk menghubungkan lantai satu dan lantai dua hunian. Dalam setiap area privat terpisah dengan area publik.
   c. *Triplex* : Pada tipe ini kebutuhan satu hunian tersedia dalam tiga lantai dan kegiatan dalam setiap unit dapat dilanjutkan dalam area yang terpisah.

Gambar 2.12 *Simplex*, *Duplex*, dan *Triplex* (De Chiara, Joseph, 1995)

2. Pencapaian secara Vertikal

Rumah susun dibedakan menjadi dua tipe berdasarkan pencapaian secara vertikal yaitu sebagai berikut:

a. *Walk-up*, yaitu pencapaian vertikal dengan menggunakan tangga.

b. *Elevated*, yaitu pencapaian vertikal dengan menggunakan lift, umumnya digunakan untuk rumah susun dengan ketinggian lebih dari empat lantai.

3. Akses Sirkulasi Horizontal

Rumah susun dibedakan menjadi enam tipe berdasarkan akses sirkulasi horizontal dan letak koridor, yaitu sebagai berikut:

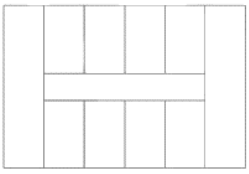
1) Koridor eksterior (*single-loaded*)

Tipe ini memiliki koridor yang terletak di bagian luar unit dengan sistem distribusi unit yang berjajar pada satu sisi (Gambar 2.13). Tipe ini memiliki kelebihan pada mudahnya akses penghawaan dan penerangan, dan kekurangan pada pemakaian lahan yang banyak.

Gambar 2.13 Koridor *single-loaded* (De Chiara, Joseph, 1995)

2) Koridor interior / sentral (*double-loaded*)

Tipe ini memiliki sistem distribusi unit rumah susun yang berhadapan satu sama lain, sehingga membentuk koridor pada bagian tengah di antara unit-unit tersebut (Gambar 2.14). Tipe ini memiliki kelebihan pada pemakaian lahan yang lebih efisien dan kekurangan pada sirkulasi yang boros, dan akses penghawaan dan penerangan yang kurang baik.

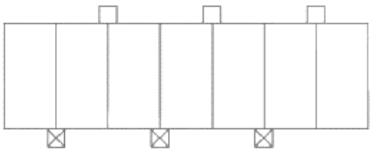


Gambar 2.14 Koridor *double-loaded* (De Chiara, Joseph, 1995)

3) Akses eksterior multiple

Pada tipe ini terdapat banyak akses sirkulasi yang terletak di bagian luar bangunan (Gambar 2.15). Tipe ini memiliki kelebihan pada privasi

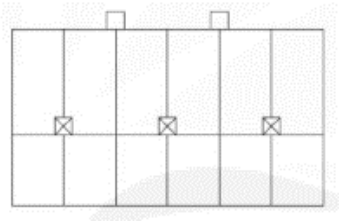
penghuni yang lebih terjaga dan penerangan lebih baik, namun jarak antar tetangga menjadi lebih jauh.



Gambar 2.15 Akses eksterior multiple (De Chiara, Joseph, 1995)

4) Akses interior multiple

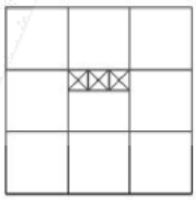
Tipe ini memiliki banyak akses tangga yang terletak di dalam bangunan (Gambar 2.16). Kelebihan tipe ini adalah privasi penghuni yang lebih baik, dan kekurangan adalah penerangan dan penghawaan tidak alami.



Gambar 2.16 Akses interior multiple (De Chiara, Joseph, 1995)

5) Tower

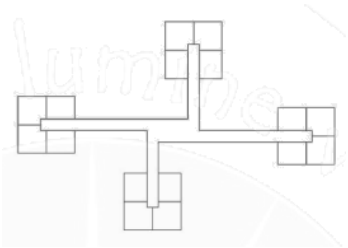
Pada tipe ini akses sirkulasi terletak pada bagian tower bangunan (Gambar 2.17). Tipe ini memiliki kelebihan pada pemasukan penerangan pada tiap unit lebih baik, namun sirkulasi penghawaan pada bagian tengah kurang baik.



Gambar 2.17 Tower (De Chiara, Joseph, 1995)

6) Multi tower

Pada tipe ini terdapat pemisahan tower bangunan dan banyak akses sirkulasi (Gambar 2.18). Kelebihan tipe ini adalah pada privasi penghuni yang lebih baik, semua unit dan jalur sirkulasi mendapatkan penerangan yang maksimal. Namun terdapat kekurangan pada biaya struktur yang mahal dan pemanfaatan lahan menjadi boros.



Gambar 2.18 Multi Tower (De Chiara, Joseph, 1995)

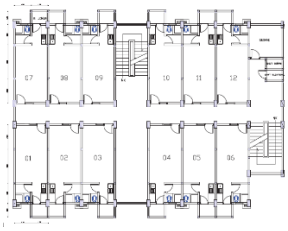
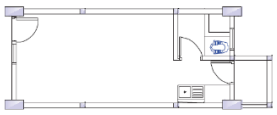
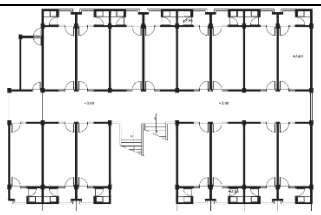
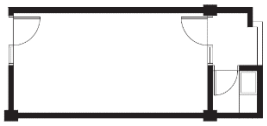
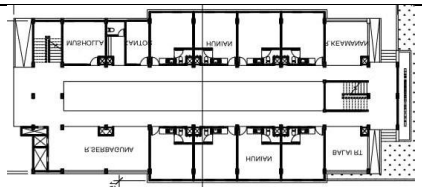
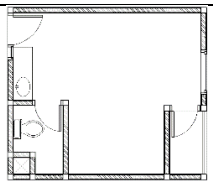
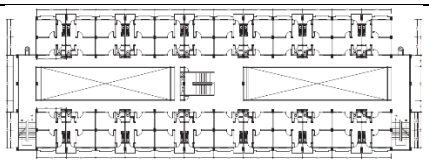
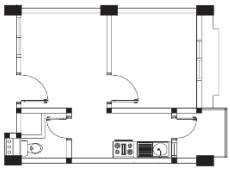
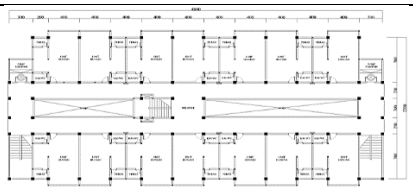
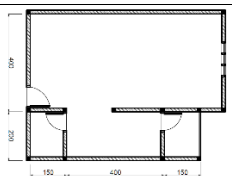
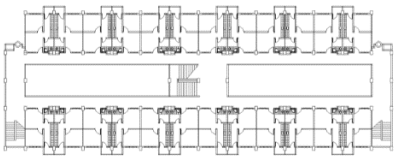
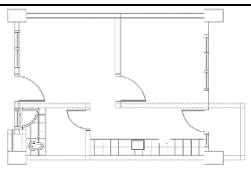
Tipologi unit rumah susun harus dapat memenuhi persyaratan pembangunan yang telah ditentukan oleh kebijakan setempat. Berdasarkan Departemen Pekerjaan Umum (DPU) tahun 1991 tentang Tata Cara Perencanaan Rumah Susun Modular, maka besaran unit rumah susun dibedakan sebagai berikut:

1. Satu unit dihuni paling maksimal untuk 5 orang, dengan standar luas tiap 1 orang adalah sebesar 7 m^2.
2. Unit rumah susun dibagi menjadi tiga tipe, yaitu:
    a) Tipe kecil : asumsi menampung 3 orang = 3 x 7 = 21 m^2
    b) Tipe sedang : asumsi menampung 5 orang = 5 x 7 = 35 m^2
    c) Tipe besar : asumsi menampung 7 orang = 7 x 7 = 49 m^2
3. Rumah susun harus memiliki ruang-ruang fungsi utama yang mewadahi kegiatan pribadi, kegiatan keluarga dan kegiatan pelayanan. Satuan unit rumah susun sekurang-kurangnya harus dilengkapi dengan dapur, kamar mandi dan kakus (WC).

2.3.2 Rumah susun di Kota Surabaya

Pertambahan jumlah penduduk membuat pembangunan rumah susun semakin meningkat di kota-kota besar, diantaranya di kota Surabaya. Rumah susun adalah bagian dari RPJMD (Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah) di kota Surabaya untuk tahun 2016-2021 dalam rangka memenuhi kebutuhan rumah tinggal bagi masyarakat. Pembangunan rumah susun di Surabaya rutin dilakukan setiap tahun. Data dari Detik News menunjukkan sebanyak 7 gedung di tahun 2017, 2 gedung di tahun 2018, dan 3 gedung di tahun 2019 telah dibangun dengan menggunakan dana Anggaran Pendapatan Belanja Daerah (APBD) Surabaya. Contoh beberapa rumah susun di Surabaya ditunjukkan pada Tabel 2.3 berikut.

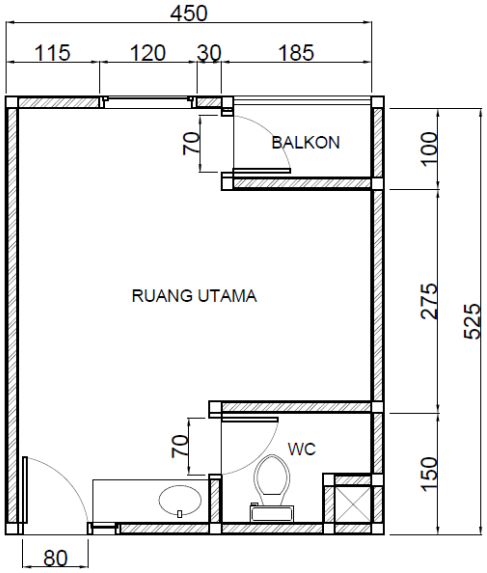
Tabel 2.3 Contoh Rumah susun di Surabaya

Rumah susun	Denah bangunan	Denah unit
Rusunawa Randu *Double-loaded* 72 unit/blok		
Rusunawa Wonorejo *Double-loaded* 48 unit/blok		
Rusunawa Siwalankerto 2 *Double-loaded*		
Rusunawa Penjaringan Sari 3 *Twin blocks*		
Rusunawa Griya Asri Sier *Twin blocks*		
Rusunawa Grudo *Twin blocks*		

Sumber: Kisnarini (2015)

Sebagian besar rumah susun di Surabaya memiliki tipe *Simplex* dengan koridor interior (*double-loaded*), dan *twin blocks* yang dilengkapi dengan *courtyard* pada bagian internal bangunan. Sebagian besar unit rumah susun dengan tipe unit yang besar memiliki bukaan terpisah antara jendela dan balkon. Sedangkan untuk unit rumah susun dengan tipe kecil hanya memiliki satu bukaan yaitu balkon. Jenis jendela yang umumnya digunakan pada rumah susun adalah jendela *casement* yang

disertai lubang angin. Pada penelitian ini, Rusunawa Siwalankerto 2 dipilih sebagai obyek penelitian karena dapat merepresentasikan tipologi rumah susun di Surabaya. Rusunawa Siwalankerto memiliki tipe *Simplex* dengan koridor interior, serta bukaan yang terpisah antara jendela dan balkon (Gambar 2.19).



Gambar 2.19 Unit rumah susun Siwalankerto 2 di Surabaya (Penulis, 2020)

2.3.3 Standar Penerangan di Rumah susun

Berdasarkan Undang-undang No. 4 tahun 1988 tentang rumah susun, semua ruang harus mempunyai hubungan dengan udara luar dan penerangan alami secara langsung maupun tidak langsung dalam jumlah yang cukup. Pada Undang-undang No. 20 tahun 2011 tentang rumah susun, sistem penerangan merupakan salah satu persyaratan kesehatan pada bangunan rumah susun. Menurut Standar Nasional Indonesia (2001) tentang tata cara perancangan sistem penerangan alami pada bangunan, penerangan alami pada siang hari dapat dikatakan baik apabila:

1) Pada siang hari antara jam 08.00 sampai dengan jam 16.00 waktu setempat terdapat cukup banyak cahaya yang masuk ke dalam ruangan, dan
2) Distribusi cahaya di dalam ruangan cukup merata dan atau tidak menimbulkan kontras yang mengganggu.

Penerangan alami di rumah susun harus dapat memenuhi persyaratan yang telah berlaku untuk dapat menghasilkan penerangan alami yang baik. Adapun persyaratan teknis penerangan pada bangunan adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan Kualitas Penerangan

   Kualitas penerangan yang harus dan layak disediakan, ditentukan oleh:

   a) Penggunaan ruangan, khususnya ditinjau dari segi beratnya penglihatan oleh mata terhadap aktivitas yang harus dilakukan dalarn ruangan itu.
   b) Lamanya waktu aktivitas yang memerlukan daya penglihatan yang tinggi dan sifat aktivitas, sifat aktivitas dapat memerlukan perhatian yang tepat atau dapat pula secara periodik dimana mata dapat beristirahat.

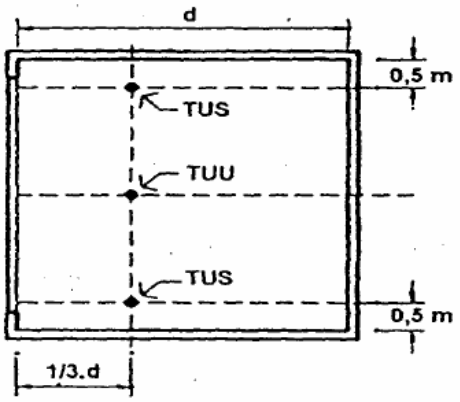
2. Berdasarkan Faktor Langit dalam Ruangan

   Berdasarkan SNI 03-2396-2001, faktor langit (fl) adalah angka perbandingan tingkat pencahayaan langsung dari langit di titik ukur tersebut dengan tingkat pencahayaan pada bidang datar di lapangan terbuka. Dengan demikian, faktor langit memiliki pengertian yang sama dengan *daylight factor*. Nilai fl harus memenuhi nilai-nilai faktor langit minimum (fl_{min}) untuk tiap jenis ruangan (Tabel 2.4). Titik ukur yang digunakan dalam menghitung fl adalah TUU (titik ukur utama) dan TUS (titik ukur samping). TUU dan TUS berada pada jarak 1/3 d dari jendela, dimana d adalah ukuran kedalaman ruang (Gambar 2.20).

   Tabel 2.4 Faktor Langit pada Bangunan Tempat Tinggal

Jenis Ruangan	**fl_{min} TUU**	**fl_{min} TUS**
Ruang tinggal	0,35.d	0,16.d
Ruang kedap	0,35.d	0,16.d
Kamar tidur	0,18.d	0,05.d
Dapur	0,20.d	0,20.d

   Sumber: Standar Nasional Indonesia (SNI 03-2396-2001)



Gambar 2.20 Posisi TUU dan TUS di dalam ruang (SNI 03-2396-2001)

3. Berdasarkan Letak Bukaan Cahaya

   Ruangan dengan penerangan langsung dari bukan cahaya di satu dinding nilai fl ditentukan sebagai berikut:

   a) Dari setiap ruangan yang menerima penerangan langsung dari langit melalui bukaan atau jendela di satu dinding saja, harus diteliti fl dari satu TUU dan dua TUS.
   b) Jarak antara dua titik ukur tidak boleh lebih besar dari 3 m. Misalnya untuk suatu ruangan yang panjangnya lebih dari 7 m, harus diperiksa (fl) lebih dari tiga titik ukur (jumlah TUU ditambah).

4. Berdasarkan Penerimaan Cahaya

   Penerimaan cahaya pada koridor dalam bangunan rumah tinggal harus dapat menerima cahaya melalui luas kaca sekurang-kurangnya 0,10 m^2 dengan ketentuan seperti berikut:

   a) Luas kaca dinding luar atau atap diperhitungkan sebesar 100%,
   b) Luas kaca dinding dalam, yang merupakan batas dengan kamar tidur, kamar tinggal dan sebagainya diperhitungkan sebesar 30%,
   c) Luas kaca ruangan lainnya, seperti gudang dan kamar mandi, diperhitungkan sebesar 0%.

5. Berdasarkan Standar Kuat Penerangan

   Kuat penerangan pada rumah susun harus dapat memenuhi fungsi ruang dan aktivitas pengguna di dalamnya. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (2001), kuat penerangan pada bangunan hunian ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Standar Kuat Penerangan pada Bangunan Tempat Tinggal

Fungsi Ruangan	**Tingkat Penerangan (lux)**	**Kelompok Renderasi Warna**
Teras	60	1 atau 2
Ruang Tamu	120 - 250	1 atau 2
Ruang Makan	120 - 250	1 atau 2
Ruang Kerja	120 - 250	1
Kamar Tidur	120 - 250	1 atau 2
Kamar Mandi	250	1 atau 2
Dapur	250	1 atau 2
Garasi	60	3 atau 4

Sumber: Standar Nasional Indonesia (SNI 03-6575-2001)

2.3.4 Permasalahan Penerangan Alami di Rumah susun

Dari beberapa penelitian tentang penerangan alami di rumah susun ditemukan bahwa tipikal fasad di rumah susun masih kurang mempertimbangkan pemanfaatan penerangan alami ke dalam bangunan. Mufidah (2016) menyatakan bahwa dibutuhkan pengolahan fasad secara vertikal maupun horizontal yang memiliki detail, dimensi dan teritisan yang berbeda-beda sesuai dengan kondisi di tiap unit. Avesta (2017) meneliti mengenai performa penerangan alami pada rumah susun di Surabaya, hasil analisis menunjukkan bahwa pada unit hunian rumah susun dibutuhkan sistem *shading* atau memperkecil luas bukaan cahaya karena penerangan alami yang masuk melebihi standar kenyamanan visual. Berdasarkan penelitian tentang rumah susun yang telah dijelaskan, dapat disimpulkan bahwa tipikal desain bukaan dan fasad di rumah susun masih belum dapat mengantisipasi permasalahan silau yang dapat mengganggu kenyamanan visual.

Menurut Latifah (2015), pemanfaatan penerangan alami pada siang hari dipengaruhi oleh orientasi bangunan, alokasi ruang, dan bukaan cahaya. Orientasi bangunan dapat mempengaruhi tingkat intensitas cahaya serta jenis tampilan pemandangan luar. Dengan demikian, jenis bukaan di rumah susun sangat mempengaruhi performa penerangan alami yang dihasilkan. Bukaan atau jendela rumah susun di Surabaya mayoritas menggunakan jendela *casement* atau jendela yang dibuka dengan mendorong bagian bawah dengan lapisan kaca bening. Tipe jendela tersebut dapat membantu menampilkan *view* luar dengan lebih leluasa, namun terdapat juga efek negatif yang dihasilkan seperti silau dan panas karena cahaya matahari dapat masuk secara langsung. Kondisi tersebut seringkali di antisipasi oleh pengguna dengan menutup bukaan sepenuhnya menggunakan internal *shading* seperti gorden atau tirai. Namun, hal ini menyebabkan kurang dimanfaatkannya penerangan alami di rumah susun dan semakin menambah ketergantungan pengguna dengan penggunaan penerangan buatan / lampu.

Sehubungan dengan itu, maka diperlukan strategi penerangan alami menggunakan sistem *shading* untuk membantu mengkontrol cahaya yang masuk supaya dapat memenuhi standar penerangan yang baik untuk kenyamanan visual pengguna. Berdasarkan konteks penerangan alami di iklim tropis disertai dengan permasalahan penerangan alami di rumah susun, maka diperlukan strategi sistem

shading yang memiliki fleksibilitas gerak yang dapat responsif pada kondisi langit dan pola pergerakan matahari. Dengan demikian, penelitian ini berfokus pada sistem *shading* dinamis sebagai strategi penerangan alami untuk rumah susun.

2.4 Sistem *Shading* Dinamis

Sistem *shading* atau bisa disebut *sunshading* dan *shading device* yaitu adalah alat pengontrol terhadap panas karena sinar matahari dan penghalau sinar matahari yang masuk ke bangunan, serta memberikan pembayangan yang dapat mengurangi panas (Frick, 1998). Sistem *shading* juga merupakan komponen bioklimatik dan strategi pada bangunan fasad yang penting terutama untuk daerah tropis (Al-Tamimi, 2011). Sistem *shading* dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan kemampuan geraknya, yaitu sistem *shading* statis / *fixed* dan dinamis / *movable*.

Sistem *shading* dinamis memiliki fleksibilitas dalam berubah bentuk dengan menyesuaikan pada kondisi lingkungan, baik secara manual maupun otomatis. Efisiensi sistem *shading* dinamis dipengaruhi oleh adaptabilitas pergerakan *shading* untuk menyesuaikan dengan sudut *altitude* matahari yang terus bergerak setiap waktu. Oleh sebab itu, sistem adaptif lebih diutamakan jika dibandingkan dengan sistem *fixed* karena memiliki kemampuan adaptabilitas pada perubahan radiasi matahari, dapat dikontrol pengguna, memberikan pembayangan yang optimal dan penerangan alami yang maksimal (Schnittich, 2006).

Sistem *shading* dinamis (*dynamic shading device)* adalah *shading* yang adaptif dan responsif pada kondisi lingkungan karena karakternya yang bisa digerakkan (O'Brien, 2013) dan dapat dikendalikan sesuai dengan preferensi pengguna (Nicol, 2002). Terdapat dua jenis sistem *shading* dinamis yang dibedakan berdasarkan sistem kontrol geraknya, yaitu sebagai berikut:

1. Sistem Manual, pergerakan *shading* dapat dikendalikan dan dimodifikasi langsung oleh pengguna (Kim, 2009). Sistem ini umumnya menggunakan desain *shading* yang konvensional.
2. Sistem Mekanik, pergerakan *shading* dengan otomatis yaitu berupa respon langsung pada kondisi lingkungan, sistem ini mengadopsi teknologi otomatis aktif, seperti *intelligent dynamic systems* (Loonen, 2013). Sistem ini menggunakan mode kontrol yang dibagi menjadi dua, yaitu:

a) Kontrol personal (*motorised*), pergerakan *shading* menggunakan motor elektrik yang dapat dioperasikan pengguna melalui tombol *switch* atau dengan *transmitter*/*wireless* (Maiman, 2014).
b) Kontrol otomatis (*automatic*), pergerakan *shading* menggunakan mode kontrol otomatis yang tergabung dengan teknologi *intelligent* (Giovannini, 2015).

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu ditemukan bahwa pengguna merasa lebih nyaman dengan kontrol personal (Karjalainen, 2009) karena memiliki kelebihan dalam mengkontrol kondisi lingkungan sesuai dengan preferensi yang diinginkan. Persentase rata-rata dari ketidakpuasan pengguna menurun dari 22% menjadi 13% ketika kontrol manual diterapkan pada sistem *shading* (Newsham, 1994). Sedangkan kontrol otomatis memiliki kelebihan karena adanya penyesuaian kontinu untuk hal-hal impraktis yang tidak memungkinkan untuk diselesaikan pengguna (Konstantoglou, 2016). Namun, sistem mekanik memiliki biaya yang lebih tinggi dibandingkan sistem manual, sehingga instalasi kontrol otomatis masih mendapatkan banyak kritikan (Al-Masrani, 2018). Dengan demikian, penelitian ini berfokus pada sistem *shading* dinamis dengan kontrol manual untuk menyesuaikan dengan konteks rumah susun.

2.4.1 Konseptual *Folding*

Folding berasal dari kata *fold*, yang berarti melipat atau lipatan. Istilah *folding* dalam arsitektur telah dikenal sejak awal abad ke-20 oleh Eisenman (1991), yang mengemukakan bahwa *folding* adalah suatu proses bagaimana suatu bentuk berubah dan aturan yang menjelaskan variasi kontinu mereka. *Folding* juga merupakan transformasi geometri dari suatu permukaan bidang (Lebee, 2015). Menurut Jackson (2011), pada prinsipnya teknik *folding* dibedakan menjadi dua yaitu *rigid folding* dan *curved folding*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.21.

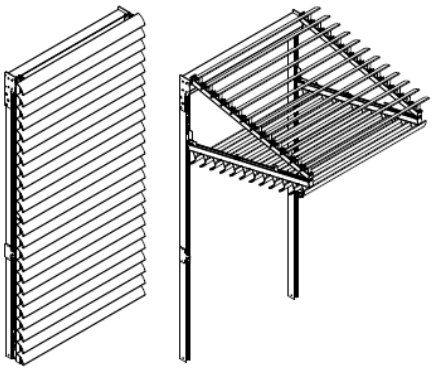
a) *Rigid folding* adalah saat deformasi bentuk terkonsentrasi di engsel dan ditandai dengan wajah setiap lipatan yang tetap rata (Lebee, 2015).
b) *Curved folding* adalah saat kedua garis lipatan dan wajah setiap lipatan mengalami kelengkungan (Shen, 2017).

Gambar 2.21 *Rigid folding* dan *Curved folding* (dari kiri) (Shen, 2017)

Moloney (2009) juga berpendapat bahwa terdapat bermacam-macam pola pergerakan pada suatu bidang. Diantaranya yaitu adalah *Fold state,* yang merupakan keadaan lipatan sederhana yang ditandai oleh pergerakan bidang yang berdekatan, dengan konfigurasi ulang konstan yang menghasilkan perkaitan (*interweaving)* dan perlebaran (*expansion).* Sehubungan dengan itu, maka pendekatan *folding* dapat diterapkan pada sistem *shading* dinamis untuk mendukung eksplorasi bentuk dengan cara dilipat. Fleksibilitas yang dimiliki *folding* dapat dimanfaatkan sebagai strategi penerangan alami untuk menghasilkan sistem *shading* dinamis yang adaptif dan responsif pada kondisi lingkungan.

2.4.2 *Folding Shutter*

Salah satu penerapan teknik lipat (*folding*) pada sistem *shading* dinamis adalah *folding shutter*. *Folding shutter* adalah *shutter* yang dikembangkan untuk memiliki fungsi yang dapat dilipat secara vertikal maupun horizontal (Gambar 2.22). *Shutter* adalah jenis penutup jendela yang terdiri dari kisi-kisi atau miniatur *louver* yang dapat membantu mengkontrol masuknya sinar matahari, melindungi bangunan dan juga memberikan privasi. *Shutter* yang diaplikasikan pada fasad eksterior bangunan dapat berperan sebagai pembayangan yang dapat menahan radiasi matahari hingga 95% (Thumann, 2008). *Shutter* dapat bekerja secara dinamis dalam kaitannya dengan paparan penerangan alami sepanjang tahun dengan mempertahankan pada batas nyaman tertentu (Seguro dan Palmer, 2016). *Folding shutter* dapat terlipat sebesar 90° pada fasad, menghemat pemakaian ruang (*space saving*), serta menyediakan proteksi dari matahari dan cuaca (Baier GmbH).



Gambar 2.22 Contoh ilustrasi *Folding shutter*
Sumber : http://www.rensonuk.net/brise-soleil-solar-*shading-shutter*-united-kingdom-cilium-folding-*shutter*-a-dynamic-sun-shade-united-kingdom.html

2.4.3 Mekanisme *Folding Shutter*

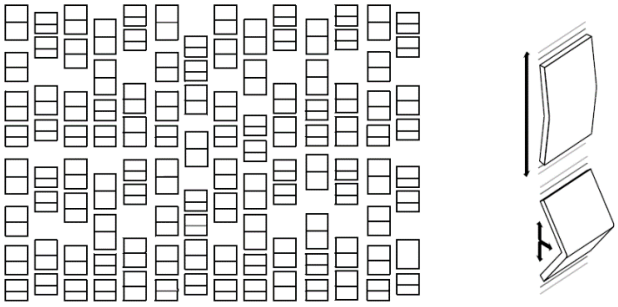
Teknik lipat (*folding*) dapat dijelaskan sebagai rangkaian dua bidang eksternal yang memiliki engsel di bagian tengah yang digerakkan dengan cara mendorong bagian bidang untuk bergeser pada sumbu vertikal atau horizontal jendela, sehingga membuat kedua bidang terlipat bersama (Kensek, 2011). *Folding shutter* dapat digerakkan dengan sistem manual dan sistem mekanik. Sistem manual umumnya menggunakan desain konvensional dengan teknik gerak seperti *bi-folding door*. Pada masa kini, *folding shutter* telah berkembang sehingga dapat dioperasikan dengan sistem mekanik menggunakan kontrol personal dan otomatis, contohnya seperti produk *folding shutter* yang dirilis oleh Baier dan RENSON.

Sistem *shading* dengan teknik lipat umumnya memiliki tipologi pergerakan seperti translasi, rotasi dan *scaling*, dimana tenaga dari luar dibutuhkan untuk dapat bergerak (Al Dakheel, 2017). Moloney (2011) membahas tentang fasad bangunan Kiefer Technic Showroom yang menerapkan teknik lipat (Gambar 2.23). Pergerakan kinetik fasad tersebut adalah translasi secara vertikal yang dihubungkan dengan sambungan berlipat yang menghasilkan efek *scaling* (Gambar 2.24). Pada penelitian ini, *folding shutter* yang diteliti mengkombinasikan antara gerak translasi dan *scaling*, dengan penjelasan sebagai berikut:

a) Gerak Translasi secara vertikal atau horizontal, yaitu gerak yang terjadi dari perpindahan satu bidang ke bidang lain hingga menghasilkan lipatan.

b) Efek *Scaling*, efek ini terjadi sebagai hasil dari gerak translasi. Bidang *folding shutter* (posisi terbuka) berubah bentuk menjadi bidang yang terlipat (posisi tertutup) dan terjadi adanya pengurangan dan perlebaran skala bidang.

Gambar 2.23 Teknik lipat pada fasad Kiefer Technic Showroom
Sumber : https://www.architonic.com/en/project/ernst-giselbrecht-partner-dynamic-facade-kiefer-technic-showroom/5100449/

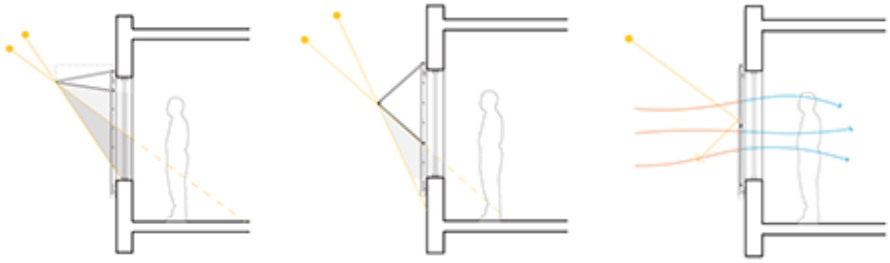


Gambar 2.24 Gerak translasi dan scaling pada *folding shutter* (Moloney, 2011)

Mekanisme *folding shutter* dapat menghasilkan beberapa konfigurasi bentuk sebagai hasil dari lipatan terbuka hingga tertutup. Menurut Baek (2018), teknik gerak lipat pada sistem *shading* dapat membantu mengkontrol proyeksi pembayangan terhadap sudut *altitude* dan *azimuth* matahari. Penelitian Kensek (2011) juga menunjukkan bahwa *folding panel* berfungsi lebih baik sebagai sistem *shading* apabila berada di posisi horizontal yang tegak lurus dengan setengah tinggi jendela. Namun, penerapan material solid pada *folding panel* cenderung menghalangi masuknya akses penerangan alami. Berdasarkan hal tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa sudut lipatan dan jenis material dapat mempengaruhi performa penerangan dari *folding shutter*.

2.4.4 Konfigurasi Operatif *Folding Shutter*

Konfigurasi operatif berhubungan dengan segala bentuk, posisi dan sudut lipatan yang dihasilkan dari *folding shutter* pada saat dioperasikan. Istilah konfigurasi operatif bisa diartikan sebagai suatu kondisi terbuka atau tertutup dari suatu sistem (Romero, 2005). *Folding shutter* dapat dioperasikan secara vertikal dan horizontal dengan cara menggerakkan *handle* melalui kusen geser (*slide*) di jendela. Pada dasarnya, konfigurasi operatif *folding shutter* dibagi menjadi kondisi terbuka, kondisi semi-terbuka dan kondisi tertutup seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1 dan Gambar 2.25. Eisenman (1991) berpendapat bahwa *folding* berhubungan dengan konsep *objectile*, yaitu adalah bentuk-bentuk yang bergerak dalam waktu. Sehubungan dengan itu, maka *folding shutter* terdiri dari bentuk-bentuk yang merupakan bagian dari suatu pergerakan lipatan.



Gambar 2.25 *Folding shutter* pada kondisi terbuka, semi-terbuka, tertutup
Sumber : https://www.behance.net/gallery/72873089/ONE-FOLD-a-*shading*-device/

2.4.5 *Folding Shutter* sebagai Strategi Penerangan Alami

Folding shutter berperan sebagai strategi penerangan alami pada bangunan rumah susun dalam menghadapi kondisi di iklim tropis. Sub bab ini membahas mengenai strategi-strategi yang digunakan dalam menyusun model awal *folding shutter*. Model awal *folding shutter* merupakan variabel bebas yang diujikan pada tahapan simulasi. Strategi penerangan alami yang diterapkan pada model awal *folding shutter* dijelaskan sebagai berikut:

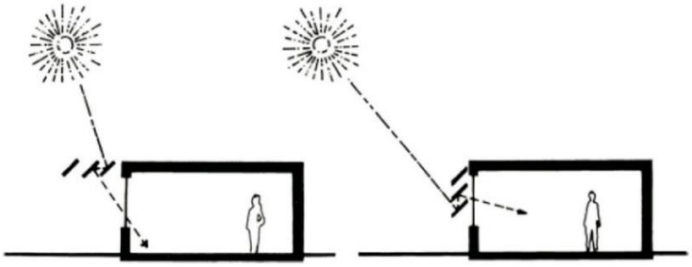
a. *Shading* eksternal

Eksternal *shading* merupakan *shading* yang diterapkan pada bagian luar fasad bangunan dan memiliki kontak langsung dengan lingkungan diluar. Menurut Lechner (2015), eksternal *shading* lebih efisien daripada internal *shading* dalam mengkontrol komponen cahaya langsung (*direct sunlight*) dan menahan panas yang

diperoleh. Namun, performa dari sistem *shading* eksternal sangat dipengaruhi oleh material dan tingkat reflektivitas *shading*, ukuran celah bukaan dan jarak *shading* dengan jendela (Ye, 2016). Pada penelitian ini, *folding shutter* berfungsi sebagai *shading* eksternal atau fasad kedua bangunan.

b. Warna dan reflektivitas *folding shutter*

Warna putih dapat memantulkan radiasi matahari dari permukaan hingga sebesar 90% (Lechner, 2015). Kombinasi warna cerah dan reflektivitas yang tinggi pada material *shutter* dapat membantu menghasilkan bidang pantul untuk merefleksikan cahaya ke dalam ruang (Gambar 2.26). Menurut Ye (2016), material dengan reflektivitas tinggi perlu diterapkan pada sistem *shading* untuk menurunkan panas dari konveksi antara sistem *shading* dan permukaan kaca.

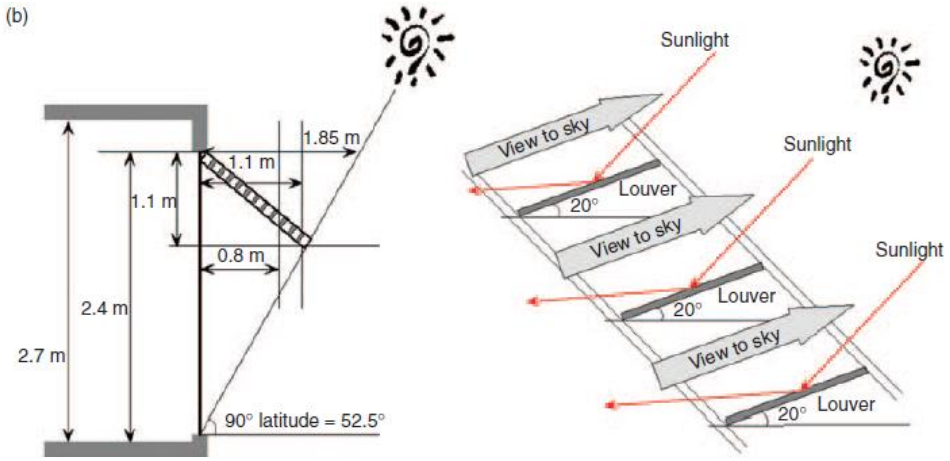


Gambar 2.26 Warna cerah membantu refleksi cahaya (Lechner, 2015)

c. Teknik gerak lipat (*folding*)

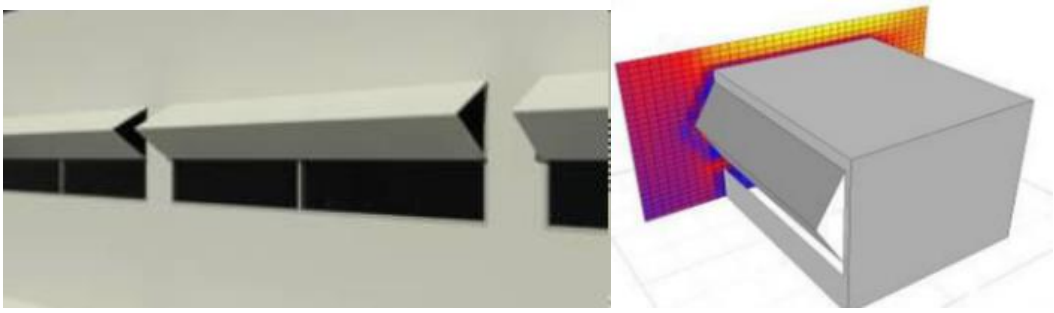
Folding shutter dapat digerakkan dengan dilipat secara manual. Menurut Al-Dakheel (2017), sistem *shading* lipat memiliki kelebihan pada fleksibilitas gerak dinamis yang dapat disesuaikan dengan kondisi cuaca, penampilan kinetis yang menambah estetika bangunan, dan mengurangi efek silau yang disebabkan oleh cahaya matahari langsung. Ketika dilipat, *folding shutter* membentuk *sloped shutter* yang memiliki sudut kemiringan tertentu dari fasad. Penelitian Kim (2010) meneliti tentang *sloped external shading* dengan memperhitungkan sudut *altitude* dan sudut pantulan (*incidence angle)* matahari. Konsep *shading* dari penelitian Kim ditunjukkan pada Gambar 2.27. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *sloped external shading* dapat meningkatkan nilai iluminan pada area terdalam ruang dengan lebih baik dibandingkan *horizontal shutter* biasa. Analisis parametrik juga menunjukkan bahwa proyeksi kedalaman sebesar 0,8 meter dengan sudut

kemiringan 45° dari jendela menghasilkan pantulan cahaya terbaik. Pada penelitian ini, *sloped shutter* digunakan sebagai strategi pemantulan cahaya yang dikembangkan dan disesuaikan dengan kondisi iklim tropis.



Gambar 2.27 *Sloped external shading* (Kim, 2010)

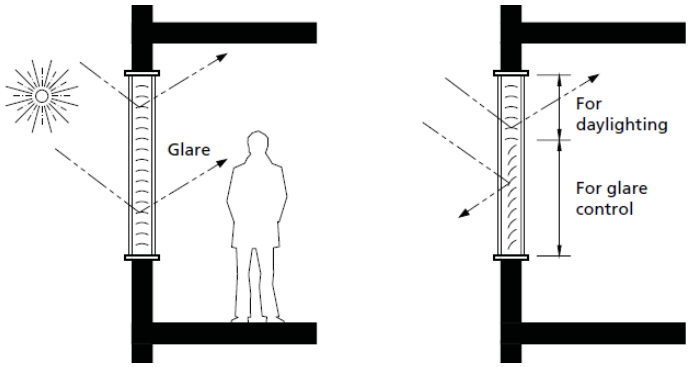
Penerapan teknik gerak lipat pada sistem *shading* sebelumnya juga telah dilakukan oleh Kensek (2011), yang mengkaji tentang *folding panel* terhadap performa penerangan alami dan termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *folding panel* dapat memberikan pembayangan hingga setengah tinggi jendela dan dapat mengurangi efek panas sebesar 32,7%. Namun, material solid dari *folding panel* cenderung menghalangi penerangan alami untuk masuk ke dalam ruang. Pada penelitian Kensek (2011) tidak disebutkan secara spesifik mengenai sudut kemiringan lipatan yang digunakan, namun dari Gambar 2.28 terlihat bahwa sisi lipatan atas dan bawah memiliki sudut lipatan yang sama. Berdasarkan dua penelitian terdahulu, maka *sloped shutter* dari penelitian Kim (2010) dikembangkan menjadi sistem *shading* dinamis dengan menggunakan teknik gerak lipat seperti yang telah diterapkan pada penelitian Kensek (2011).



Gambar 2.28 *Folding panel* (Kensek, 2011)

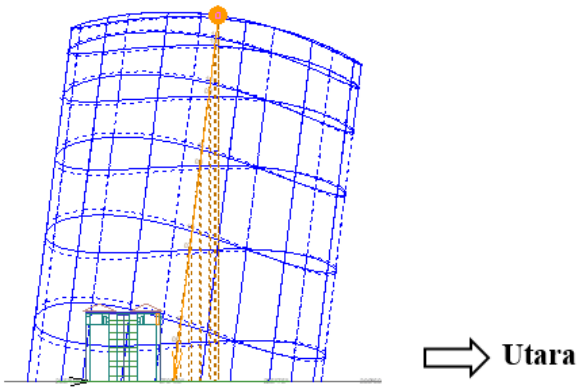
d. Teknik gerak rotasi kisi-kisi *shutter*

Pergerakan rotasi pada kisi-kisi *shutter* dapat berfungsi untuk mengkontrol cahaya yang masuk dengan cara refleksi/pemantulan cahaya dan pembayangan. Sudut kemiringan kisi-kisi *shutter* juga dapat mempengaruhi pantulan cahaya yang dihasilkan serta membantu mendifusi cahaya dan mencegah silau (Gambar 2.29).

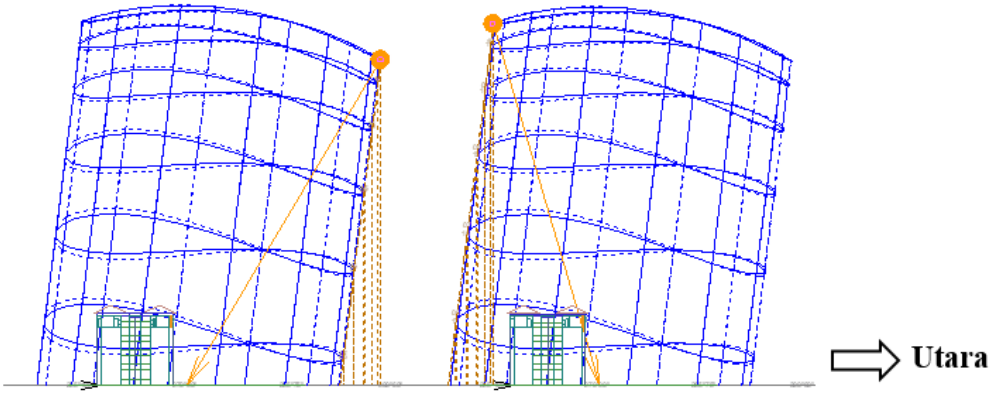


Gambar 2.29 Pengaruh sudut kemiringan kisi-kisi *shutter* pada pantulan cahaya (Lechner, 2015)

Penelitian terdahulu (Koo, 2010) menunjukkan bahwa kisi-kisi *blinds* dapat memberikan perlindungan dari paparan cahaya yang mengandung efek silau, serta memaksimalkan penetrasi penerangan alami sesuai dengan preferensi pengguna. Adapun kuantitas penerangan sangat dipengaruhi oleh posisi dan sudut kisi-kisi yang diterapkan pada *blinds*. Koo (2010) juga menyatakan bahwa performa sudut kisi-kisi sangat dipengaruhi oleh sudut *altitude* matahari dan pola pergerakan *sunpath*. Kim (2010) melakukan optimasi sudut kisi-kisi pada *sloped shutter* dan sudut sebesar 20° terbukti dapat meningkatkan nilai iluminan pada area terdalam ruang (Gambar 2.27). Namun, penelitian Kim dilakukan pada iklim temperate (Korea), yang memiliki sudut *altitude* berbeda dengan iklim tropis. Indonesia terletak pada garis *equator* yang memiliki sudut *altitude* matahari cenderung tinggi. Gambar 2.30 dan 2.31 menunjukkan sudut *altitude* matahari di kota Surabaya pada waktu *equinox* (21 Maret) dan waktu *solstice* (21 Juni dan 21 Desember) dari program Ecotect. Pada tiga kondisi tersebut, sudut *altitude* hampir mendekati *zenith* atau tegak lurus permukaan tanah. Penelitian terdahulu di iklim tropis menunjukkan bahwa kondisi tersebut menghasilkan iluminan yang tinggi dengan distribusi cahaya tidak merata (Lim, 2016), yang dapat meningkatkan permasalahan termal dan silau (Karlsen, 2015).

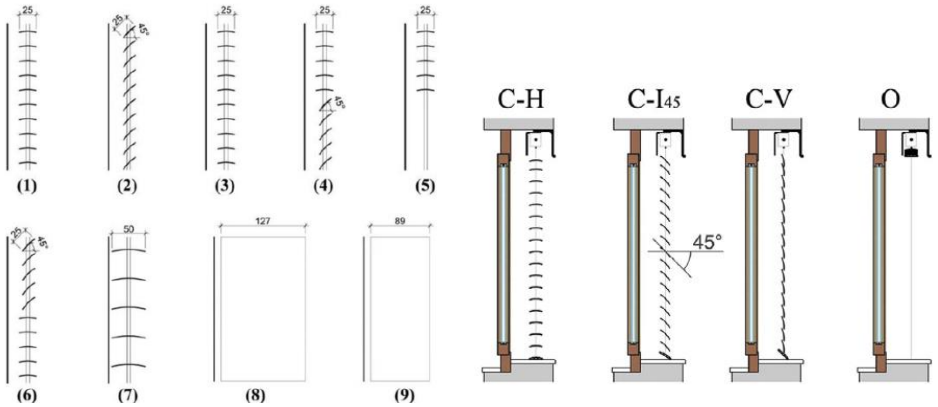


Gambar 2.30 Sudut *altitude* matahari pada *equinox* (21 Maret)



Gambar 2.31 (dari kiri) Sudut *altitude* matahari pada 21 Juni dan 21 Desember

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang meneliti tentang optimasi sudut kemiringan kisi-kisi. Carletti (2016) melakukan optimasi konfigurasi operatif *venetian blinds* (Gambar 2.32). Hasil penelitian menunjukkan sudut 0° dan 45° menghasilkan iluminan indoor yang paling menyeluruh untuk bangunan residensial. Penelitian Lim (2012;2013) menunjukkan bahwa sudut 0° menghasilkan nilai DF lebih tinggi daripada sudut 45° (Gambar 2.33). Sudut 45° juga dapat membantu mengurangi efek silau pada bidang vertikal ketika terpapar cahaya langsung. Penelitian Hernandez (2017) menunjukkan bahwa sudut 60° yang menghadap orientasi utara lebih efektif untuk mengurangi beban pendinginan, namun cenderung menghasilkan nilai iluminan yang rendah. Dari penelitian terdahulu ditemukan bahwa kemiringan kisi-kisi *shutter* yang efektif adalah 0° dan 45°, sedangkan jika sudut melebihi 60° dapat berdampak pada penurunan nilai iluminan. Adapun pada penelitian ini dilakukan pengujian sudut kisi-kisi dari 0° hingga 165° untuk mengidentifikasi pengaruh yang dihasilkan dalam konteks iklim tropis.



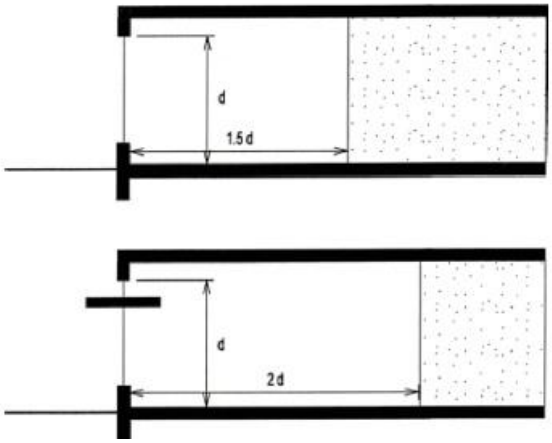
Gambar 2.32 (dari kiri) Penelitian sudut kemiringan kisi-kisi oleh Lim (2013) dan Carletti (2016)

e. Integrasi dengan sistem *shading* lain

Integrasi dengan sistem *shading* lainnya bertujuan untuk mengoptimalkan kelebihan dari tiap *shading* untuk menghasilkan performa penerangan yang lebih baik. Menurut Olbina (2012), berbagai sistem *shading* dan strategi kontrol perlu digunakan pada bagian yang berbeda pada jendela untuk dapat menghasilkan fungsi yang berbeda. Oleh sebab itu, beberapa model *folding shutter* yang diuji pada penelitian ini akan diintegrasikan dengan sistem *shading* lainnya.

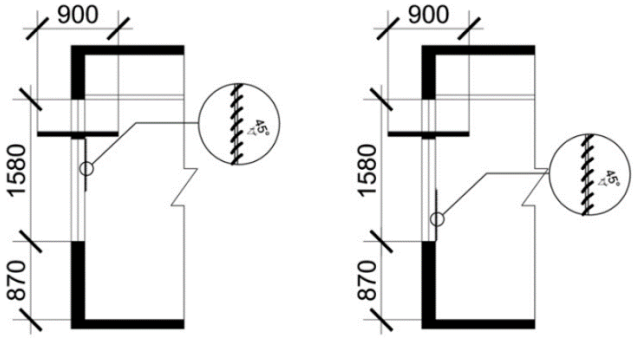
- Distribusi cahaya melalui bidang pantul (integrasi dengan *light shelf*)

Light shelf berperan sebagai bidang pantul cahaya yang baik dengan penetrasi penerangan ke dalam ruang dapat menjadi dua kali lipat tinggi jendela (Lechner, 2015). Efek pemantulan cahaya dengan *light shelf* ditunjukkan pada Gambar 2.33. Berdasarkan hal tersebut, prinsip dari *light shelf* diterapkan pada *folding shutter* untuk menghasilkan distribusi cahaya yang lebih merata. Beberapa penelitian sebelumnya yang meneliti tentang *light shelf* diantaranya adalah Ho (2008) yang menyatakan bahwa kedalaman *light shelf* sebesar 500 mm menghasilkan distribusi cahaya lebih baik daripada kedalaman 700 mm. Penelitian Lim (2013) di iklim tropis menyatakan bahwa kedalaman *light shelf* sebesar 600 mm adalah yang paling optimal untuk distribusi cahaya, sedangkan kedalaman sebesar 900 mm membuat rasio iluminan. Dengan demikian, maka penelitian ini menggunakan kedalaman *light shelf* sebesar 600 mm.



Gambar 2.33 Pemantulan cahaya dengan *light shelf* (Lechner, 2015)

Lim (2012; 2013) juga mengkaji mengenai integrasi dari *light shelf* dan *partial blinds* terhadap penerangan alami (Gambar 2.34). Ditemukan bahwa *blinds* tidak terlalu berpotensi dalam mengutilisasi penerangan alami, namun sangat efektif dalam menurunkan kontras luminan. Sedangkan *light shelf* memiliki performa lebih baik dalam memantulkan cahaya, namun beresiko menyebabkan permasalahan silau. Hasil integrasi dari kedua *shading* tersebut terbukti dapat meningkatkan rata-rata kenyamanan visual (VDP) dan CIE Glare Index. Seluruh penelitian Lim (2012;2013;2016) dilakukan pada iklim tropis (Malaysia), maka hasil penelitian tersebut dapat digunakan sebagai landasan dalam permodelan.

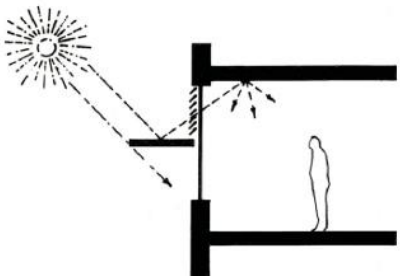


Gambar 2.34 Integrasi *light shelf* dan *partial blinds* (Lim, 2012)

- Akses pemandangan luar (integrasi dengan *overhang*)

Selain meningkatkan performa penerangan alami yang menyeluruh, sistem *shading* juga perlu memberikan akses ke pemandangan luar (*view*). Penerapan *overhang* dapat memberikan pembayangan dengan mencegah paparan cahaya matahari langsung, serta menampilkan pemandangan luar paling baik dari sistem *shading* lainnya (Baker, 2002; Lechner, 2015). Akses pemandangan perlu disertai

dengan pembayangan yang ditempatkan sejajar dengan mata manusia untuk mencegah terjadinya silau, seperti yang ditunjukkan di Gambar 2.35. Penelitian tentang penerapan *overhang* di iklim tropis telah dilakukan oleh Ossen (2005). Hasil penelitian merekomendasikan rasio faktor proyeksi *overhang* sebesar 0,4 untuk orientasi utara. Faktor proyeksi *overhang* diperoleh dari perbandingan antara kedalaman *overhang* dan tinggi jendela. Hal ini berarti untuk jendela rumah susun yang memiliki tinggi 160 cm, diperlukan *overhang* dengan kedalaman ±60 cm.



Gambar 2.35 Pembayangan untuk mendukung akses pemandangan (Lechner, 2015)

2.5 *State of Art*

State of the art diperoleh dari beberapa penelitian terdahulu sebagai panduan mengenai perkembangan terbaru dari topik terkait penelitian ini. Topik penelitian yang termasuk dalam fokus penelitian ini yaitu adalah performa penerangan alami pada bangunan rumah susun di iklim tropis, serta teknik gerak lipat pada sistem *shading* dinamis. Berikut ini adalah beberapa penelitian terdahulu yang meneliti tentang performa penerangan alami pada bangunan rumah susun:

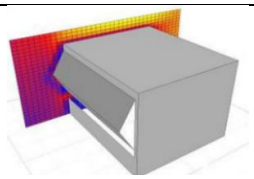
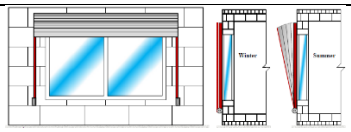
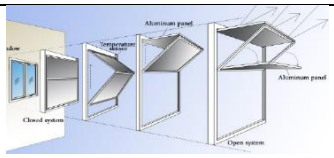
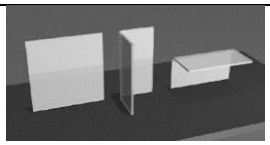
1. Mufidah (2016) meneliti tentang optimasi energi alami melalui fasad rumah susun di Surabaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fasad rumah susun di Surabaya masih kurang mempertimbangkan optimasi penerangan alami, sehingga dibutuhkan pengolahan fasad secara vertikal maupun horizontal.
2. Avesta (2017) meneliti tentang strategi desain bukaan terhadap penerangan alami pada rusunawa di Jatinegara Barat. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada unit rumah susun diperlukan pengurangan luas bukaan dan penerapan sistem *shading* yang dapat mengantisipasi silau.

Penelitian terdahulu yang berfokus untuk membahas sistem *shading* dengan teknik lipat (*folding*) yang telah dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Kensek (2011) mengkaji tentang pengaruh *folding panel* terhadap penerangan alami dan termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *folding panel* lebih fungsional sebagai pembayangan apabila berada di posisi horizontal yang tegak lurus pada setengah tinggi jendela, dan dapat mengurangi efek panas sebesar 32,7%. Hasil simulasi penerangan menunjukkan bahwa *folding panel* dengan material solid cenderung menghalangi cahaya untuk masuk ke dalam ruang.
2. Baek (2018) mengkaji tentang *folding shading device* (FSD) dalam menghadapi pergerakan matahari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa FSD dapat mengkontrol proyeksi pembayangan terhadap sudut *altitude* dan *azimuth* matahari, dan dapat mengurangi panas radiasi matahari hingga sebesar 61,74%.

Berkaitan dengan penelitian terdahulu yang telah disebutkan, maka pada penelitian ini digunakan material berkisi-kisi *shutter* sebagai pengganti dari material solid *folding panel*. Selain itu, penelitian ini berfokus pada proyeksi sudut *altitude* dan *azimuth* matahari terhadap penerangan alami di tropis. Adapun model teknik lipat yang digunakan pada penelitian terdahulu ditunjukkan pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Penelitian tentang Sistem *Shading* Dinamis dengan teknik lipat

Peneliti	**Jenis *Shading***	**Performa**	**Metode**	**Iklim**
Kensek (2011)	 *Folding Panels*	Penerangan alami dan Termal	Simulasi	Sub-tropis
Baek (2018)	 *Folding shading device*	Pembayangan dan Termal	Simulasi	Temperate
Ahmed (2016)	 *Folding Panels*	Termal	Eksperimen	Hot-arid
Lignarolo (2011)	 *Shape morphing façade*	Penghawaan	Simulasi	-

Sumber : Kensek (2011), Baek (2018), Ahmed (2016), Lignarolo (2011)

Beberapa penelitian sebelumnya yang meneliti mengenai komparasi sistem *shading* dinamis terhadap performa penerangan telah banyak dilakukan. Menurut Konstantoglou (2016), sebagian besar penelitian tentang sistem *shading* dinamis meneliti mengenai teknik gerak rotasi atau *motorized blinds*, sedangkan analisis tentang fasad dinamis yang menggunakan struktur yang dapat dilipat (*foldable*) dan dikerahkan (*deployable*) masih terbatas. Al-Dakheel (2017) juga menyatakan bahwa penerapan teknik gerak lipat pada sistem *shading* masih terbatas karena sebagian besar menggunakan kontrol otomatis. Selain itu potensi pergerakan *folding* belum diteliti secara mendalam, sehingga masih diperlukan penelitian sistem *shading* lipat pada berbagai kondisi iklim. Adapun pada konteks iklim tropis, penelitian mengenai *movable external shading* masih jarang dilakukan, terutama jika diterapkan pada fasad vertikal bangunan (Al-Masrani, 2018).

Dari penelitian terkait yang telah disebutkan, ditemukan bahwa penelitian tentang sistem *shading* dinamis dengan teknik lipat dalam aspek penerangan alami belum dilakukan secara mendalam, terutama pada konteks di iklim tropis. Selain itu, masih sedikit penelitian yang membahas mengenai strategi penerangan alami yang menggunakan sistem *shading* eksternal untuk bangunan rumah susun. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk melengkapi penelitian terdahulu yaitu untuk meneliti tentang performa penerangan alami dari sistem *shading* dinamis dengan teknik gerak lipat dan rotasi (*folding shutter*) pada rumah susun.

2.6 Sintesis Kajian Pustaka

Baker (2002) membagi peran penerangan alami pada arsitektur untuk memenuhi dua aspek utama yaitu; 1) Kebutuhan emosi personal seperti kesejahteraan, kenyamanan dan kesehatan, dan 2) Kebutuhan praktis komunitas untuk konservasi energi. Penerangan alami pada iklim tropis memiliki nilai radiasi matahari yang tinggi antara 5000-7500 wh/m^2 (Koenigsberger, 2010) dan intensitas cahaya dapat mencapai 130,000 lux (Lim, 2012). Tingkat *luminance* pada langit cerah sebesar 7000 cd/m^2 dan pada langit mendung sebesar 850 cd/m^2 atau lebih rendah. Jumlah cahaya matahari yang berlebihan dapat menyebabkan ketidaknyamanan visual dan permasalahan kesilauan (Munaaim, 2016). Salah satu parameter dalam mengukur performa penerangan adalah *Daylight Factor* (DF),

yaitu rasio dari iluminan *indoor* bangunan dengan iluminan *outdoor* bangunan. Standar DF yang disusun dengan konteks iklim tropis diantaranya adalah Standar Malaysia (MS 1525:2007) dan GBCI (2012) dimana rentang DF antara 2-5% yang memenuhi 30% total area ruang menunjukkan penerangan alami yang memadai.

Rumah susun adalah bangunan gedung bertingkat yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan hunian yang layak bagi masyarakat berkalangan menengah kebawah (UU No. 16 tahun 1985). Tipologi bangunan rumah susun dibedakan berdasarkan penyusunan lantai, pencapaian secara vertikal dan akses sirkulasi horizontal (De Chiara, 1995). Tipe unit rumah susun dibedakan menjadi tipe kecil, sedang dan besar dengan standar luas sesuai dengan fungsi ruang (DPU Tahun 1991). Standar penerangan pada rumah susun disesuaikan dengan persyaratan teknis Standar Nasional Indonesia (2001) yang didukung oleh teori Koenigsberger (2010) tentang konteks penerangan alami di iklim tropis. Permasalahan penerangan alami pada rumah susun di Surabaya adalah kurangnya optimasi penerangan alami pada fasad (Mufidah, 2016), dan dibutuhkan adanya penerapan sistem *shading* pada fasad rumah susun yang dapat mengantisipasi efek silau (Avesta, 2017).

Strategi penerangan alami pada kondisi eksterior bangunan meliputi kontrol cahaya matahari dan pencegahan silau dengan menggunakan sistem *shading* (Phillips, 2004). Sistem *shading* dinamis adalah *shading* yang adaptif dan responsif pada kondisi lingkungan karena karakternya yang bisa digerakkan (O'Brien, 2013) dan dapat dikendalikan sesuai dengan preferensi pengguna (Nicol, 2002). Penerapan kontrol gerak lipat (*folding*) pada sistem *shading* dinamis dapat menghasilkan efek membesar atau mengecil dan memiliki fleksibilitas tinggi untuk berubah bentuk (Moloney, 2011). *Folding shutter* adalah sistem *shading* dinamis yang menerapkan gerak lipat dan rotasi. Kisi-kisi *shutter* juga dapat memberikan perlindungan dari paparan cahaya yang mengandung efek silau, serta memaksimalkan penetrasi penerangan alami sesuai dengan preferensi pengguna (Koo, 2010). Ketika dioperasikan, *folding shutter* memiliki konfigurasi operatif yang merupakan kondisi terbuka hingga tertutup dari suatu sistem (Romero, 2005).

Penelitian terdahulu tentang penerangan alami pada rumah susun yang dilakukan oleh Mufidah (2016) dan Avesta (2017) menunjukkan bahwa masih dibutuhkannya penelitian tentang strategi penerangan di rumah susun. Penelitian

terkait sistem *shading* dengan teknik lipat oleh Kensek (2011) dan Baek (2018) menunjukkan bahwa masih kurangnya penelitian yang membahas tentang performa penerangan dari sistem *shading* dengan teknik gerak lipat. Konstantoglou (2016) dan Al-Dakheel (2017) menyatakan bahwa penelitian sistem *shading foldable* dan *deployable* masih terbatas dan perlu dilakukan pada berbagai kondisi iklim untuk mengidentifikasi potensi yang dimiliki. Al-Masrani (2018) juga menyatakan bahwa penelitian mengenai sistem *shading* eksternal pada fasad vertikal bangunan di iklim tropis masih jarang dilakukan. Berdasarkan pembahasan *state of art* mengenai penelitian sejenis, maka penelitian ini berfokus untuk membahas pengaruh penerapan sistem *shading* dinamis dengan teknik gerak lipat (*folding shutter*) pada rumah susun terhadap performa penerangan alami dalam konteks di iklim tropis.

BAB 3
METODE PENELITIAN

Pada bab ini dilakukan pembahasan metodologi yang diterapkan pada penelitian diantaranya paradigma penelitian, metode penelitian, variabel penelitian, obyek penelitian, data penelitian, serta prosedur metode penelitian. Pada bagian akhir dilakukan juga pembahasan mengenai tahapan penelitian.

3.1 Paradigma Penelitian

Penelitian ini berfokus pada performa penerangan alami yang dihasilkan *folding shutter* sebagai sistem *shading* dinamis pada rumah susun dalam menghadapi kondisi di iklim tropis. Berdasarkan hal itu, penelitian ini dapat digolongkan sebagai penelitian kuantitatif. Hal ini berdasarkan pada kesamaan karakteristik penelitian dengan pernyataan Groat dan Wang (2013) mengenai penelitian kuantitatif, yaitu sebagai berikut:

1. Prosesnya bersifat deduktif, dimana penelitian ini mencari hubungan sebab dan akibat (*causality)* dari konfigurasi operatif *folding shutter* dan pengaruhnya terhadap performa penerangan alami di rumah susun.
2. Fenomena yang dapat diukur dengan angka, dalam hal ini penerangan alami yang diteliti dapat di evaluasi dengan data berupa angka.
3. Realitas bersifat objektif, yaitu bahwa performa penerangan alami dievaluasi melalui intensitas cahaya (*Daylight Factor*) dan distribusi cahaya yang dihasilkan dari penerapan *folding shutter*.

Penelitian ini menggunakan paradigma *positivism* sebagai paradigma pedoman dalam pemilihan metodologi penelitian. Paradigma *positivism* adalah suatu paradigma yang menganggap bahwa suatu realita dapat ditentukan dan diukur (Groat dan Wang, 2013). Adapun pemilihan paradigma *positivism* pada penelitian ini didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut:

a) Penelitian ini menggunakan objektivitas dalam proses riset dan merupakan tujuan dilakukan riset,
b) Penelitian ini mengungkapkan validitas internal; data penelitian disesuaikan dengan fenomena yang terjadi,

c) Penelitian ini mengutamakan validitas eksternal; hasil penelitian dapat digeneralisasi dan diterapkan pada penelitian terkait,
d) Penelitian ini memiliki konsistensi yang dapat diandalkan (*reliability);* proses penelitian menggunakan pengukuran yang konsisten.

3.2 Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mencari pengaruh dari *folding shutter* terhadap performa penerangan alami di rumah susun dalam menghadapi kondisi di iklim tropis. Berdasarkan hal itu, metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental dengan bantuan simulasi. Metode eksperimental berfokus pada hubungan sebab-akibat dengan menggunakan variabel kontrol, bebas dan terikat (Groat dan Wang, 2013). Simulasi dengan menggunakan program *Radiance* dilakukan untuk menguji model *folding shutter* yang diajukan peneliti pada lingkungan eksperimen yang dibuat menyerupai eksisting. Penggunaan simulasi pada penelitian ini juga didasari pada pertimbangan seperti berikut.

a. Memudahkan pengendalian kondisi lingkungan eksperimen.
b. Mencegah terjadinya resiko yang dapat membahayakan penduduk.
c. Memudahkan dilakukannya perlakuan pada model.
d. Memudahkan efisiensi waktu dan tempat eksperimen.

Kelebihan dari simulasi adalah dapat membantu menguji pemberlakuan sistem konseptual secara empiris. Adapun kekurangan dari simulasi adalah adanya keterbatasan untuk menjadi representasi lengkap dari kondisi nyata dan tantangan untuk menentukan jumlah input data yang dapat mengarah pada hasil simulasi. Penelitian eksperimental yang menggunakan bantuan simulasi komputer telah banyak dilakukan sebelumnya, diantaranya oleh Acosta (2015) yang mengkaji tentang pengaruh dimensi jendela terhadap nilai *daylight factor* dan jumlah energi yang dihasilkan; Lim (2016) yang mengkaji tentang *dynamic internal light shelf* terhadap intensitas cahaya, distribusi cahaya dan efek silau; dan Kim (2010) yang mengkaji tentang pengaruh proyeksi kedalaman dan sudut kisi-kisi dari *sloped external shading* terhadap penerangan alami.

3.3 Obyek dan Subyek Penelitian

Obyek penelitian merupakan pokok persoalan yang hendak diteliti untuk mendapatkan data penelitian secara lebih terarah. Obyek penelitian dalam penelitian ini adalah performa penerangan alami dari penerapan sistem *shading* dinamis *folding shutter*. Subyek penelitian merupakan sesuatu yang akan diteliti dalam penelitian. Penentuan subyek bertujuan untuk menggeneralisasikan hasil penelitian yang dilakukan pada berbagai kondisi yang berhubungan dengan variabel-variabel sejenis. Pada penelitian ini, pemilihan *base case* sebagai subyek penelitian menggunakan prosedur *purposive sampling*, yaitu diambil berdasarkan keputusan peneliti dengan pertimbangan tertentu (Sugiyono, 2011). Rusunawa Siwalankerto 2 dipilih sebagai *base case* karena memiliki tipologi bangunan yang memenuhi kriteria subyek penelitian (Tabel 3.1). Lokasi *site maps* dan tampak luar bangunan Rusunawa Siwalankerto 2 ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan 3.2 berikut.

Gambar 3.1 *Site maps* Rusunawa Siwalankerto 2 (Google Maps)

Gambar 3.2 Tampak luar Rusunawa Siwalankerto 2 (Penulis, 2020)

Tabel 3.1 Kriteria pemilihan subyek penelitian (*base case*)

Kriteria	**Keterangan**
Lokasi	Bangunan terletak di kota Surabaya, dengan iklim tropis.
Fungsi bangunan	Bangunan hunian untuk masyarakat menengah bawah.
Akses bangunan	Bangunan *walk-up flat* yang menggunakan akses tangga dan sirkulasi koridor interior (*double-loaded*).
Jenis fasad	Fasad bangunan memiliki dua jenis bukaan, yaitu jendela dan balkon yang terpisah.
Tipologi unit	Unit tidak memiliki partisi yang membatasi antara ruang tidur dan ruang tamu, sehingga bukaan jendela memiliki akses langsung ke seluruh ruang di unit.

Sumber: Penulis (2020)

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Jenis Variabel

Variabel dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga jenis yaitu variabel bebas, terikat dan kontrol. Variabel bebas adalah variabel yang berperan sebagai *treatment* yang bisa dimanipulasi dan dikontrol oleh peneliti, dan variabel terikat adalah suatu respon atau pengaruh dari *treatment* eksperimen tersebut. Sedangkan variabel kontrol adalah suatu kondisi yang dibiarkan secara apa adanya dan tidak bisa dimanipulasi yang bertujuan untuk membandingkan efek relatif dari variabel bebas dengan unit yang menggunakan *treatment* yang berbeda. Variabel-variabel yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variabel Penelitian

No.	**Jenis Variabel**	**Variabel**	**Sub-Variabel**
1.	Variabel Kontrol	1) Lokasi *site*	
		2) Orientasi jendela (utara)	
		3) Tipologi dan dimensi unit	
		4) Warna dan reflektivitas permukaan ruang	
		5) Material *folding shutter*	
		6) Geometri kisi-kisi *shutter*	
2.	Variabel Bebas	1) Model *folding shutter*	FS1 (*folding shutters*)
			FS2 (*light shelf x shutter)*
			FS3 (*overhang x shuter)*

No.	Jenis Variabel	Variabel	Sub-Variabel
2.	Variabel Bebas	2) Sudut kisi-kisi *shutter*	0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, dan 165°
		3) Konfigurasi operatif *folding shutter*	Tertutup (KO1)
			Semi-tertutup (KO2)
			Menengah (KO3)
			Semi-terbuka (KO4)
			Terbuka (KO5)
		4) Jarak penempatan model	0 cm, 30 cm, 50 cm, 30 cm + *overhang*, 50 cm + *overhang*
		5) Kondisi Langit di Tropis	Langit *overcast*
			Langit *partly cloudy*
		6) Posisi matahari di Tropis	*Equinox* (21 Maret)
			Summer solstice (21 Juni)
3.	Variabel Terikat	1) Intensitas cahaya	*Work Plane Illuminance* (WPI) indoor dan outdoor
			Daylight factor (DF)
		2) Distribusi cahaya	*Uniformity ratio* (E_{min}/E_{avg})
			Deviasi iluminan
			Perimeter ruang
			Grafik renderasi

Sumber: Penulis (2020)

3.4.2 Definisi Operasional

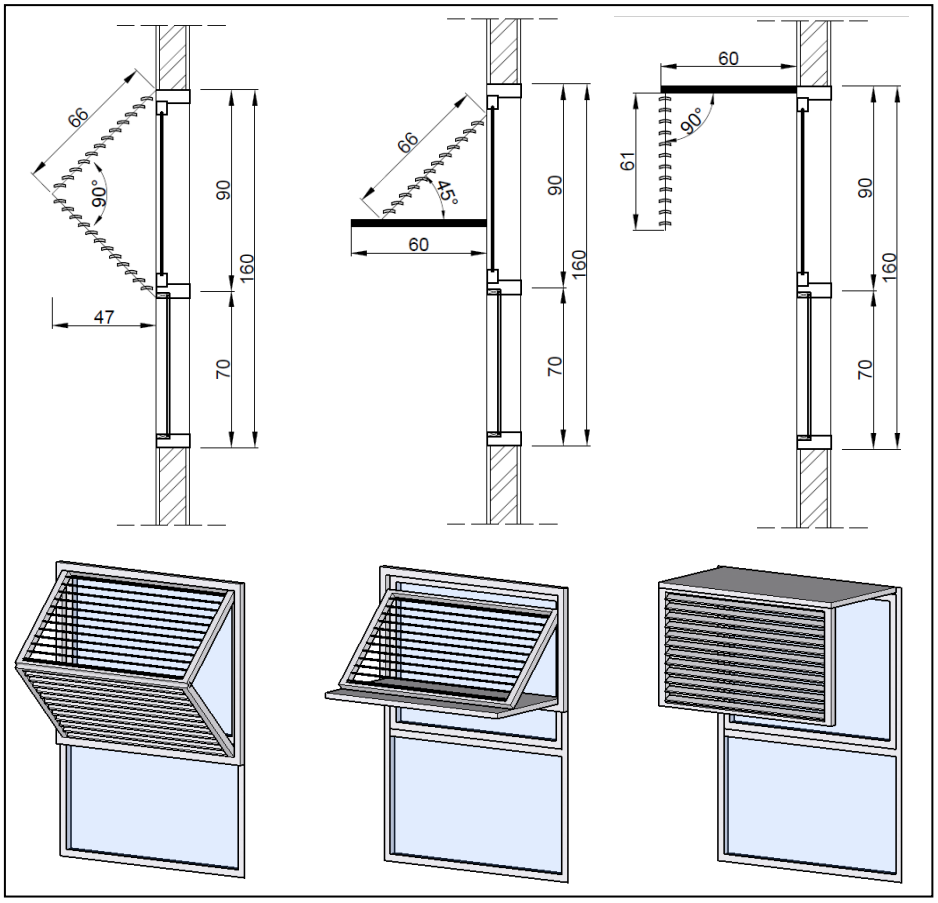
1. Variabel kontrol

1) Lokasi *site* : penelitian dilakukan di Kota Surabaya, Indonesia yang memiliki konteks iklim tropis.
2) Orientasi Jendela : orientasi jendela disesuaikan dengan kondisi pada bangunan *base case* yaitu menghadap ke arah utara.
3) Tipologi unit dan dimensi ruang : tipologi unit menggunakan tipe koridor interior (*double-loaded*), memiliki balkon dan jendela terpisah. Dimensi ruang disesuaikan dengan kondisi pada *base case*.
4) Warna dan reflektivitas permukaan ruang : warna dan reflektivitas/daya pantulan permukaan ruang disesuaikan dengan kondisi pada *base case*.
5) Material *folding shutter* : *folding shutter* menggunakan aluminium dengan *finishing* cat berwarna putih. Dasar dari pemilihan material adalah kemampuan memantulkan cahaya dan ketahanan terhadap cuaca dan rayap.

6) Geometri kisi-kisi *shutter* : kisi-kisi *shutter* memiliki bentuk permukaan datar dengan lebar 5 cm dan ketebalan 10 mm.

2. Variabel bebas

1) Model *Folding shutter*: hasil pengembangan dari sistem *shading* terdahulu dengan sistem gerak lipat dan rotasi, yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Gambar potongan dan perspektif 3D dari FS1, FS2, dan FS3

a. FS1: pengembangan dari *sloped external shading* (Kim, 2010) dan *folding panel* (Kensek, 2011) menjadi *folding shutter* yang memiliki permukaan kisi-kisi *shutters.*

b. FS2: integrasi antara *shutter* dan *light shelf* yang merupakan pengembangan dari penelitian Lim (2012;2013).

c. FS3: integrasi antara *shutter* dan *overhang* dari penelitian Ossen (2005) yang memiliki faktor proyeksi kedalaman sebesar 0,4.

2) Sudut kisi-kisi *shutter* : sudut kemiringan kisi-kisi *shutter* yang dapat digerakkan dengan cara diputar. Pada penelitian ini sudut yang diuji dalam

aspek distribusi cahaya (iluminan) hanya sudut 0°, 45°, 90°, dan 135°. Sedangkan dalam aspek kuat intensitas cahaya (*daylight factor*) adalah sudut 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, dan 165°.

3) Konfigurasi operatif *folding shutter*: konfigurasi yang dihasilkan oleh *folding shutter* ketika dioperasikan dengan cara dilipat setiap 15°, pada penelitian ini dibedakan sebagai berikut:
   a. Kondisi tertutup (KO1) : kondisi dimana model ditutup sepenuhnya.
   b. Kondisi semi-tertutup (KO2) : kondisi dimana model sebagian ditutup.
   c. Kondisi menengah (KO3) : kondisi dimana model setengah dibuka.
   d. Kondisi semi-terbuka (KO4) : kondisi dimana model sebagian dibuka.
   e. Kondisi terbuka (KO5): kondisi dimana model dibuka sepenuhnya.

   Ilustrasi dari tiap konfigurasi operatif ditunjukkan pada Tabel 3.7.
4) Jarak penempatan model: jarak penempatan *folding shutter* dari fasad atau jendela rumah susun, pada penelitian ini dibedakan sebagai berikut:
   a. Penempatan langsung (jarak 0 cm): jendela rumah susun diasumsikan sebagai jendela mati sehingga model dipasang langsung pada fasad.
   b. Penempatan dengan jarak 30 cm: terdapat jarak sebesar 30 cm antara model dengan fasad untuk akses ventilasi melalui jendela *casement*.
   c. Penempatan dengan jarak 50 cm: terdapat jarak sebesar 50 cm antara model dengan fasad untuk akses ventilasi melalui jendela *casement*.
   d. Penempatan dengan jarak 30 cm dan penambahan *overhang*: terdapat jarak sebesar 30 cm antara model dengan fasad, dan *overhang* pada sisi atas sebagai sistem *shading* tambahan.
   e. Penempatan dengan jarak 50 cm dan penambahan *overhang*: terdapat jarak sebesar 50 cm antara model dengan fasad, dan *overhang* pada sisi atas sebagai sistem *shading* tambahan.
5) Kondisi Langit : sumber cahaya matahari yang memiliki spesifikasi tertentu sesuai dengan konteks iklim. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran pada dua kondisi langit yang sering terdapat di iklim tropis, yaitu langit berawan tebal (*overcast*) dan langit setengah berawan (*partly cloudy*).
   a. Langit *overcast* : langit *overcast* adalah kondisi dimana adanya kepadatan awan yang menutupi kubah langit. Langit *overcast* diterapkan

pada simulasi *daylight factor* sebagai representatif kondisi kritis di iklim tropis pada waktu *summer solstice* (21 Juni).

b. Langit *partly cloudy* : langit setengah berawan adalah kondisi dimana 30% hingga 80% kubah langit ditutupi oleh awan. Langit *partly cloudy* diterapkan pada simulasi iluminan sebagai representatif kondisi rata-rata di iklim tropis pada waktu *equinox* (21 Maret).

6) Posisi Matahari : hasil dari pola pergerakan matahari terhadap sumbu bumi pada variasi tahunan. Pada penelitian ini terdapat dua kondisi yang diuji, yaitu kondisi rata-rata (*equinox*) dan kondisi terkritis (*summer solstice*).

a. *Equinox* (21 Maret) : waktu puncak ketika posisi matahari tegak lurus dengan *equator* (garis tengah bumi/khatulistiwa).

b. *Summer solstice* (21 Juni) : waktu puncak ketika posisi matahari tegak lurus dengan belahan bumi selatan. Waktu ini adalah kondisi paling kritis untuk orientasi utara di iklim tropis (Lim, 2016).

3. Variabel terikat

1) Intensitas Cahaya : parameter intensitas cahaya dalam nilai iluminan dan *daylight factor* yang diukur/dihitung secara kuantitatif.

a. *Work Plane Illuminance* (WPI) / Iluminan : nilai intensitas cahaya dalam satuan Lux yang diukur menggunakan Lux meter. Pada simulasi dengan *Radiance,* nilai iluminan diperoleh pada kondisi langit *partly cloudy*.

b. *Daylight Factor* (DF) : rasio antara iluminan pada interior bangunan dengan iluminan pada eksterior bangunan. Pada simulasi dengan *Radiance,* nilai DF diperoleh pada kondisi langit *overcast.*

2) Distribusi Cahaya : perbandingan antara nilai iluminan atau DF dengan perimeter bagian dalam ruang yang dinilai secara kualitatif.

a. *Uniformity ratio* / Rasio uniformitas: rasio antara nilai iluminan minimum dibagi dengan rata-rata iluminan dalam ruang.

b. Deviasi iluminan: deviasi dari nilai iluminan pada titik ukur dalam ruang. Nilai deviasi yang kecil menandakan rapatnya persebaran iluminan.

c. Perimeter ruang: garis keliling ruang eksperimen, dalam penelitian ini distribusi cahaya diukur dari titik ukur dekat jendela (TUU1) menuju titik ukur terdalam ruang (TUU5).
d. Grafik renderasi: grafik yang menunjukkan renderasi distribusi cahaya dalam ruang yang diperoleh dari simulasi *Radiance*.

3.5 Data Penelitian

3.5.1 Jenis data dan Teknik Pengumpulan data

Data penelitian adalah kumpulan fakta yang dikumpulkan dari obyek penelitian untuk diolah dan dianalisis. Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini disusun sesuai dengan variabel penelitian, yang meliputi variabel bebas dan terikat. Jenis data dan teknik pengumpulan data yang digunakan pada penelitian ini dijelaskan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Jenis data dan Teknik Pengumpulan data

Variabel Bebas	**Jenis Data**	**Teknik Pengumpulan Data**
- Model *folding shutter* - Sudut kisi-kisi *shutter* - Konfigurasi operatif - Jarak penempatan	Data sekunder	- Observasi - Studi literatur penerangan alami Studi literatur penelitian terdahulu tentang sistem *shading* dinamis
- Kondisi Langit (*partly cloudy* dan *overcast*) - Posisi matahari (*equinox* dan *summer solstice*)	Data sekunder	- Studi literatur kondisi iklim tropis
Variabel Terikat	**Jenis Data**	**Teknik Pengumpulan Data**
- Iluminan *indoor* - Iluminan *outdoor*	Data primer	- Kondisi eksisting: pengukuran lapangan pada langit *partly cloudy* dan *overcast* dengan Lux meter. - Simulasi dengan program *Radiance*
- *Daylight Factor*	Data primer	- Kondisi eksisting: perhitungan nilai iluminan *indoor* dan *outdoor* dengan Excel. - Simulasi dengan program *Radiance*
- Distribusi Cahaya (iluminan) - Grafik renderasi	Data primer	- Pengukuran perimeter ruang dengan meteran - Simulasi dengan program *Radiance*

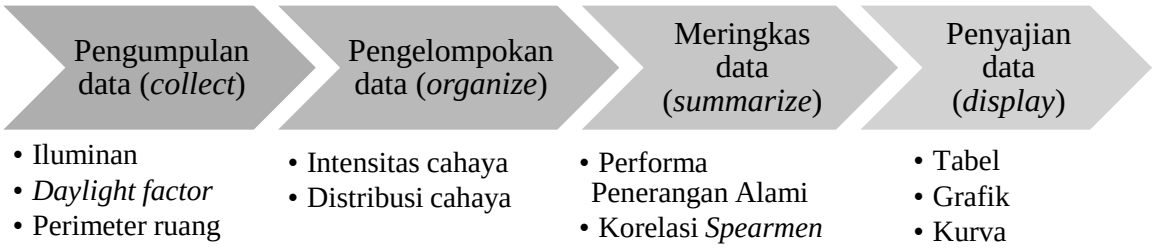
Sumber: Penulis (2020)

Berdasarkan variabel-variabel yang telah dipilih maka jenis data dan teknik pengumpulan data penelitian dijelaskan sebagai berikut:

1. Data Primer: data yang dikumpulkan untuk permasalahan penelitian secara spesifik dengan menggunakan prosedur yang sesuai dengan permasalahan penelitian (Hox dan Boeije, 2005). Data primer untuk penelitian sains dapat diperoleh dengan cara observasi, pengukuran eksperimen dan model komputer, atau dari data arsip (Kruse, 2014). Pada penelitian ini data primer yang dibutuhkan adalah sebagai berikut.
   a) Data Iluminan dan *Daylight factor*
   b) Data Distribusi cahaya
2. Data Sekunder: data yang dibuat oleh peneliti dan dapat digunakan kembali oleh komunitas riset (Hox dan Boeije, 2005). Data sekunder berwujud dokumentasi atau laporan yang dapat diperoleh dari database statistik nasional dan arsip pemerintah (Kruse, 2014). Pada penelitian ini data sekunder yang dibutuhkan adalah sebagai berikut.
   a) Data iklim kota Surabaya (makro)
   b) Studi literatur mengenai penelitian terkait sistem *shading* dinamis
   c) Studi literatur mengenai kondisi iklim tropis
   d) Studi literatur mengenai teori penerangan alami

3.5.2 Analisis Data

Analisis data bertujuan untuk menjawab permasalahan dan mencapai tujuan penelitian, dalam hal ini dilakukan analisis performa penerangan alami dari penerapan *folding shutter* dan analisis korelasi sub-variabel *folding shutter*. Teknik analisis pada penelitian ini menggunakan statistik deskriptif. Statistik adalah ilmu pengumpulan, pengorganisasian, dan interpretasi data yang menggambarkan atau merangkum sesuatu (Bennett, 2014). Statistik deskriptif digunakan untuk mendeskripsikan atau menggambarkan data kuantitatif yang telah terkumpul sebagaimana adanya tanpa bermaksud membuat kesimpulan yang berlaku untuk umum atau generalisasi. Tahapan dari analisis statistik deskriptif dijelaskan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Tahap Analisis Statistik Deskriptif (Penulis 2020)

1) Pengumpulan data (*collect*)

   Pengumpulan data primer yang meliputi rata-rata intensitas dan distribusi cahaya dilakukan dengan cara pengukuran lapangan dan simulasi.

2) Pengelompokan data (*organize*)

   Data primer yang telah dikumpulkan kemudian diolah dan dikelompokkan menjadi beberapa kategori berdasarkan nilai data.

3) Meringkas data (*summarize*)

   Data yang telah dikelompokkan kemudian diringkas / dirangkum, proses meringkas data dilakukan dengan cara menginterpretasi informasi dalam data dan mendiskusikan batasan-batasan yang ada. Pada tahap ini dilakukan analisis performa penerangan alami dan analisis korelasi.

4) Penyajian data (*display*)

   Setelah interpretasi data selesai dilakukan, maka data disajikan dengan menggunakan representasi tabel, grafik atau kurva.

Analisis dilakukan dengan menggunakan data primer dan sekunder. Adapun analisis yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis Performa Penerangan Alami

Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi kecenderungan intensitas dan distribusi cahaya yang dihasilkan dari konfigurasi operatif *folding shutter*. Analisis ini menggunakan distribusi frekuensi untuk mengelompokkan data bersama dengan nilai frekuensi yang sesuai untuk menghasilkan daftar nilai data. Data-data yang diolah dan dikelompokkan adalah sebagai berikut:

a) Intensitas Cahaya : data intensitas cahaya dibedakan menjadi data iluminan dan *daylight factor* (DF) pada waktu pengukuran lapangan dan hasil simulasi.
   - Pengukuran lapangan : data iluminan diolah menjadi grafik kontur, dan hasil perhitungan DF disajikan melalui tabel klasifikasi nilai DF (Tabel 3.4).

- Simulasi: data iluminan dipresentasikan melalui kurva rasio uniformitas dan kurva nilai deviasi. Data DF dipresentasikan melalui kurva rata-rata DF dan kurva persentase titik ukur.

b) Distribusi Cahaya : menunjukkan penurunan nilai iluminan dari sumber cahaya ke dalam ruang. Presentasi data menggunakan kurva distribusi cahaya pada titik ukur utama (TUU1-TUU5) serta garis deviasi iluminan, kurva rasio uniformitas dan grafik renderasi DF.

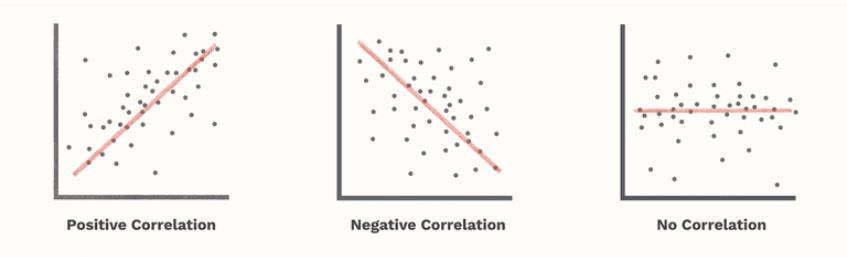
Tabel 3.4 Klasifikasi titik ukur berdasarkan rentang DF

KONDISI LANGIT *PARTLY CLOUDY*						
Waktu	**DF min**	**DF max**	**DF avg**	**Rentang DF**		
				< 2%	**2 – 5%**	**> 5%**
PAGI						
SIANG						
SORE						
KONDISI LANGIT *OVERCAST*						
Waktu	**DF min**	**DF max**	**DF avg**	**Rentang DF**		
				< 2%	**2 – 5%**	**> 5%**
PAGI						
SIANG						
SORE						

Sumber: Penulis (2020)

2. Analisis Korelasi

Analisis korelasi digunakan untuk mencari kuat hubungan dan pengaruh dari dua variabel. Pada penelitian ini analisis korelasi digunakan untuk mencari: 1) hubungan antara hasil pengukuran lapangan dan simulasi, dan 2) pengaruh konfigurasi operatif *folding shutter* terhadap performa penerangan alami. Analisis korelasi pertama dilakukan menggunakan regresi linear, dan kuat lemah hubungan antar variabel diukur dari rentang antara 0 hingga 1. Koefisien korelasi yang bernilai positif memiliki hubungan kedua variabel searah, sedangkan koefisien korelasi negatif membuat hubungan kedua variabel tidak searah. Presentasi data regresi linear menggunakan kurva seperti Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Korelasi dengan regresi linear
Sumber : https://www.thoughtco.com/how-to-calculate-the-correlation-coefficient-3126228

Analisis korelasi *Spearman* digunakan untuk mengidentifikasi kuat hubungan dari sub variabel *folding shutter* terhadap performa penerangan alami yang dihasilkan. Data performa dari penerapan model akan dibandingkan dengan performa tanpa penerapan model (kondisi eksisting). Nilai koefisien yang diperoleh kemudian diinterpretasi dengan menggunakan interpretasi korelasi dari De Vaus (2002), seperti yang yang ditunjukkan pada Tabel 3.5. Rumus dalam menghitung koefisien korelasi *Spearman* adalah sebagai berikut.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)} \tag{3.5.2}$$

$\boldsymbol{\rho}$ = koefisien korelasi *Spearman*

$\boldsymbol{d_i}$ = selisih ranking X dan Y (dimana X = rata-rata iluminan kondisi eksisting, dan Y = rata-rata iluminan dengan penerapan model)

$\boldsymbol{n}$ = jumlah sampel

Tabel 3.5 Interpretasi koefisien korelasi *Spearmen*

Koefisien	Kekuatan Hubungan
0,00	Tidak ada hubungan
0,01 – 0,09	Hubungan kurang berarti
0,10 – 0,29	Hubungan lemah
0,30 – 0,49	Hubungan moderat
0,50 – 0,69	Hubungan kuat
0,70 – 0,89	Hubungan sangat kuat
0,90 – 1,00	Hubungan mendekati sempurna

Sumber: De Vaus (2002)

3.6 Pengumpulan Data Lapangan

Pengumpulan data lapangan pada obyek penelitian Rusunawa Siwalankerto 2 dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu sebagai berikut:

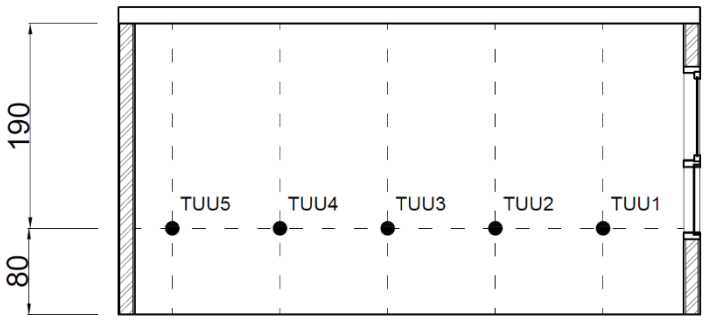
1) Tahap pertama adalah melakukan pengumpulan data kondisi lokasi eksisting, yang meliputi orientasi, layout, dimensi, warna dan reflektivitas ruang.
2) Tahap kedua adalah melakukan pengumpulan data kondisi pada waktu pengukuran, yang meliputi cuaca setempat dan kondisi langit.
3) Tahap ketiga adalah melakukan pengukuran data iluminan pada kondisi *indoor* dan *outdoor* dengan menggunakan Lux meter.
4) Tahap keempat adalah melakukan perhitungan nilai *daylight factor* menggunakan program Excel.

Setelah pengumpulan data lapangan selesai dilakukan, maka tahap selanjutnya adalah melakukan analisis data berdasarkan data primer dan sekunder, yang dilanjutkan dengan proses simulasi untuk menguji model *folding shutter*.

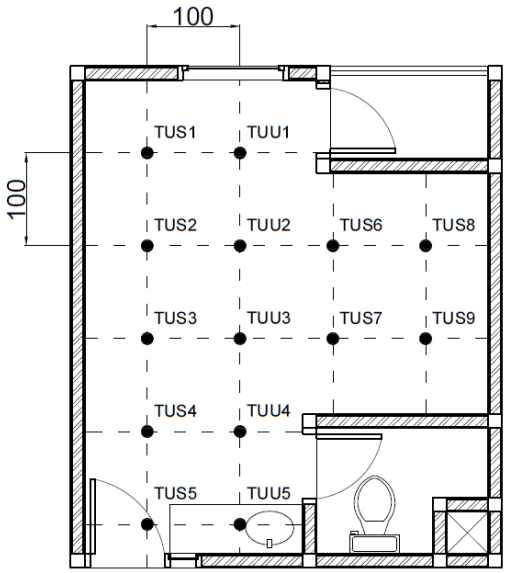
3.6.1 Prosedur Pengukuran Lapangan

Penelitian ini menggunakan teknik pengukuran untuk mendapatkan data performa penerangan alami pada kondisi eksisting, yang meliputi data iluminan (lux) indoor dan outdoor. Prosedur pengukuran lapangan dijelaskan sebagai berikut:

1) Pengukuran dilakukan pada Rusunawa Siwalankerto 2, tepatnya pada unit 501 yang terletak di lantai 5. Pengukuran indoor dilakukan di dalam unit dengan perkecualian untuk ruang tertutup seperti kamar mandi. Sedangkan pengukuran *outdoor* dilakukan di lapangan terbuka di depan rusunawa.
2) Pengukuran dilakukan pada ketinggian 80 cm dari lantai. Titik ukur yang digunakan mengikuti pedoman dari SNI 03-2396-2001, dimana TUU dan TUS berjarak 0,5 meter dari dinding. Pada penelitian ini, digunakan 14 titik ukur dengan jarak tiap titik ukur (TUS/TUU) sebesar 100 cm. Gambar 3.6 dan 3.7 menunjukkan titik ukur pada *layout* dan potongan ruang.



Gambar 3.6 Tampak samping posisi titik pengukuran (Penulis, 2020)



Gambar 3.7 Tampak atas posisi titik pengukuran (Penulis, 2020)

3) Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada dua kondisi langit terlepas dari musim tertentu, yaitu langit *overcast* dan langit *partly cloudy*.
4) Pengukuran dilakukan pada tiga waktu berbeda, yaitu pagi (08.00-09.00), siang (12.00-13.00) dan sore hari (15.00-16.00).

Pengukuran data iluminan pada ruang eksperimen menggunakan bantuan alat ukur, yaitu Lux meter (Gambar 3.8). Lux meter adalah alat yang digunakan untuk mengukur besarnya intensitas cahaya yang terjatuh pada suatu permukaan tempat. Pada penelitian ini, Lux meter digunakan untuk memperoleh data iluminan indoor dan iluminan outdoor. Jenis Lux meter yang digunakan adalah LX1010BS dengan rentang maksimal sebesar 100.000 lux.

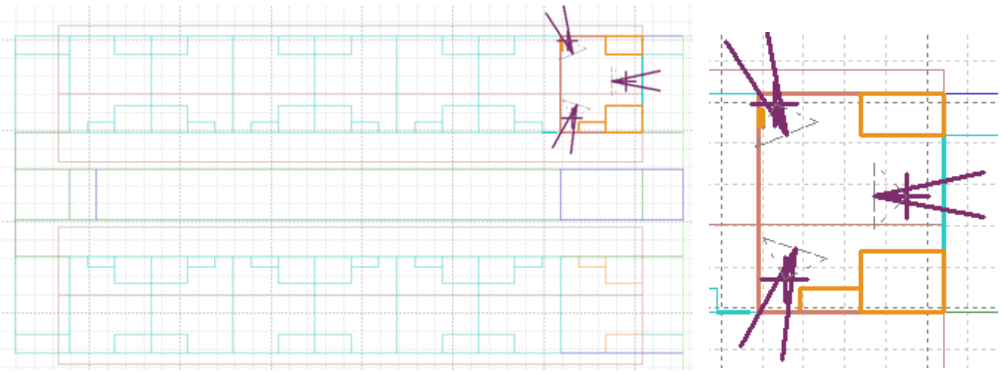
Gambar 3.8 Lux Meter (Penulis, 2020)

3.7 Prosedur Simulasi

Pada penelitian ini, permodelan simulasi dilakukan menggunakan program *Ecotect Analysis 2011* yang dirilis oleh Autodesk. Adapun renderasi simulasi dilakukan menggunakan *Desktop Radiance 1.02* yang dirilis oleh Laboratorium Nasional Lawrence Berkeley di California. *Radiance* dapat melakukan simulasi cahaya dengan menghadirkan antarmuka untuk menerjemahkan geometri ruang, data luminer dan karakteristik material (RADSITE, 2020). Namun, simulasi dengan *Radiance* memiliki keterbatasan yaitu cenderung menghasilkan overestimasi nilai iluminan global dan cahaya langsung (Dubois, 2003). Selain itu, iluminan *outdoor* yang dihasilkan oleh langit CIE berada dibawah 20.000 lux (Lim, 2012), dimana jauh lebih rendah dari kondisi di iklim tropis.

Pada penelitian ini, *Radiance* digunakan untuk menyimulasikan grid kontur iluminan dan *daylight factor*, serta grafik yang menampilkan distribusi cahaya. Prosedur simulasi dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu sebagai berikut:

1) Tahap pertama adalah melakukan input data iklim pada program Ecotect. Data input lokasi adalah Surabaya, Indonesia, dengan *latitude* -7.2° dan longitude 112.7°. Pada *local time zone* digunakan negara Bangkok (+7:00) dan data cuaca (.wea) Kuala Lumpur, Malaysia karena memiliki kondisi iklim tropis.
2) Tahap kedua adalah pembuatan model *folding shutter* dan bangunan rumah susun. Pada tahap ini juga dilakukan penempatan kamera untuk renderasi grafik (Gambar 3.9) serta input material pada elemen bangunan (Tabel 3.6).



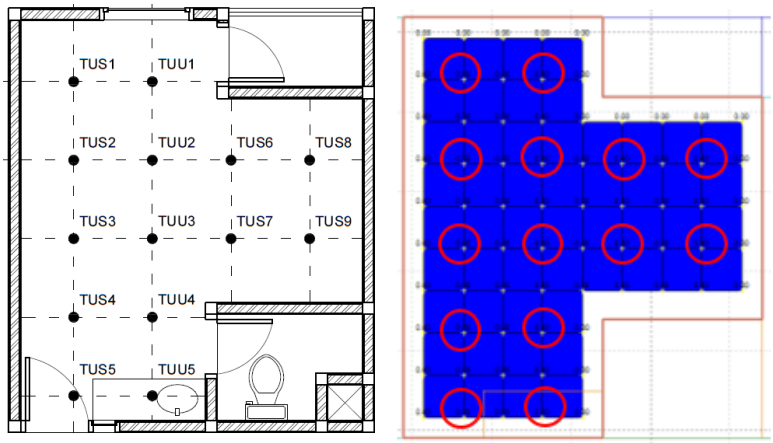
Gambar 3.9 Penempatan kamera pada model simulasi (Penulis, 2020)

Tabel 3.6 Keterangan input material pada program Ecotect

Elemen	Material dan Warna	Deskripsi Material
Plafon	*Suspended concrete ceiling* Warna: Putih	*Reflectivity*: 0,90 *Solar absorption*: 0,18 *Thermal decrement*: 0,32
Dinding Utama	*Brick plaster* Warna: Kuning muda	*Reflectivity*: 0,84 *Solar absorption*: 0,24 *Thermal decrement*: 0,44
Dinding Dapur	*Ceramics tile* Warna: Krem	*Reflectivity*: 0,80 *Solar absorption*: 0,27 *Thermal decrement*: 0,31
Jendela	*Single glazed aluminium frame* Warna: Silver dan transparan	*Reflectivity*: 0,75 *Solar heat gain*: 0,94 *Visible transmittance*: 0,75 *Refractive Index of Glass*: 1,74
Lantai	*Ceramics tile* Warna: Krem	*Reflectivity*: 0,72 *Solar absorption*: 0,34 *Thermal decrement*: 0,31
Pintu	*Timber wood* Warna: Coklat kemerahan	*Reflectivity*: 0,57 *Solar absorption*: 0,64 *Thermal decrement*: 0,98

Sumber: Penulis (2020)

3) Tahap ketiga adalah pembuatan grid analisis. Grid yang digunakan memiliki jumlah sel (x = 9, y =10). Namun titik ukur yang diperhitungkan sebagai data simulasi hanya sebanyak 14 titik (Gambar 3.10), untuk menyesuaikan dengan posisi titik ukur yang digunakan pada pengukuran lapangan.



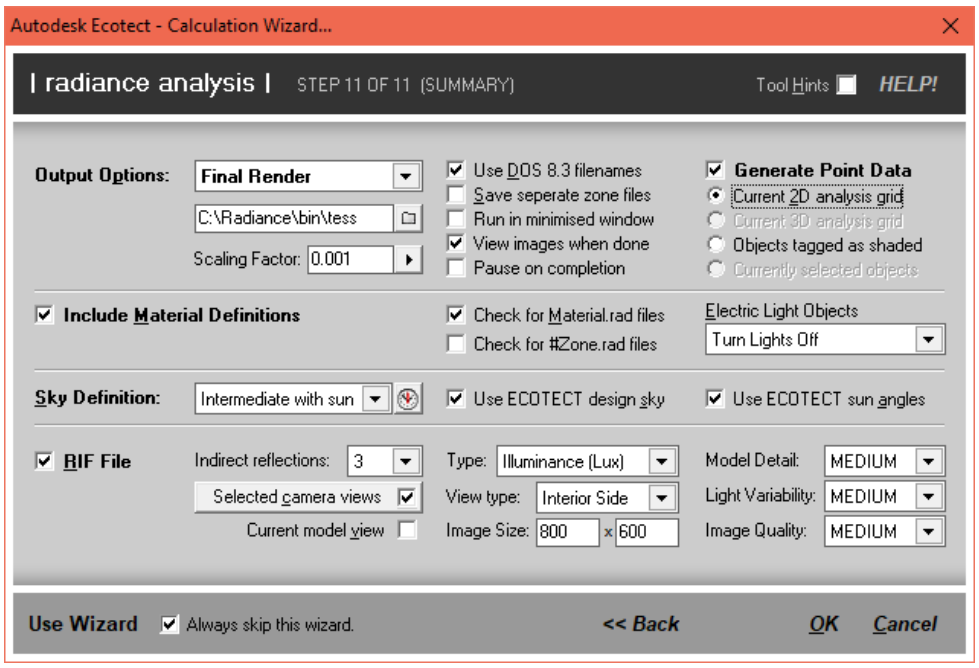
Gambar 3.10 Grid analisis pada pengukuran lapangan dan simulasi

4) Tahap keempat adalah melakukan input data waktu dan tanggal simulasi. Simulasi iluminan disesuaikan dengan pengukuran lapangan, yaitu dilakukan pada waktu *equinox* (21 Maret) di bawah langit *partly cloudy*. Sedangkan

simulasi DF dilakukan pada waktu *summer solstice* (21 Juni) di bawah langit *overcast* sebagai representatif kondisi terburuk.

Simulasi iluminan dilakukan pada waktu pagi (09.00), siang (12.00) dan sore (15.00), sedangkan untuk simulasi DF hanya bisa dilakukan pada waktu siang secara otomatis dari program *Radiance*. Setelah selesai dilakukan input waktu, maka selanjutnya dilakukan simulasi dengan cara mengeksport file menjadi (.rad) untuk dipindahkan ke *Radiance*. Data input simulasi yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.11.

5) Tahap terakhir adalah melakukan pengumpulan data hasil simulasi, yaitu berupa grid kontur iluminan dan DF. Selain itu, dilakukan juga renderasi grafik yang menunjukkan tampak ruang menyerupai kondisi nyata.



Gambar 3.11 Data input untuk simulasi *Radiance* (Penulis, 2020)

3.7.1 Landasan Permodelan *Folding Shutter*

Folding shutter sebagai sistem *shading* dinamis dapat menghasilkan berbagai konfigurasi bentuk dengan menggunakan teknik gerak lipat (*folding*) dan rotasi kisi-kisi *shutter*. Landasan permodelan *folding shutter* (model awal) berasal dari hasil studi literatur dan pengembangan beberapa sistem *shading* dari penelitian terdahulu. Pembahasan lebih lengkap mengenai strategi penerangan alami yang diterapkan pada *folding shutter* ditunjukkan pada sub bab 2.4.5. Terdapat 3 model

folding shutter yang diuji, yaitu FS1, FS2 dan FS3. FS1 adalah pengembangan *folding panel* dari penelitian Kensek (2011) menjadi *folding shutter* yang memiliki permukaan kisi-kisi *shutters*. FS2 adalah pengembangan dari integrasi antara *light shelf* dan *partial blinds* dari penelitian Lim (2012;2013). Dimana *partial blinds* / *shutter* dikembangkan menjadi dapat dilipat kebawah. FS3 adalah kombinasi dari optimasi kedalaman *overhangs* dari penelitian Ossen (2005) dengan *folding shutter* dibawahnya. Pada penelitian ini, *folding shutter* diterapkan pada jendela atas rumah susun. Hal ini bertujuan untuk memaksimalkan fungsi pembayangan pada jendela bagian atas dan menyediakan akses pemandangan melalui jendela bagian bawah.

Hasil dari eksperimen model awal kemudian digunakan sebagai landasan menyusun konsep model akhir. Konsep model yang ingin dicapai harus dapat memenuhi kriteria berdasarkan teori-teori yang berkaitan dengan penerangan alami dan kenyamanan visual, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.7 Kriteria model *folding shutter*

Kriteria	Keterangan
Intensitas cahaya	Dapat memenuhi persyaratan standar untuk bangunan residensial (parameter: iluminan dan *daylight factor*).
Distribusi cahaya	Dapat menghasilkan garis kurva potongan yang landai.
Akses ventilasi	Dapat memberikan akses masuknya angin / ventilasi udara.
Akses pemandangan	Dapat menampilkan pemandangan luar dengan baik.

Sumber: Penulis (2020)

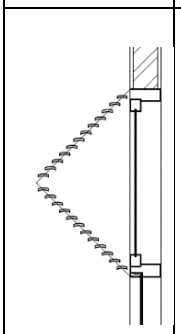
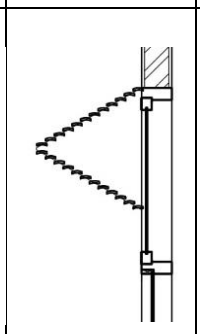
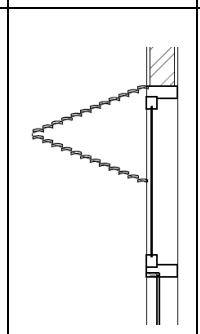
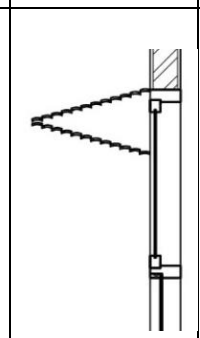
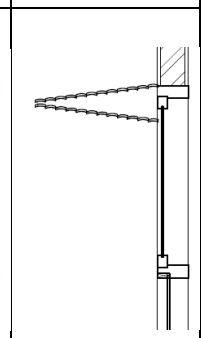
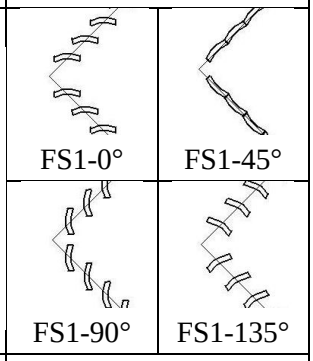
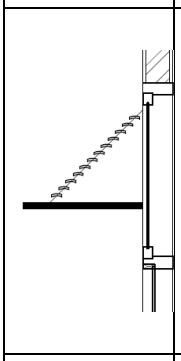
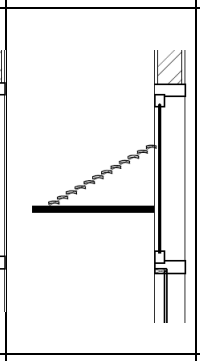
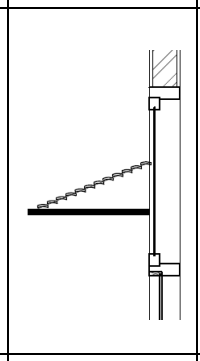
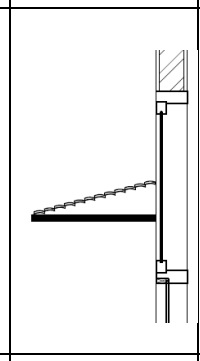
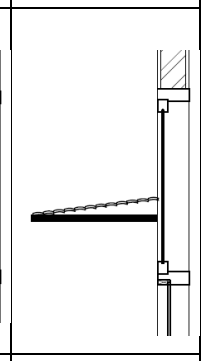
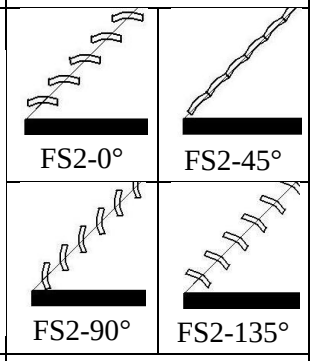
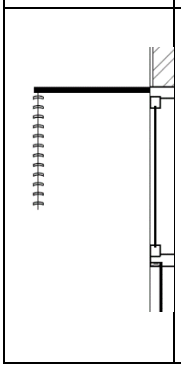
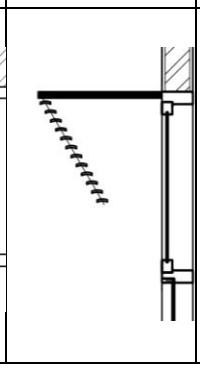
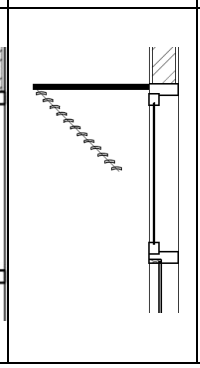
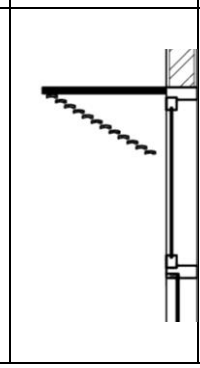
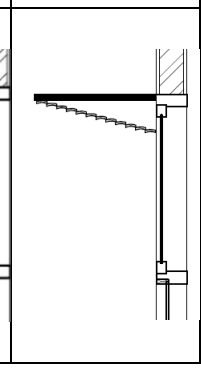
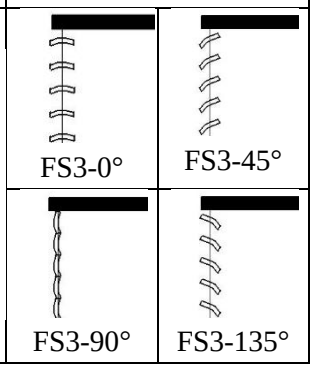
3.7.2 Model Simulasi

Folding shutter yang disimulasikan dibagi berdasarkan jenis model, sudut kisi-kisi *shutter*, konfigurasi operatif, dan jarak penempatan model seperti yang dijelaskan pada sub bab 3.7.1. Ilustrasi model simulasi selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 3.8. Pada tiap dilakukan simulasi sub variabel *folding shutter* (variabel bebas), sub variabel lainnya berperan sebagai variabel kontrol. Hal ini dilakukan untuk menetapkan perlakuan/kondisi yang sama dalam mengidentifikasi pengaruh dari tiap sub variabel. Kondisi yang ditetapkan untuk setiap simulasi sub variabel *folding shutter* akan dijelaskan sebagai berikut:

1) Konfigurasi operatif : pada simulasi sub variabel ini, sudut kisi-kisi *shutter* ditetapkan pada sudut 0° dengan jarak penempatan 0 cm.

2) Sudut kisi-kisi *shutter* : pada simulasi sub variabel ini, konfigurasi operatif ditetapkan pada kondisi tertutup (KO1) dengan jarak penempatan 0 cm.
3) Jarak penempatan model : pada simulasi sub variabel ini, konfigurasi operatif ditetapkan pada kondisi tertutup (KO1) dengan sudut kisi-kisi *shutter* sebesar 0°.

Tabel 3.8. Model Simulasi *Folding Shutter*

MODEL FS – KONFIGURASI OPERATIF					**SUDUT KISI-KISI**	
FS1–KO1	**FS1–KO2**	**FS1–KO3**	**FS1–KO4**	**FS1–KO5**	**FS1**	
					 FS1-0° FS1-45° FS1-90° FS1-135°	
FS2–KO1	**FS2–KO2**	**FS2–KO3**	**FS2–KO4**	**FS2–KO5**	**FS2**	
					 FS2-0° FS2-45° FS2-90° FS2-135°	
FS3–KO1	**FS3–KO2**	**FS3–KO3**	**FS3–KO4**	**FS3–KO5**	**FS3**	
					 FS3-0° FS3-45° FS3-90° FS3-135°	

Sumber: Penulis (2020)

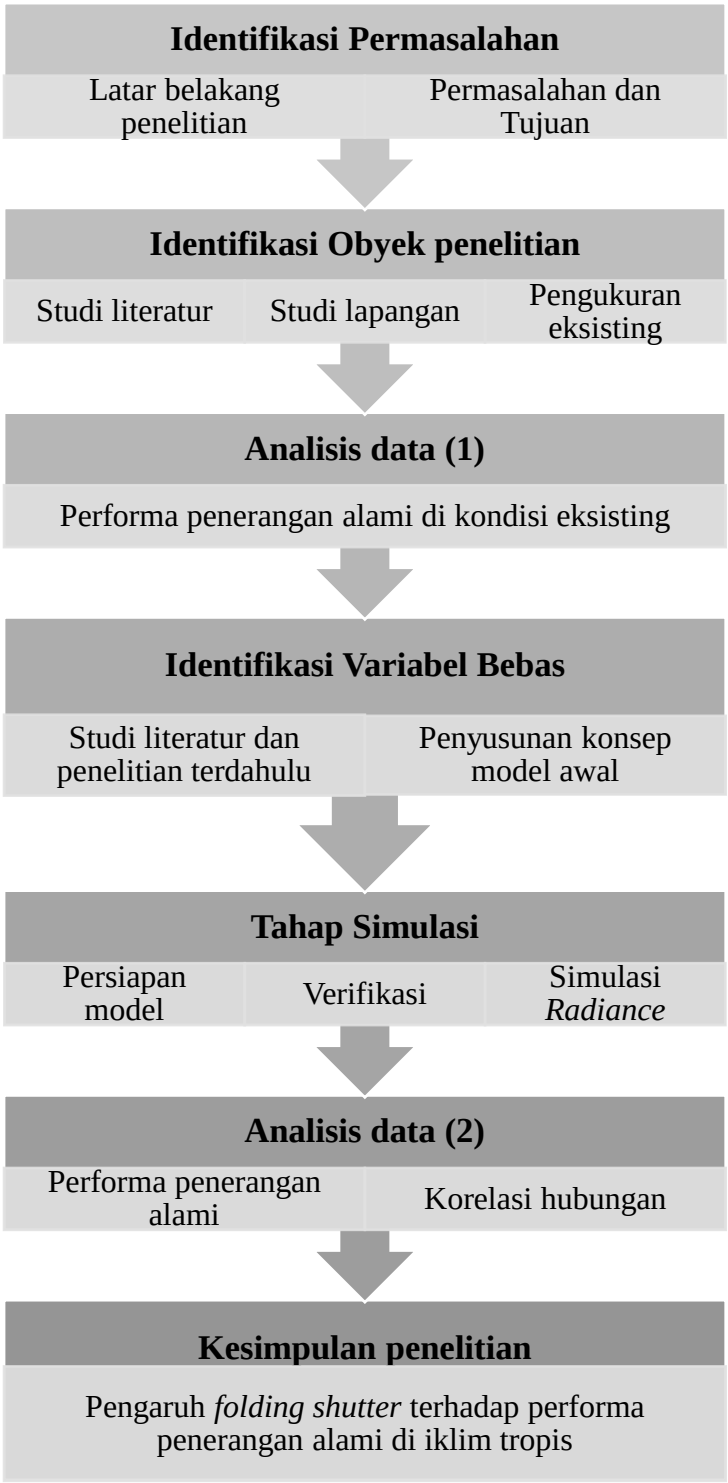
3.8 Tahap Penelitian

Tahap penelitian adalah suatu kerangka yang menjelaskan langkah-langkah yang ditempuh dari latar belakang penelitian hingga mencapai tujuan penelitian. Rencana tahap penelitian dijelaskan pada Tabel 3.9 dan Gambar 3.13.

Tabel 3.9 Rencana Penelitian

Tahap	**Rencana penelitian**	**Jadwal**
Identifikasi Permasalahan	Latar belakang penelitian	- September 2019
	Permasalahan dan tujuan	
Identifikasi Obyek penelitian	Studi literatur	September 2019 – Maret 2020
	Studi lapangan rumah susun	Januari 2020
	Pengukuran eksisting	Februari – Maret 2020
Analisis data (1)	Performa penerangan alami di kondisi eksisting	Februari – Maret 2020
Identifikasi Variabel Bebas	Studi literatur dan jurnal penelitian terdahulu	September 2019 – Maret 2020
	Penyusunan konsep model awal *folding shutter*	Januari – Maret 2020
Tahap Simulasi	Persiapan model simulasi di *Radiance*	Januari – Maret 2020
	Verifikasi simulasi dengan pengukuran lapangan	Maret 2020
	Simulasi dengan *Radiance*	Maret – Mei 2020
Analisis data (2)	Performa penerangan alami	Maret – Juli 2020
	Korelasi hubungan	
Kesimpulan penelitian	Kesimpulan dan saran	Juni – Juli 2020

Sumber: Penulis (2020)



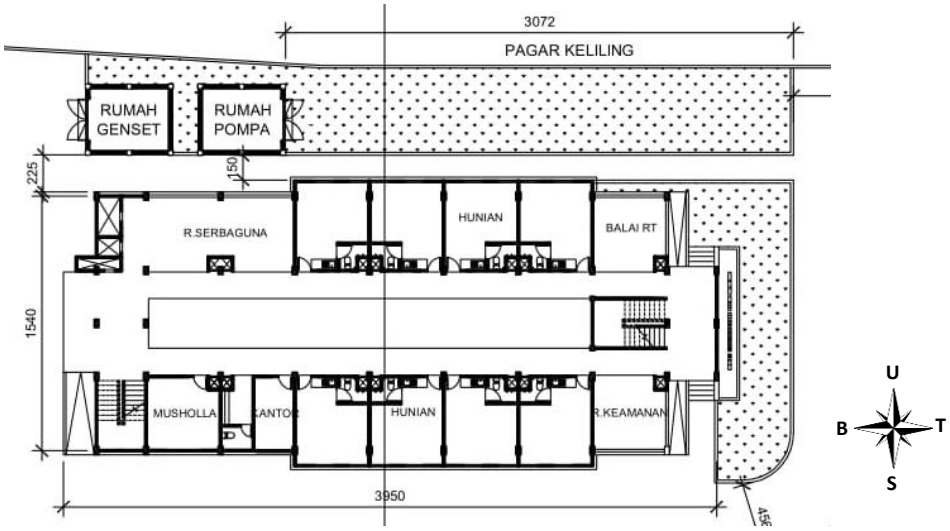
Gambar 3.12 Tahap Penelitian

BAB 4
ANALISIS HASIL PENGUKURAN LAPANGAN

Pada bab ini dilakukan pembahasan hasil pengamatan lapangan yang meliputi deskripsi kondisi eksisting, analisis kondisi iklim, dan analisis performa penerangan alami yang meliputi intensitas cahaya (iluminan dan *daylight factor*) dan distribusi cahaya dalam ruang. Pada bagian akhir merupakan kesimpulan dari analisis hasil pengukuran lapangan.

4.1 Deskripsi Kondisi Eksisting

Bangunan rumah susun yang menjadi obyek penelitian merupakan Rusunawa Siwalankerto 2 yang terletak di kecamatan Siwalankerto, Surabaya. Adapun kota Surabaya memiliki kondisi iklim tropis lembab, yang berada pada koordinat 7,25^{o} S, 112,75^{o} E dan ketinggian 3-6 meter dari permukaan laut. Rumah susun ini berada di area sub-urban, sehingga tidak terdapat banyak bangunan penghalang di sekelilingnya. Rusunawa ini memiliki orientasi yang menghadap ke arah utara dan selatan. Pada sisi utara bangunan terdapat sawah dan kolam pancing taruna, dan pada sisi selatan terdapat jembatan tol layang. Pada sisi barat terdapat bangunan Rusunawa Siwalankerto 1 yang memiliki ketinggian dan dimensi hampir sama dengan bangunan obyek. Pada bagian timur terdapat tempat parkir mobil serta taman bermain mini. Layout keseluruhan bangunan ditunjukkan pada Gambar 4.1.



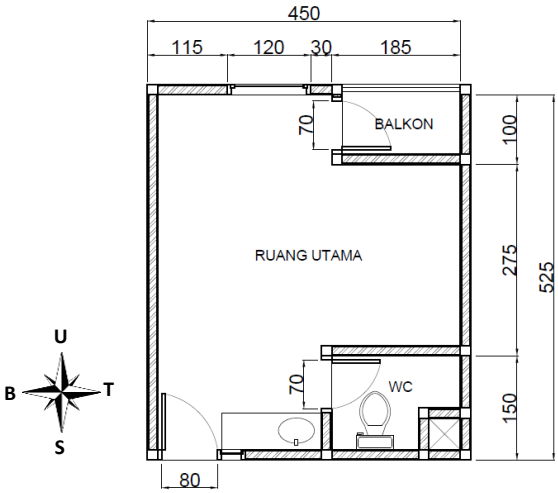
Gambar 4.1 Layout keseluruhan Rusunawa Siwalankerto 2 (Penulis, 2020)

Fasad bangunan Rusunawa Siwalankerto 2 ditunjukkan pada Gambar 4.2. Bangunan Rusunawa Siwalankerto 2 memiliki desain fasad dengan konsep minimalis, dengan adanya aksentuasi berupa *borderline* warna-warni yang membatasi antara tiap unit. *Borderline* memiliki kedalaman sebesar 40 cm yang terletak tepat diatas jendela, sehingga dapat berpengaruh dalam memberikan pembayangan. Balkon tiap unit sejajar dengan fasad terluar bangunan. Lantai 1 berfungsi sebagai fasilitas publik, seperti kantor pengelola, taman, tempat parkir, serta musholla. Sedangkan unit rumah susun berada pada lantai 2 hingga lantai 5.

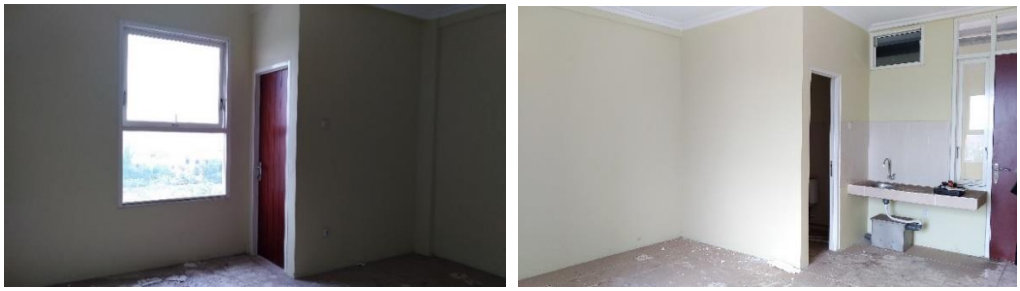
Gambar 4.2 Fasad Rusunawa Siwalankerto 2 (Penulis, 2020)

4.1.1 Tipologi Unit dan Dimensi Ruang

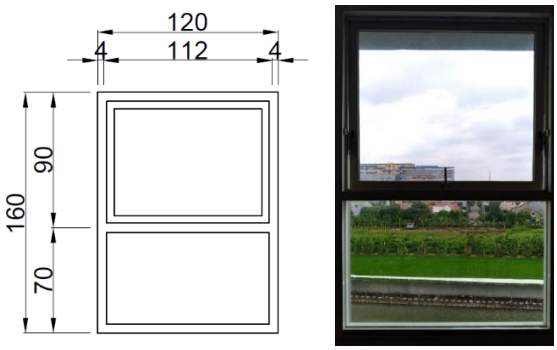
Unit yang dipilih sebagai ruang eksperimen adalah unit 501 yang berada di lantai 5 dan memiliki fasad dan bukaan cahaya yang menghadap ke arah utara. Unit Rusunawa Siwalankerto 2 memiliki dimensi sebesar 4,5 x 5,25 meter, dengan tinggi lantai ke plafon sebesar 2,7 meter. Denah unit 501 dapat dilihat pada Gambar 4.3. Tipe unit di rumah susun ini adalah *open plan*, dimana tidak terdapat partisi yang membatasi antara ruang tidur dan dapur. Di dalam unit tersedia balkon yang dapat diakses melalui pintu dari dalam. Partisi dinding balkon berada di tepat di samping jendela dan memiliki panjang sebesar 1 meter dari fasad bangunan. Foto dokumentasi unit rumah susun dapat dilihat pada Gambar 4.4. Bukaan cahaya / jendela rumah susun memiliki dimensi sebesar 1,6 x 1,2 m, yang dibedakan menjadi jendela hidup (atas) sebesar 0,9 m dan jendela mati (bawah) sebesar 0,7 m. Tipe jendela hidup adalah jendela *casement* yang memiliki kusen aluminium dengan lapisan kaca *single-glazed.* Jendela *casement* dapat dibuka hingga sebesar ±30 cm dan berfungsi sebagai ventilasi udara.



Gambar 4.3 Denah unit 501 (Penulis, 2020)


Gambar 4.4 Foto dokumentasi unit 501 (Penulis, 2020)

Gambar 4.5 juga menampilkan pemandangan yang terlihat dari jendela yang menunjukkan sawah, kolam pancing taruna, serta perkampungan Siwalankerto. Tuaycharoen (2007) menyatakan bahwa pemandangan yang menarik dari jendela dapat mengurangi nilai DGI (*daylight glare index*) hingga beberapa poin. Pemandangan dengan berbagai variasi obyek tersebut dapat berperan sebagai suatu distraksi dari efek silau. Dikarenakan posisi unit berada di lantai tertinggi, maka semakin besar peluang masuknya cahaya langsung melalui jendela. Paparan cahaya langsung dan refleksi dari awan masuk melalui jendela bagian atas karena jendela menampilkan pemandangan langit dengan leluasa (Gambar 4.5).



Gambar 4.5 Bukaan jendela dan pemandangan yang terlihat (Penulis, 2020)

4.1.2 Warna dan Reflektifitas Ruang

Spesifikasi material yang digunakan pada unit rumah susun meliputi warna dan reflektifitas ruang ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Jenis Material pada Unit Rusunawa Siwalankerto 2

Elemen	Jenis Material	Warna dan Reflektivitas
Lantai	Keramik 40x40 cm	Warna: Krem Reflektivitas: 0,7
Dinding	Batu bata finishing plaster	Warna: Kuning muda/lime Reflektivitas: 0,8
Dinding area *sink*	Keramik *semi-matte* 20x40 cm	Warna: Krem Reflektivitas: 0,6
Plafon	Plafon gypsum finishing plaster	Warna: Putih Reflektivitas: 0,9
Pintu	Kayu kamper finishing lapis HPL	Warna: Coklat kemerahan Reflektivitas: 0,5
Jendela	Kaca single glazed frame aluminium	Warna: Transparan Reflektivitas: 0,75

Sumber: Penulis (2020)

Jenis material yang digunakan sebagian besar menggunakan warna-warna cerah seperti putih atau krem, dimana hal ini dapat mempengaruhi tingkat cahaya yang dipantulkan. Bangunan dengan cat putih dapat merefleksikan hingga 70% persen dari cahaya insiden (Lechner, 2015). Hal ini membuat ruang unit rumah susun memiliki potensi yang besar untuk merefleksikan cahaya. Selain pada lantai, material keramik juga terdapat pada dinding area cuci piring (*sink)*. Dikarenakan tipe unit adalah *open plan*, maka segala aktifitas penghuni dilakukan pada ruang yang sama. Pada penelitian ini fungsi ruang difokuskan sebagai ruang serba guna, yaitu yang mencakupi ruang tidur, ruang tengah, ruang makan, serta dapur.

4.2 Analisis Hasil Pengukuran Lapangan

Analisis dari hasil pengukuran lapangan di Rusunawa Siwalankerto 2 dibedakan menjadi analisis kondisi iklim, performa penerangan alami, serta verifikasi hasil pengukuran dengan simulasi program *Radiance*.

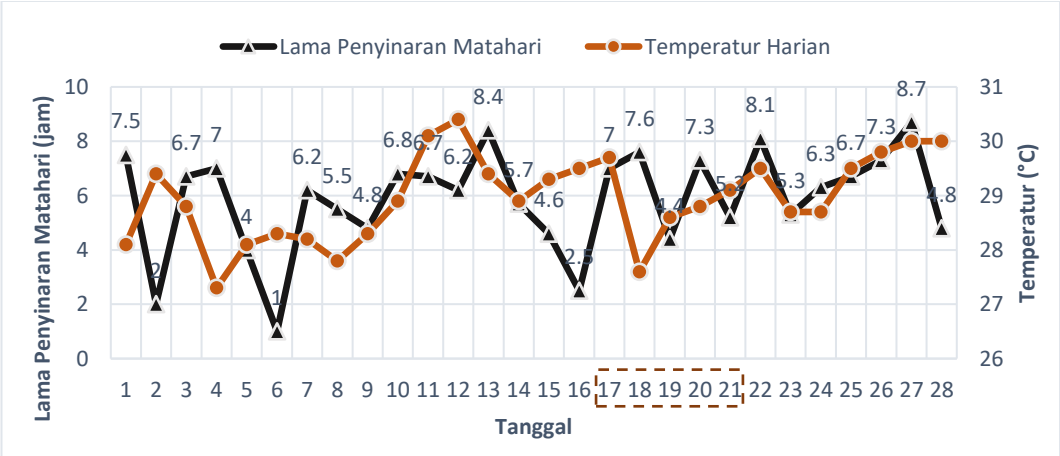
4.2.1 Analisis Kondisi Iklim

Pengukuran lapangan dilakukan pada dua kondisi langit, yaitu *partly cloudy* dan *overcast.* Foto kondisi langit pada saat pengukuran lapangan

ditunjukkan pada Gambar 4.6. Pada saat pengukuran, ditemukan pergerakan awan yang cepat pada langit *partly cloudy* dibandingkan pada langit *overcast*, hal ini sesuai dengan teori Givoni (1998). Pada pengukuran kondisi langit *overcast*, pergerakan awan cenderung konstan dengan cuaca yang cerah dan tidak mendung.

Gambar 4.6 (dari kiri) Langit *partly cloudy* dan *overcast* (Penulis, 2020)

Pengukuran dilakukan pada tanggal 17-21 Maret 2020, dimana pada bulan tersebut posisi matahari menghadap langsung ke garis tengah bumi (*equator*). Dikarenakan Indonesia berada tepat pada garis *equator*, maka pada waktu pengukuran posisi matahari cenderung berada di puncak langit. Data lama penyinaran matahari serta temperatur harian di bulan Maret tahun 2020 dari BMKG ditunjukkan pada Gambar 4.7. Lama penyinaran matahari pada waktu pengukuran cukup tinggi dengan rata-rata 6,3 jam dan temperatur harian yang berkisar antara 28-30 °C. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada bulan Maret, lama penyinaran dan intensitas cahaya matahari cukup besar yang berdampak pada meningkatnya temperatur udara. Selain itu, tingkat iluminan *outdoor* yang tinggi dapat mempengaruhi penerangan alami yang dihasilkan dalam ruang.



Gambar 4.7 Lama Penyinaran Matahari di Bulan Maret 2020 (diolah dari data BMKG Surabaya tahun 2020)

4.2.2 Performa Penerangan Alami di Unit Rumah susun

Analisis performa penerangan alami di unit rumah susun akan dibahas berdasarkan data nilai iluminan dan *daylight factor* (DF). Data tersebut kemudian dibandingkan dengan standar penerangan alami untuk bangunan residensial.

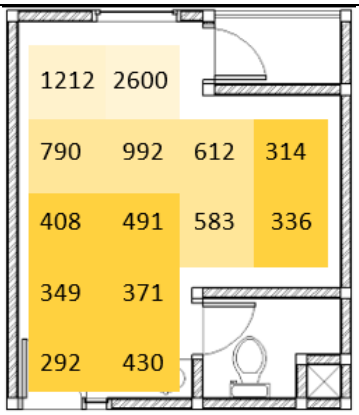
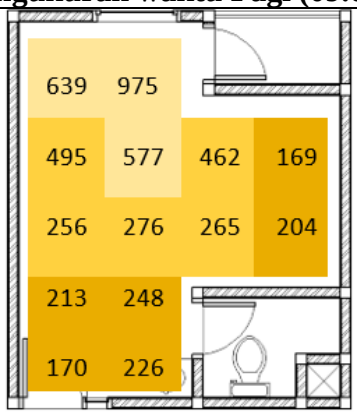
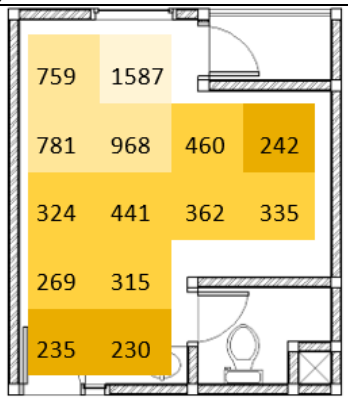
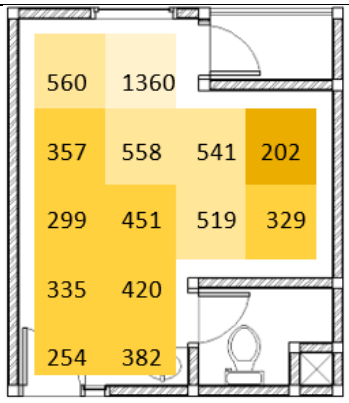
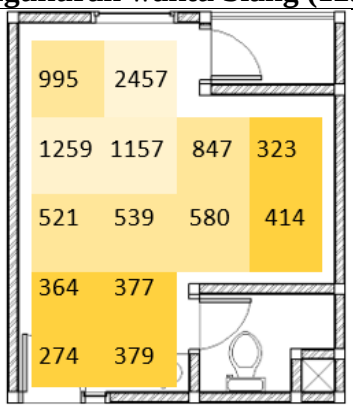
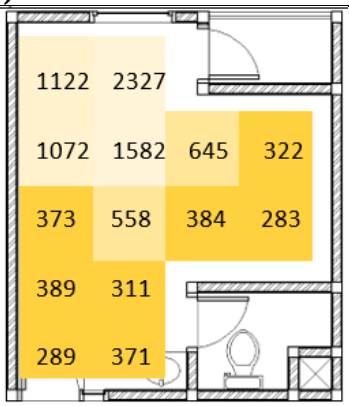
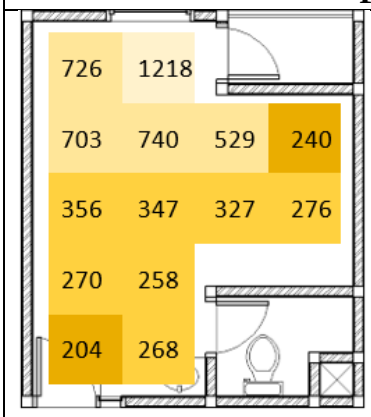
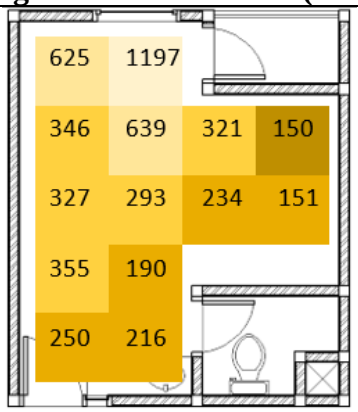
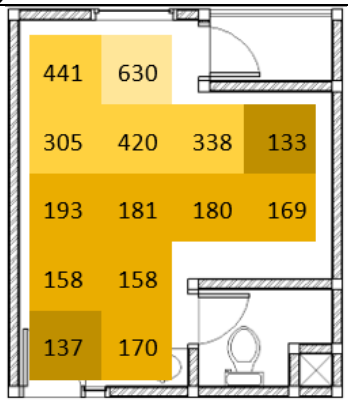
1. Kondisi Langit *Partly Cloudy*

- **Grid nilai Iluminan**

Grid nilai iluminan pada kondisi langit *partly cloudy* ditunjukkan pada Tabel 4.2. Data tiga pengukuran dikelompokkan sesuai dengan waktu pengukuran untuk melihat pola penerangan alami pada waktu tersebut. Pada waktu pagi, hampir seluruh titik ukur memiliki iluminan > 200 lux, dimana telah memenuhi standar SNI untuk rumah tinggal. Namun, nilai iluminan di titik ukur dekat jendela cenderung tinggi, terutama pada pengukuran 1 yang mencapai 2600 lux. Hal ini membuktikan bahwa iklim tropis memperoleh penyinaran matahari yang berlimpah sepanjang hari (Lim, 2012). Rasio uniformitas waktu pagi melebihi standar 0,40, dimana masih cukup rendah namun lebih baik dari waktu lainnya. Hal ini karena posisi matahari di timur menyebabkan paparan cahaya mengenai dinding bagian kiri. Dinding bercat cerah (krem) tersebut memiliki tingkat reflektivitas cukup tinggi yang dapat membantu memantulkan cahaya hingga area terdalam ruang.

Pengukuran waktu siang memiliki rata-rata iluminan tertinggi dari waktu lainnya, yaitu diatas 700 lux. Nilai iluminan pada titik ukur terdalam melebihi standar SNI (> 200 lux), sedangkan pada titik ukur dekat jendela mencapai > 2000 lux. Rasio uniformitas waktu siang cukup rendah (< 0,40) yang menandakan kurang meratanya distribusi cahaya karena adanya kontras cahaya. Hasil pengukuran iluminan *outdoor* (Lampiran 1) menunjukkan angka yang tinggi melebihi 100.000 lux. Hal ini sesuai dengan estimasi dari Zain-Ahmed (2002) bahwa iluminan *outdoor* dapat melebihi 80.000 lux pada waktu siang di bulan Maret, karena pada periode itu iklim tropis memperoleh radiasi matahari tertinggi. Hal ini dapat berdampak pada permasalahan silau yang mengganggu kenyamanan visual jika penerangan tidak dikontrol dengan baik. Oleh sebab itu, diperlukan kontrol cahaya pada area dekat jendela untuk menurunkan intensitas cahaya yang terlalu tinggi.

Tabel 4.2 Hasil pengukuran nilai iluminan pada eksisting (langit *partly cloudy*)

	Pengukuran 1	Pengukuran 2	Pengukuran 3
	Pengukuran waktu Pagi (09.00)		
2000 1000 500 250 100 50	 Rata-rata: 698 lux Uniformity ratio: 0.41	 Rata-rata: 370 lux Uniformity ratio: 0.45	 Rata-rata: 522 lux Uniformity ratio: 0.44
	Pengukuran waktu Siang (12.00)		
2000 1000 500 250 100 50	 Rata-rata: 468 lux Uniformity ratio: 0.43	 Rata-rata: 749 lux Uniformity ratio: 0.36	 Rata-rata: 716 lux Uniformity ratio: 0.40
	Pengukuran waktu Sore (15.00)		
2000 1000 500 250 100 50	 Rata-rata: 461 lux Uniformity ratio: 0.44	 Rata-rata: 378 lux Uniformity ratio: 0.39	 Rata-rata: 258 lux Uniformity ratio: 0.51

Sumber: Penulis (2020)

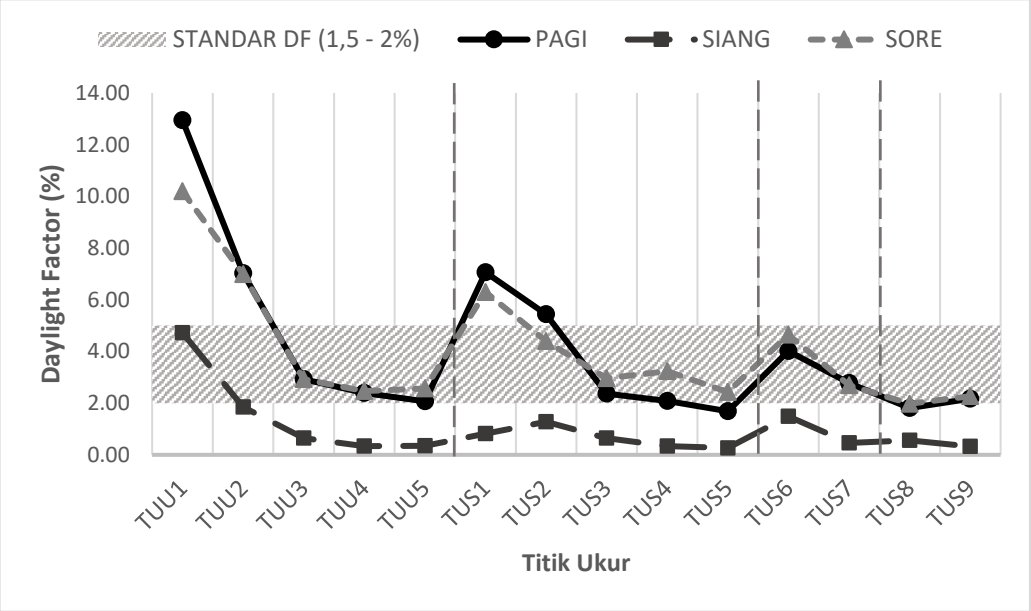
Hasil tiga pengukuran waktu sore menunjukkan rata-rata iluminan paling rendah dari waktu lainnya. Titik ukur terdalam ruang (TUS5 dan TUS8) cenderung memiliki penerangan yang gelap dengan iluminan dibawah 200 lux. Meskipun demikian, nilai iluminan pada titik ukur dekat dengan jendela tidak terlalu tinggi (< 1500 lux), sehingga tidak terdapat kontras iluminan yang tinggi dalam ruang. Hal ini juga ditunjukkan dari rasio uniformitas waktu sore yang paling baik dari waktu lainnya (> 40). Rendahnya iluminan pada TUS5 dan TUS8 dapat disebabkan karena *layout* ruang yang memiliki partisi dinding balkon. Posisi partisi tersebut berdekatan dengan jendela dan menghalangi distribusi cahaya dalam ruang. Selain itu, rata-rata iluminan dari tiga pengukuran menunjukkan nilai iluminan yang tidak konsisten meskipun dilakukan pada kondisi langit yang sama. Hal ini sesuai dengan teori Givoni (1998), bahwa pada langit ini kuat penerangan cahaya bervariasi dari satu area ke area lain dan mengalami perubahan yang cepat.

- **Rata-rata nilai DF dan Distribusi Cahaya**

Grid DF waktu pagi (Lampiran 3) menunjukkan bahwa dari tiga pengukuran, pengukuran 1 dan 3 memiliki penerangan cenderung gelap (< 2%), sedangkan pengukuran 2 cenderung terang (> 3%), meskipun ketiganya sama-sama dilakukan pada waktu pagi. Hal ini membuktikan bahwa langit *partly cloudy* menghasilkan penerangan alami dengan perubahan yang cepat karena adanya pergerakan awan pada tiap detik. Selain itu, garis kurva rata-rata DF waktu pagi menurun dengan tajam seiring kedalaman ruang (Gambar 4.8). Hal ini sesuai dengan penelitian Acosta (2015) bahwa jendela vertikal dapat menghasilkan penurunan DF dari 20% hingga 40%. Penurunan DF yang tajam tersebut dapat menyebabkan kontras cahaya yang dapat mengganggu kenyamanan visual.

Garis kurva rata-rata DF waktu siang (Gambar 4.8) menunjukkan penerangan terburuk dari waktu lainnya, dengan sebagian besar titik ukur memiliki DF < 2%. Nilai DF tersebut terlalu rendah untuk memenuhi kebutuhan penerangan untuk rumah tinggal. Hal ini dapat disebabkan karena posisi matahari pada waktu siang yang berada di puncak langit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Hal tersebut membuat cahaya yang masuk menjadi terdifusi/*skylight*, yang memiliki intensitas lebih rendah dari cahaya langsung/*sunlight* (Al-Obaidi, 2015).

Rendahnya rasio DF juga dapat disebabkan oleh nilai iluminan *outdoor* yang terlalu tinggi hingga melebihi 100.000 lux (Lampiran 1). Dalam hal ini komponen langit adalah salah satu komponen yang sangat mempengaruhi nilai DF (Lechner, 2015).



Gambar 4.8 Rata-rata *daylight factor* pada kondisi langit *partly cloudy*

Grid nilai DF waktu sore (Lampiran 3) menunjukkan bahwa ketiga pengukuran memiliki DF lebih tinggi dari standar DF minimum (>2 %). Hal ini menandakan bahwa pada waktu sore, intensitas cahaya cenderung tinggi dan dapat memenuhi kebutuhan penerangan dalam ruang. Gambar 4.8 menunjukkan bahwa rata-rata DF waktu sore memiliki garis kurva paling landai dibandingkan waktu lainnya. Namun, nilai DF pada area dekat jendela cenderung melebihi standar DF (> 5%), dimana penerangan yang dihasilkan terlalu terang dan dapat mengganggu kenyamanan visual (Baker, 2002). Dengan demikian, masih diperlukan upaya untuk menyeimbangkan nilai DF dalam ruang supaya penerangan yang dihasilkan menjadi lebih merata dan tidak mengganggu kenyamanan visual.

- **Perbandingan dengan Standar DF**

Berdasarkan data yang telah diperoleh, dilakukan klasifikasi titik ukur berdasarkan standar DF untuk iklim tropis seperti yang terdapat di Tabel 2.2. Rentang DF yang digunakan dibedakan menjadi: < 2% = lebih rendah dari standar DF (terlalu gelap), 2 – 5% = memenuhi standar DF untuk rumah tinggal, dan > 5% = melebihi standar DF (terlalu terang).

Klasifikasi nilai DF dari pengukuran kondisi langit *partly cloudy* ditunjukkan pada Tabel 4.3. Pengukuran waktu pagi menghasilkan rentang DF dengan persebaran cukup merata. Sebagian besar DF memenuhi standar dengan persentase rata-rata 45%, namun sebanyak 33% masuk pada kategori terlalu gelap dan 21% terlalu terang. Rentang DF dari 3 pengukuran memiliki kecenderungan yang berbeda, dimana pengukuran 1 cenderung memiliki DF rendah (< 2%), pengukuran 2 lebih banyak memenuhi standar 2-5%, dan pengukuran 3 memiliki persebaran rentang DF yang merata. Perbedaan intensitas cahaya pada tiap pengukuran dapat disebabkan karena pergerakan awan yang cepat. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Lim (2016), bahwa formasi awan pada langit *partly cloudy* dapat berubah dengan cepat dalam jangka waktu detik.

Tabel 4.3 Klasifikasi titik ukur berdasarkan rentang DF (langit *partly cloudy*)

Waktu Pengukuran		**DF min**	**DF max**	**DF avg**	**Jumlah titik ukur dalam Rentang DF**		
					< 2%	**2 – 5%**	**> 5%**
PAGI (09.00)	Pengukuran 1	0.91	4.79	1.81	10	**4**	0
	Pengukuran 2	2.36	11.70	5.00	0	**9**	5
	Pengukuran 3	1.32	22.35	5.34	4	**6**	4
	Rata-rata	1.53	12.95	4.05	33%	**45%**	21%
SIANG (12.00)	Pengukuran 1	0.23	9.78	1.66	11	**2**	1
	Pengukuran 2	0.30	2.24	0.69	13	**1**	0
	Pengukuran 3	0.21	2.15	0.66	13	**1**	0
	Rata-rata	0.25	4.72	1.00	88%	**10%**	2%
SORE (15.00)	Pengukuran 1	1.88	9.69	3.71	1	**9**	4
	Pengukuran 2	1.75	10.50	4.06	2	**9**	3
	Pengukuran 3	2.15	10.38	4.24	0	**10**	4
	Rata-rata	1.93	10.19	4.00	7%	**67%**	26%

Sumber: Penulis (2020)

Waktu siang memiliki penerangan terburuk dengan sebagian besar nilai DF dibawah 2% dengan rata-rata DF paling rendah dari waktu lainnya. Sebagian besar aktifitas pekerjaan rumah dilakukan pada waktu siang, namun hanya sebanyak 1-2 titik ukur yang dapat memenuhi standar DF. Dengan hal ini maka dibutuhkan upaya untuk meningkatkan penerangan alami pada waktu siang. Sedangkan pada waktu sore, sebagian besar titik ukur telah memenuhi standar DF dengan persentase rata-rata 67%. Namun waktu sore cenderung memiliki intensitas cahaya yang tinggi (DF > 5%) karena posisi matahari yang hampir mendekati horizon, hal ini menyebabkan paparan cahaya matahari langsung mengenai fasad.

2. Kondisi Langit *Overcast*

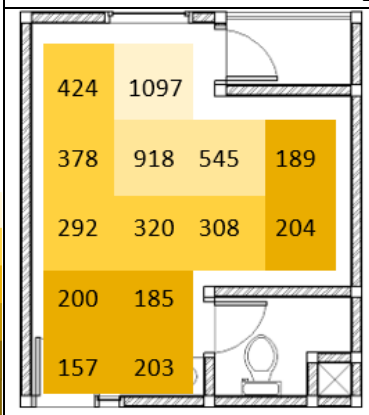
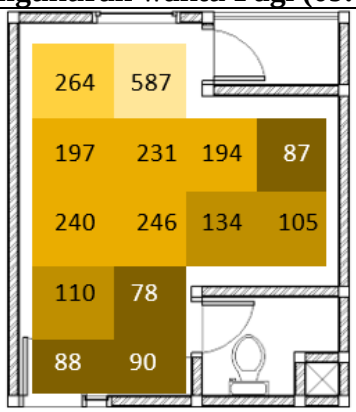
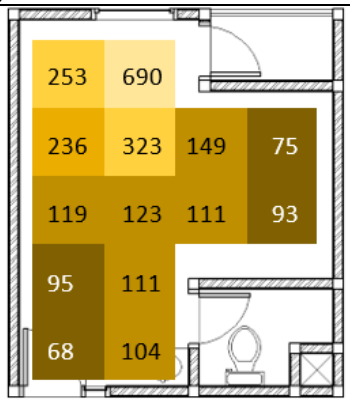
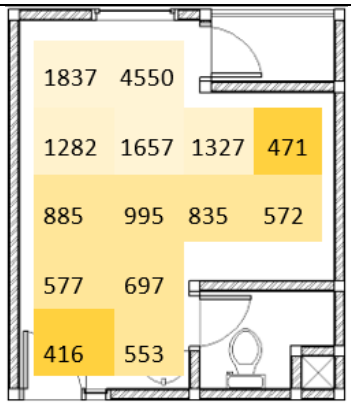
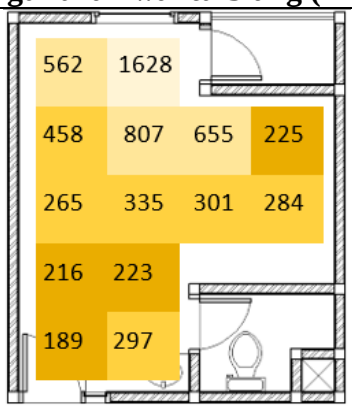
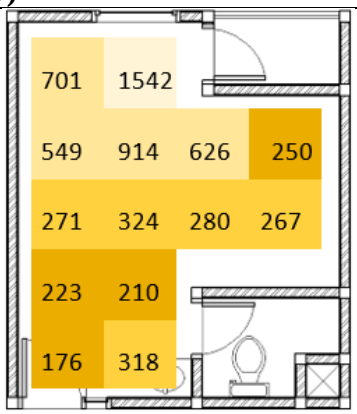
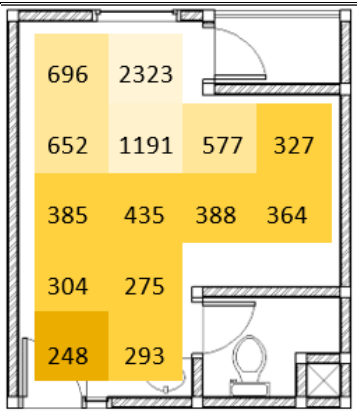
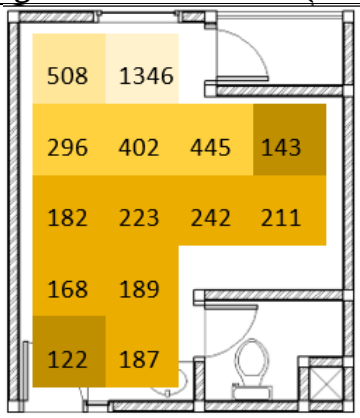
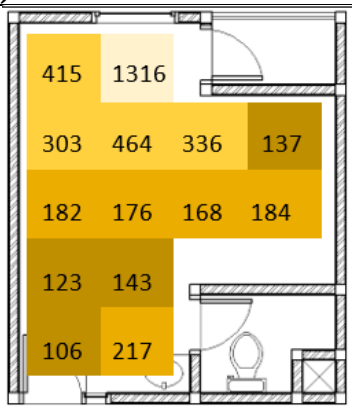
- **Grid nilai Iluminan**

Nilai iluminan pada kondisi langit *overcast* ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Lampiran 2. Pengukuran langit *overcast* menghasilkan nilai iluminan lebih rendah dari standar SNI dibandingkan langit *partly cloudy*. Area terdalam ruang (TUS5, TUU5 dan TUS8) memiliki iluminan < 100 lux yang cenderung gelap. Rata-rata iluminan waktu pagi menunjukkan angka paling rendah dan rasio uniformitas tertinggi dari waktu lainnya (> 0,40). Kondisi ini menandakan penerangan yang cenderung gelap secara merata. Hal ini sesuai dengan teori Lam (1986) bahwa langit *overcast* dapat mengurangi lebih dari 90% cahaya matahari. Selain itu, posisi matahari waktu pagi tidak menghadap langsung ke jendela, maka masih dibutuhkan upaya untuk meningkatkan penerangan alami dalam ruang.

Grid nilai iluminan waktu siang menunjukkan rata-rata iluminan tertinggi dari waktu lainnya, dengan seluruh titik ukur memiliki iluminan diatas standar SNI yaitu > 120 lux. Pengukuran iluminan *outdoor* juga dapat mencapai 100.000 lux (Lampiran 2), hal ini berbeda dengan teori Baker (2002) yang menyatakan bahwa langit *overcast* cenderung menghasilkan iluminan < 20.000 lux. Rasio uniformitas yang dihasilkan juga sangat rendah (< 0,40) yang disebabkan oleh tingginya iluminan di area dekat jendela dibandingkan iluminan di area terdalam ruang. Nilai iluminan yang tinggi dapat disebabkan karena distribusi cahaya pada langit *overcast* tiga kali lebih besar pada bagian puncak/*zenith* dibandingkan pada horizon (Lechner, 2015). Dalam hal ini, posisi matahari di waktu *equinox* yang berada di puncak langit dapat semakin meningkatkan intensitas cahaya pada waktu siang.

Grid nilai iluminan waktu sore menunjukkan penurunan nilai iluminan secara bertahap seiring dengan kedalaman ruang. Rata-rata iluminan cukup mendekati standar SNI yaitu ±300 lux. Namun, titik ukur di area terdalam (TUS5 dan TUS8) cenderung memiliki iluminan dibawah 150 lux, dan rasio uniformitas juga masih menunjukkan persentase yang rendah (< 0,40). Sama seperti waktu pagi, posisi dinding balkon dapat menghambat distribusi cahaya dalam ruang jika posisi matahari berada di timur/barat. Meskipun tidak ditemukan kontras cahaya yang tinggi, namun terdapat potensi terjadinya penerangan yang redup. Oleh sebab itu, masih diperlukan upaya untuk mendistribusikan cahaya dengan merata dalam ruang.

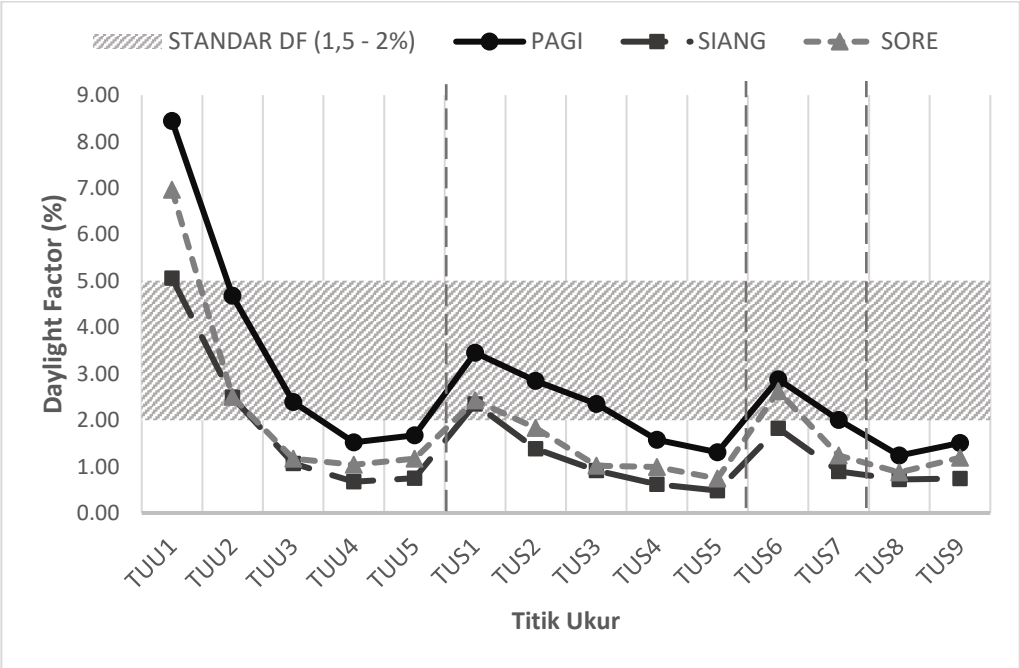
Tabel 4.4 Hasil pengukuran nilai iluminan pada eksisting (langit *overcast*)

	Pengukuran 1	Pengukuran 2	Pengukuran 3
	Pengukuran waktu Pagi (09.00)		
2000 1000 500 250 100 50	 Rata-rata: 387 lux Uniformity ratio: 0.40	 Rata-rata: 189 lux Uniformity ratio: 0.41	 Rata-rata: 182 lux Uniformity ratio: 0.37
	Pengukuran waktu Siang (12.00)		
2000 1000 500 250 100 50	 Rata-rata: 1189 lux Uniformity ratio: 0.34	 Rata-rata: 460 lux Uniformity ratio: 0.41	 Rata-rata: 475 lux Uniformity ratio: 0.37
	Pengukuran waktu Sore (15.00)		
2000 1000 500 250 100 50	 Rata-rata: 604 lux Uniformity ratio: 0.41	 Rata-rata: 333 lux Uniformity ratio: 0.36	 Rata-rata: 305 lux Uniformity ratio: 0.34

Sumber: Penulis (2020)

- **Rata-rata nilai DF dan Distribusi Cahaya**

Grid nilai DF pada kondisi langit *overcast* ditunjukkan pada Lampiran 4. Penelitian terdahulu banyak yang menggunakan pengukuran DF pada langit *overcast* sebagai representatif dari kondisi terburuk penerangan alami (Acosta, 2015; Lim, 2016). Adapun hasil pengukuran menunjukkan adanya penurunan nilai DF secara tajam seiring dengan kedalaman ruang (Gambar 4.9). Titik ukur dekat jendela (TUU1) memiliki DF yang tinggi hingga sebesar 7,53-9,67%, namun nilai DF lebih rendah dari 2% pada titik ukur terdalam. Telah diketahui bahwa langit *overcast* memiliki hingga 95% kubah langit yang ditutupi oleh awan (Lam, 1986). Menurut Ruck (2000), kepadatan awan (*cloud cover*) pada langit dapat membentuk kondisi penerangan yang sangat merata. Namun, hasil pengukuran waktu pagi menunjukkan perbedaan dengan pernyataan Ruck (2000), dimana terdapat kontras cahaya yang tinggi dari TUU1 hingga TUU5. Kontras tersebut dapat berpotensi mengakibatkan permasalahan silau yang mengganggu kenyamanan visual. Oleh sebab itu, diperlukan pembayangan untuk menurunkan intensitas cahaya di dekat jendela supaya dapat seimbang dengan penerangan pada area terdalam ruang.



Gambar 4.9 Rata-rata *daylight factor* pada kondisi langit *overcast*

Grid nilai DF waktu siang (Lampiran 4) menunjukkan bahwa dari tiga pengukuran, mayoritas nilai DF tidak memenuhi standar DF untuk rumah tinggal (< 2%). Titik ukur yang memenuhi standar DF hanya terdapat pada area dekat

jendela, sedangkan untuk area terdalam ruang cenderung memiliki DF yang sangat rendah. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa waktu siang memiliki rata-rata DF paling rendah dari waktu lainnya. Hasil pengukuran iluminan waktu siang cukup tinggi (> 700 lux), dengan ini maka relatifitas standar nilai DF berubah menjadi lebih rendah. Hal ini sesuai dengan teori Baker (2002), bahwa apabila iluminan *outdoor* terlalu tinggi, maka nilai DF yang rendah dapat dianggap cukup untuk ruang. Dalam hal ini, khusus untuk waktu siang nilai DF diatas DF minimum (0,5%) dinilai telah cukup untuk kebutuhan ruang. Meskipun demikian, masih dibutuhkan upaya untuk meratakan nilai DF dalam ruang supaya tidak timbul kontras cahaya dalam ruang.

Grid nilai DF waktu sore (Lampiran 4) menunjukkan pola yang mirip pada tiga pengukuran yaitu terdapat penurunan nilai DF yang sangat tinggi dari TUU1 hingga TUU5. Jika dibandingkan dengan langit *partly cloudy*, penerangan waktu sore pada langit *overcast* cenderung redup, dengan nilai DF dibawah 2%. Nilai iluminan *outdoor* pada waktu sore yang rendah (±15.000 lux) dapat menyebabkan rasio DF dalam ruang juga ikut menurun. Hal ini sesuai dengan teori Lechner (2015) bahwa tingkat iluminan cahaya pada langit ini relatif rendah antara 5,000-20,000 lux. Meskipun demikian, nilai DF pada titik ukur dekat jendela cenderung tinggi (7,85-8,72%), dimana menurut teori Baker (2002) nilai DF diatas 5% masuk kategori terang benderang. Dengan ini maka ditemukan permasalahan serupa dengan hasil pengukuran waktu lainnya, yaitu diperlukan adanya upaya untuk mendistribusikan cahaya lebih merata dalam ruang.

- **Perbandingan dengan Standar DF**

Klasifikasi titik ukur dari hasil pengukuran kondisi langit *overcast* ditunjukkan pada Tabel 4.5. Pada langit *overcast* persentase titik ukur yang memenuhi standar DF lebih rendah dibandingkan pada kondisi langit *partly cloudy*. Selain itu, pada langit ini nilai DF yang diperoleh dari tiga pengukuran cukup konsisten. Waktu pagi memiliki nilai DF yang paling banyak memenuhi standar dengan persentase rata-rata 40% dari waktu lainnya. Hal ini menunjukkan kecenderungan intensitas cahaya yang tinggi pada waktu pagi. Sedangkan untuk waktu sore, sebagian besar nilai DF tidak memenuhi standar dan masuk ke kategori

cenderung gelap (DF < 2%). Kepadatan awan pada langit *overcast* dapat menghambat masuknya cahaya langsung, hal ini sesuai dengan pernyataan Lam (1986) bahwa langit *overcast* dapat mengurangi lebih dari 90% cahaya matahari.

Sama seperti langit *partly cloudy*, pengukuran waktu siang pada langit *overcast* menghasilkan nilai DF di bawah standar DF (< 2%), dengan sebanyak 81% titik ukur masuk kategori penerangan yang redup. Sedangkan persentase titik ukur yang memenuhi standar DF hanya sebesar 17%. Hal ini menandakan bahwa pada langit *overcast*, tingkat penerangan sepanjang hari cenderung redup dan belum memenuhi standar penerangan yang baik untuk rumah tinggal. Selain itu, dari tiga pengukuran ditemukan bahwa langit *overcast* menghasilkan penerangan yang stabil dengan intensitas cahaya relatif rendah. Hal ini menunjukkan kesesuaian dengan teori Baker (2002), bahwa distribusi luminan relatif pada langit *overcast* cenderung konstan dan tidak mudah berubah seiring waktu. Dalam menghadapi kondisi tersebut, diperlukan upaya untuk memasukkan penerangan alami sebanyak-banyaknya dalam ruang supaya cukup seimbang dengan nilai iluminan *outdoor*.

Tabel 4.5 Klasifikasi titik ukur berdasarkan rentang DF (langit *overcast*)

Waktu Pengukuran		**DF min**	**DF max**	**DF avg**	**Jumlah titik ukur dalam Rentang DF**		
					< 2%	**2 – 5%**	**> 5%**
PAGI (09.00)	Pengukuran 1	1.36	8.15	2.99	5	**7**	2
	Pengukuran 2	1.07	7.53	2.51	7	**6**	1
	Pengukuran 3	0.10	9.67	2.62	9	**4**	1
	Rata-rata	0.84	8.45	2.71	50%	**40%**	10%
SIANG (12.00)	Pengukuran 1	0.40	3.80	1.03	13	**1**	0
	Pengukuran 2	0.77	8.85	2.23	9	**4**	1
	Pengukuran 3	0.36	2.53	1.02	12	**2**	0
	Rata-rata	0.51	5.06	1.43	81%	**17%**	2%
SORE (15.00)	Pengukuran 1	0.45	4.31	1.23	12	**2**	0
	Pengukuran 2	0.91	8.72	2.20	10	**3**	1
	Pengukuran 3	0.80	7.85	2.09	10	**3**	1
	Rata-rata	0.72	6.96	1.84	76%	**19%**	5%

Sumber: Penulis (2020)

4.3 Kesimpulan Hasil Pengukuran Lapangan

Kesimpulan dari hasil pengukuran lapangan pada Rusunawa Siwalankerto 2 yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Rusunawa Siwalankerto 2 memiliki tipe unit *open plan* dengan adanya sekat interior (dinding balkon) yang berdekatan dengan bukaan cahaya. Sekat interior tersebut menimbulkan permasalahan distribusi cahaya antara area dekat jendela dan area yang terhalangi sekat.
2. Unit Rusunawa Siwalankerto 2 memiliki bukaan cahaya yang memanjang secara vertikal dan menampilkan pemandangan langit dengan leluasa. Jendela vertikal tersebut menyebabkan terjadinya kontras cahaya yang tinggi dan penurunan nilai iluminan yang tajam dalam ruang.
3. Hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa langit *partly cloudy* lebih sering muncul dibandingkan langit *overcast*. Pada langit *partly cloudy,* pergerakan awan sangat cepat dan dapat menyebabkan perubahan intensitas cahaya secara tidak konsisten. Sedangkan pada langit *overcast,* awan tidak bergerak dengan cepat dan penerangan alami yang dihasilkan lebih stabil.
4. Hasil pengukuran lapangan menunjukkan bahwa pada waktu pagi dan sore terjadi penurunan nilai iluminan cukup tajam yang disebabkan karena posisi matahari yang rendah mendekati horizon. Adapun rata-rata nilai iluminan waktu pagi cenderung lebih rendah dibandingkan waktu sore. Dengan ini maka diperlukan adanya pembayangan dari paparan cahaya matahari langsung dengan tetap memasukkan penerangan alami secukupnya.
5. Pada waktu siang, nilai iluminan *outdoor* sangat tinggi hingga melebihi 100.000 lux, namun iluminan *indoor* cenderung rendah dan menurun dengan tajam karena posisi matahari yang berada di puncak langit. Dengan ini maka diperlukan upaya meningkatkan penerangan alami dalam ruang.
6. Pada langit *partly cloudy*, DF waktu pagi dan sore dapat memenuhi standar DF dengan persentase cukup tinggi yaitu 45% dan 67%. Sedangkan DF waktu siang hanya memiliki 10% titik ukur yang memenuhi standar DF, dan titik ukur lainnya cenderung memiliki DF lebih rendah dari standar DF.
7. Pada langit *overcast,* hanya waktu pagi yang dapat memenuhi standar DF dengan persentase tertinggi (40%), sedangkan waktu siang dan sore hanya memiliki < 20% titik ukur yang memenuhi standar DF.

BAB 5
ANALISIS DAN PEMBAHASAN HASIL SIMULASI

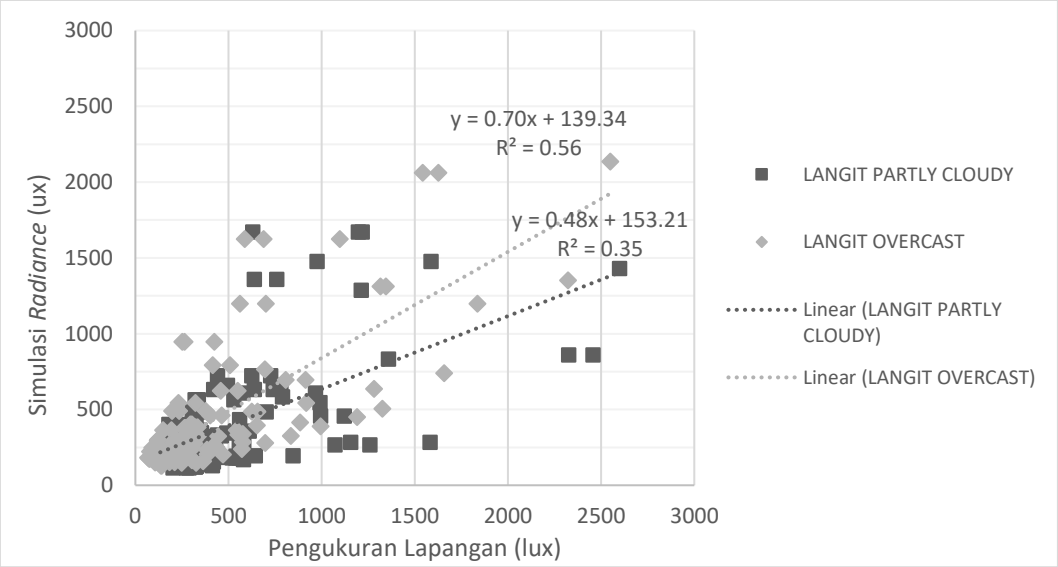
Dalam mengidentifikasi pengaruh dari *folding shutter* terhadap performa penerangan alami pada bangunan rumah susun, maka selanjutnya dilakukan pengujian model *folding shutter* dengan teknik simulasi. Pada bab ini dilakukan pembahasan hasil simulasi dari penerapan *folding shutter* pada obyek penelitian rumah susun. Pembahasan hasil simulasi meliputi verifikasi simulasi dengan pengukuran lapangan, analisis performa penerangan alami dari tiap sub-variabel *folding shutter*, analisis kuat hubungan *folding shutter* terhadap performa penerangan alami, diskusi hasil simulasi dan kesimpulan.

5.1 Verifikasi Hasil Pengukuran dan Simulasi *Radiance*

Hasil pengukuran lapangan berupa data iluminan dan *daylight factor* (DF) yang telah diperoleh kemudian diverifikasi dengan hasil simulasi *Radiance*. Verifikasi dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kecenderungan perbedaan nilai antara hasil pengukuran dan simulasi. Hasil pengukuran iluminan pada langit *partly cloudy* dibandingkan dengan simulasi menggunakan langit CIE *Intermediate sky*. Hal ini dilakukan karena penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa kondisi langit tersebut sesuai untuk simulasi di iklim tropis (Djamila, 2011; Lim, 2012). Sedangkan untuk hasil pengukuran DF pada langit *overcast* dibandingkan dengan simulasi menggunakan langit CIE *Overcast sky*. Simulasi DF dengan menggunakan program *Radiance* hanya bisa dilakukan pada waktu yang sama, yaitu pada 21 Juni pukul 12.00 dibawah kondisi langit *overcast*. Langit *overcast* digunakan karena merupakan representatif dari kondisi terburuk penerangan alami (Acosta, 2015; Lim, 2016). Oleh sebab itu, hasil pengukuran lapangan yang diverifikasi adalah pengukuran yang dilakukan pada waktu siang.

Regresi linear data iluminan ditunjukkan pada Gambar 5.1, adapun data selengkapnya dapat dilihat di Lampiran 5. Hasil regresi linear menunjukkan adanya korelasi positif antara dua variabel. Koefisien determinasi (R^2) pada langit *partly cloudy* dan *overcast* secara berurutan adalah sebesar 0,35 dan 0,56. Langit *overcast* memiliki nilai R^2 lebih mendekati 1, yang menandakan bahwa hasil simulasi lebih

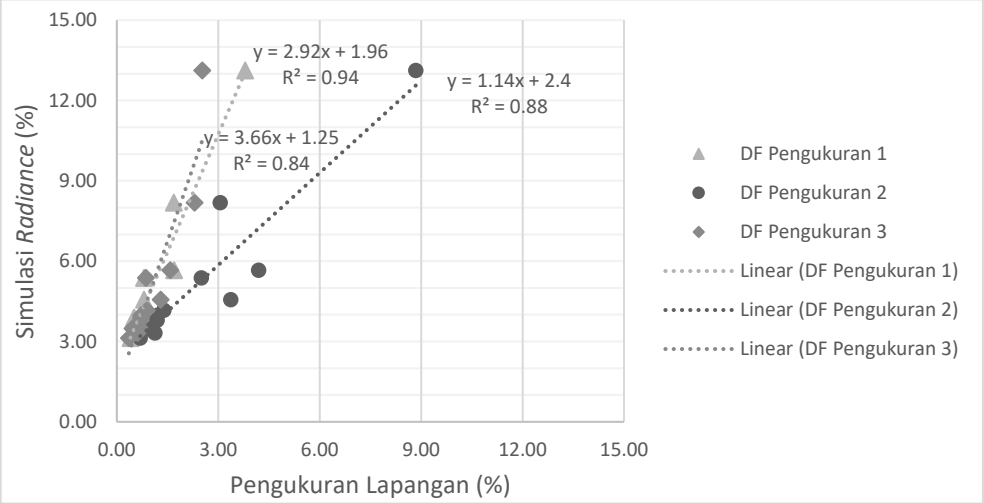
mendekati pengukuran lapangan dibandingkan dengan langit *partly cloudy*. Tingkat akurasi dari hasil pengukuran lapangan dapat mempengaruhi hal tersebut, terutama pada kondisi langit *partly cloudy* yang memiliki formasi awan yang dinamis dan tidak konsisten (Lim, 2016). Di sisi lain, langit *overcast* memiliki awan yang tebal dengan pergerakan yang lambat, hal ini membuat pengukuran lapangan dapat dilakukan pada kondisi lebih stabil dibandingkan langit *partly cloudy*. Dari hasil simulasi dua kondisi langit, nilai iluminan yang dihasilkan dari simulasi cenderung lebih rendah dari pengukuran lapangan. Hal ini sesuai dengan penelitian Lim (2011) bahwa simulasi iklim tropis dengan menggunakan langit CIE dapat menghasilkan estimasi tingkat penerangan yang lebih rendah dari kondisi asli.



Gambar 5.1 Perbandingan nilai iluminan pengukuran lapangan dengan simulasi

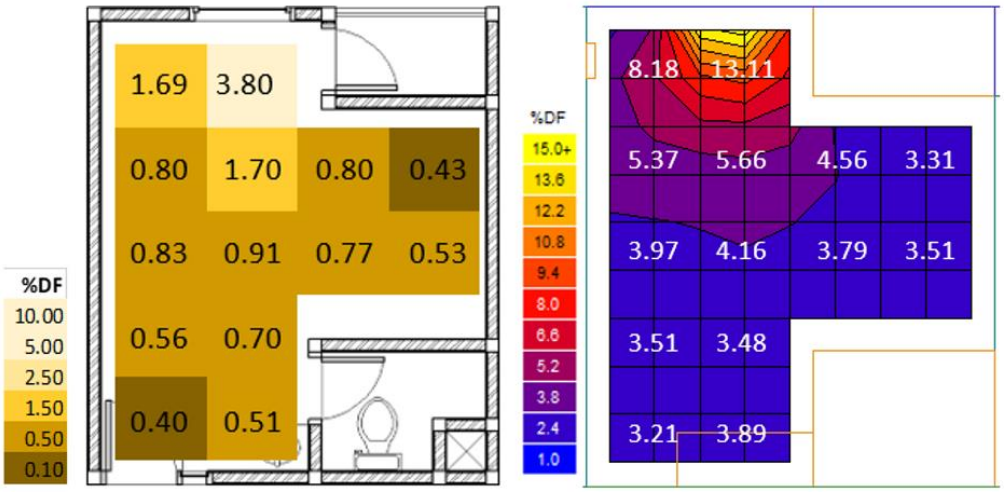
Data DF pengukuran lapangan dan simulasi *Radiance* ditunjukkan pada Gambar 5.2 dan Lampiran 6. Hasil regresi menunjukkan adanya korelasi positif dengan nilai R^2 cukup tinggi, yang menandakan bahwa hasil simulasi memiliki hubungan kuat dengan hasil pengukuran lapangan. Namun, simulasi *Radiance* cenderung menghasilkan nilai DF yang lebih tinggi dari pengukuran lapangan. Hal ini karena *Radiance* secara otomatis menggunakan input waktu 21 Juni untuk simulasi DF, sedangkan pengukuran lapangan dilakukan pada 21 Maret. Hal tersebut sangat mempengaruhi hasil simulasi karena perbedaan posisi matahari. Penelitian Lim (2012) juga menunjukkan bahwa simulasi dengan langit CIE cenderung menghasilkan iluminan *outdoor* dibawah 20.000 lux. Sedangkan

iluminan *outdoor* di iklim tropis dapat melebihi 80.000 lux (Zain-Ahmed, 2002). Penelitian Dubois (2003) juga menunjukkan bahwa program *Radiance* cenderung menghasilkan overestimasi nilai iluminan global dan cahaya langsung (*sunlight*).



Gambar 5.2 Perbandingan nilai DF pengukuran lapangan dengan simulasi

Dari tiga pengukuran lapangan (DF), pengukuran 1 menghasilkan nilai R^2 tertinggi, yaitu sebesar 0,94. Perbandingan antara pengukuran 1 dan hasil simulasi dapat dilihat di Gambar 5.3. Warna kontur menunjukkan kesamaan pola distribusi cahaya, dimana titik ukur dekat jendela memiliki warna kontur yang lebih terang. Sedangkan titik ukur terdalam ruang khususnya area yang tertutup sekat interior memiliki kontur gelap/DF yang rendah. Hal ini membuktikan bahwa program *Radiance* dapat memprediksi pengaruh geometri ruang (Mistrick, 2000) dan dapat menunjukkan pola distribusi cahaya dalam ruang dengan baik.



Gambar 5.3 (dari kiri) Grid DF Pengukuran Lapangan 1 dan Simulasi *Radiance*

Dari hasil verifikasi diperoleh bahwa simulasi kondisi iklim tropis dengan menggunakan program *Radiance* menghasilkan nilai iluminan lebih rendah dari pengukuran lapangan. Sedangkan hasil simulasi nilai DF cenderung lebih tinggi dari pengukuran lapangan. Selisih dan perbedaan nilai tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu seperti pergerakan awan dan perubahan cuaca yang cepat pada saat pengukuran lapangan, input data pada permodelan bangunan, serta keterbatasan program simulasi dalam memproyeksi kondisi nyata di iklim tropis. Meskipun demikian, program *Radiance* dapat dinyatakan valid untuk digunakan karena terbukti menghasilkan korelasi positif dengan pengukuran lapangan.

5.2 Pengaruh *Folding Shutter* terhadap Performa Penerangan Alami

Pada sub bab 4.3 telah dijelaskan mengenai konsep pengembangan model *folding shutter* berdasarkan hasil penelitian terdahulu. Sehubungan dengan itu, sub bab ini membahas mengenai pengaruh dari model *folding shutter* terhadap performa penerangan alami yang dihasilkan.

5.2.1 Iluminan dan Distribusi cahaya

Dari hasil pengamatan kondisi eksisting di bab 4, ditemukan permasalahan distribusi cahaya yaitu penurunan nilai iluminan yang tajam dari TUU1 hingga TUU5. Oleh sebab itu, analisis distribusi cahaya dilakukan pada titik ukur utama (TUU1-TUU5) untuk melihat perubahan nilai iluminan seiring dengan kedalaman ruang. Pembahasan dibedakan berdasarkan sub-variabel dari *folding shutter*, yaitu sudut kisi-kisi *shutter* dan konfigurasi operatif lipatan.

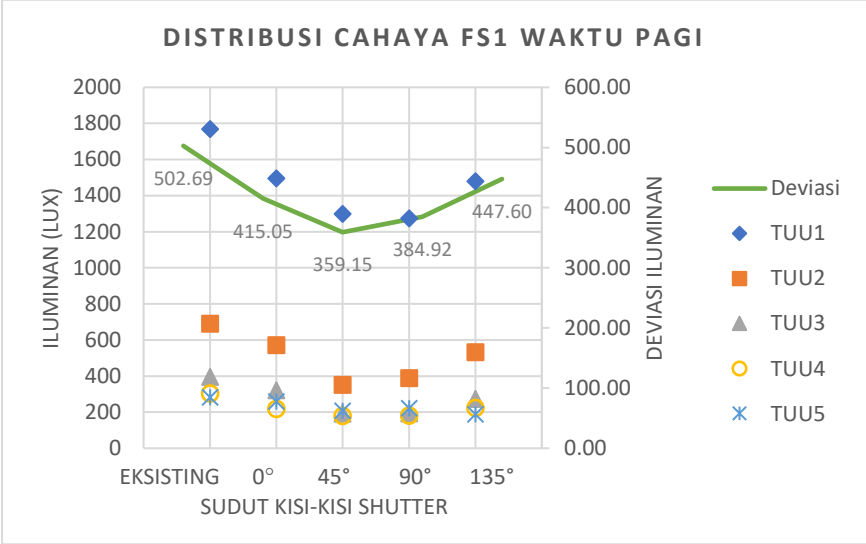
- **Pengaruh sudut kisi-kisi *shutter* terhadap distribusi cahaya**

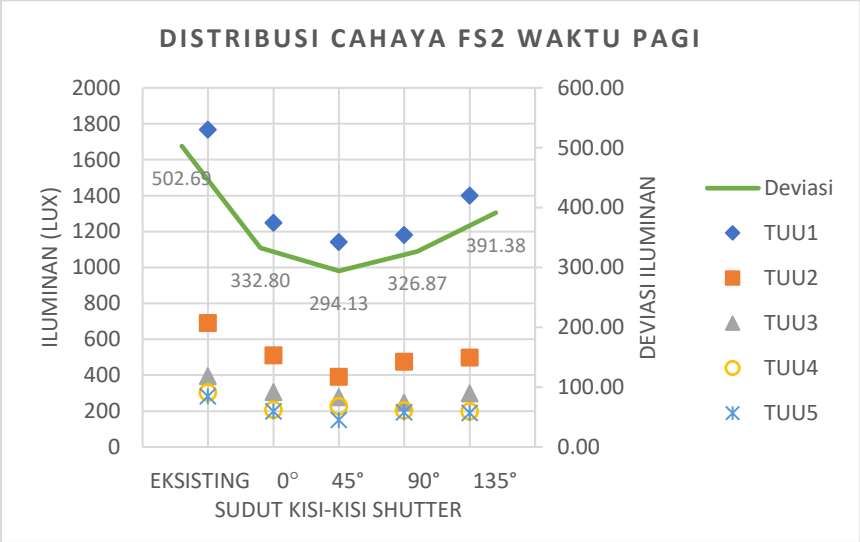
Dalam mengidentifikasi seberapa besar perubahan iluminan pada ruang, dilakukan perhitungan persentase penurunan iluminan pada titik ukur dekat jendela/TUU1 dan peningkatan iluminan pada titik ukur terdalam ruang/TUU5. Hasil simulasi nilai iluminan dan data persentase selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 7 dan 8. Kurva iluminan dari simulasi waktu pagi ditunjukkan pada Gambar 5.4. Pada waktu pagi dimana posisi matahari masih dekat dengan horizon, intensitas cahaya matahari yang masuk ke dalam ruang cenderung tinggi. Dari sudut lainnya, penerapan sudut kisi-kisi 45° dan 90° dapat mengurangi iluminan pada

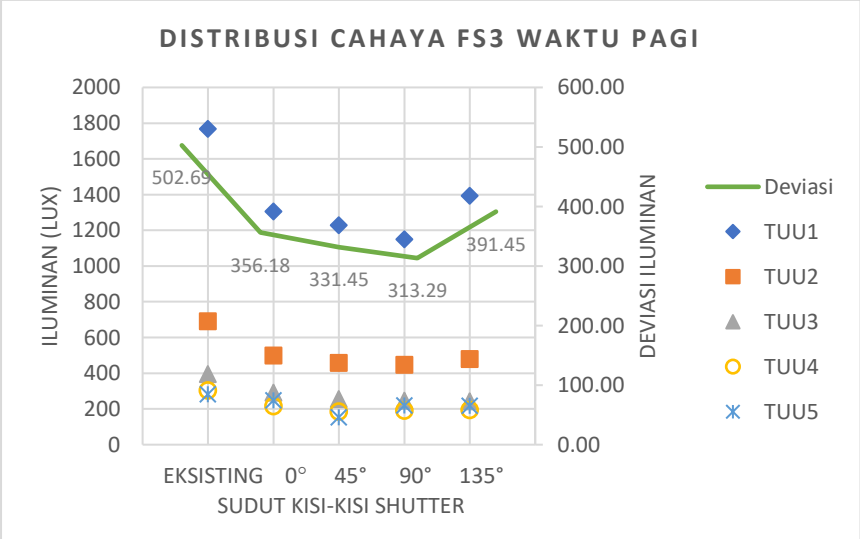
TUU1 paling baik. Hal ini sesuai dengan penelitian Lim (2012) bahwa sudut 45° dapat membantu mengurangi efek silau ketika terpapar cahaya langsung. Sedangkan sudut kisi-kisi 90° dapat menghasilkan pembayangan terbaik pada waktu pagi, karena permukaan kisi-kisi menutupi masuknya cahaya (*direct sunlight*) ketika posisi matahari sejajar dengan fasad. Diantara model lainnya, FS1 menghasilkan pemantulan cahaya paling baik sebesar 22% dengan sudut kisi-kisi 90°. Hal ini menunjukkan bahwa *sloped shutter* dapat membantu meningkatkan iluminan hingga area terdalam ruang seperti hasil penelitian Kim (2010). Namun, FS1 memiliki persentase pembayangan paling rendah dari model lainnya dengan nilai iluminan yang tinggi di TUU1. Hal ini menunjukkan bahwa posisi *shutter* pada bagian atas jendela kurang dapat menahan paparan cahaya langsung di iklim tropis.

FS2 (integrasi *shutter* dan *light shelf*) ditemukan lebih efektif dalam menghasilkan pembayangan dibandingkan pemantulan cahaya pada waktu pagi. Hasil simulasi menunjukkan perbedaan dengan penelitian Lim (2013), karena *light shelf* cenderung menghasilkan penerangan yang redup terutama ketika *shutter* ditutup sepenuhnya (45°) dengan penurunan iluminan hingga -33%. Posisi *sloped shutter* pada FS2 yang berada di atas *light shelf* dapat membantu mendifusikan cahaya sebelum direfleksikan oleh *light shelf.* Dari sudut kisi-kisi lainnya, FS2-0 berfungsi paling baik karena dapat mendifusikan sekaligus memantulkan cahaya. Hal ini membuktikan pernyataan Koo (2010), bahwa posisi dan sudut kisi-kisi *shutter* sangat mempengaruhi performa penerangan alami yang dihasilkan.

FS3 (integrasi *shutter* dan *overhang*) ditemukan dapat menghasilkan distribusi cahaya cukup baik setelah FS1. FS3 lebih berfungsi baik dalam aspek pembayangan dengan persentase penurunan iluminan sebesar 21% hingga 34%. Selain itu, seluruh sudut kisi-kisi FS3 (kecuali FS3-45) dapat meningkatkan iluminan pada area terdalam ruang hingga 15%. FS3 memiliki performa pembayangan yang baik karena cahaya direfleksikan keluar melalui *overhang.* Hal ini membuktikan teori Baker (2002) bahwa *overhang* dapat menurunkan total jumlah lux cahaya yang masuk ke dalam ruang. Diantara sudut kisi-kisi lainnya, FS3 berfungsi lebih baik dengan penerapan sudut kisi-kisi terbuka/semi-terbuka (FS3-0 dan FS3-90), karena dapat memantulkan cahaya sekaligus menahan paparan cahaya langsung yang mengenai fasad.





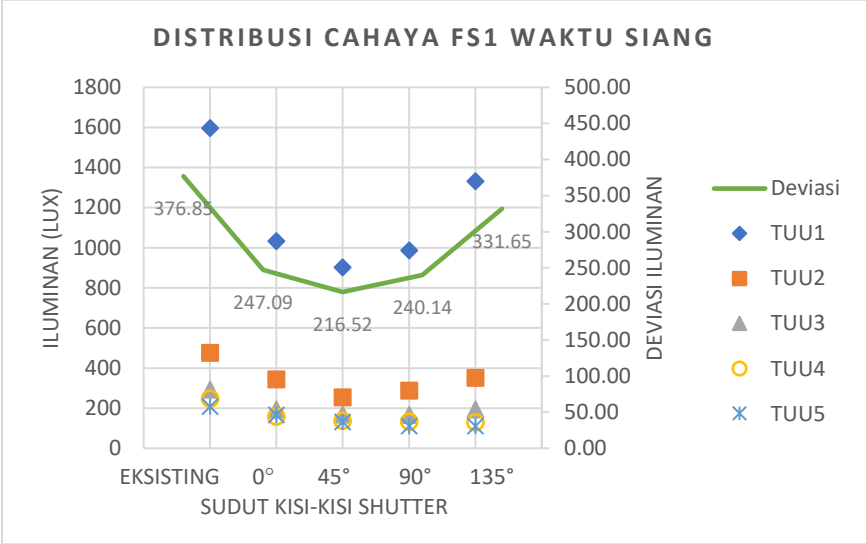


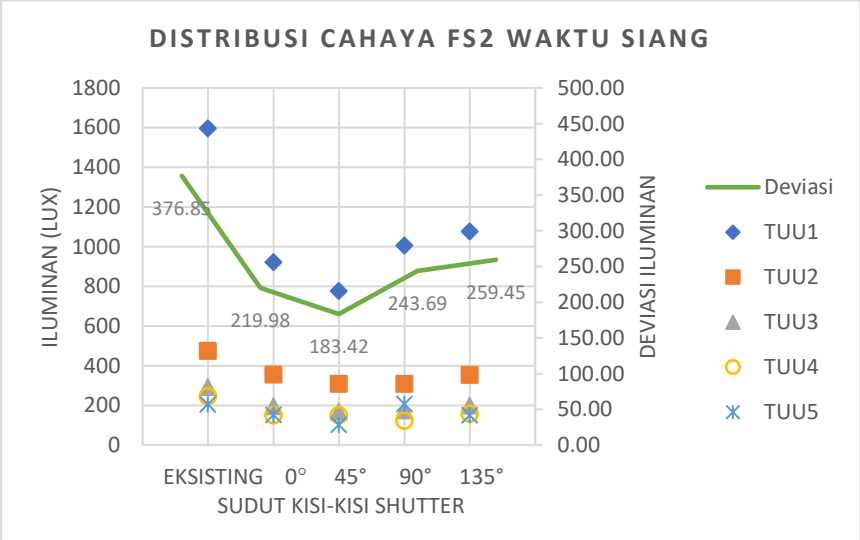
Gambar 5.4 Distribusi cahaya dari sudut kisi-kisi *shutter* (waktu pagi)

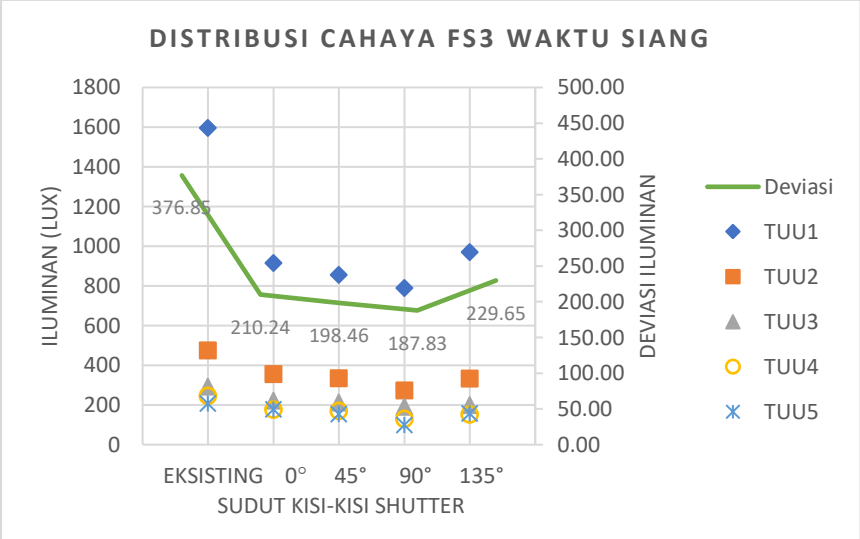
Kurva iluminan dari simulasi waktu siang ditunjukkan pada Gambar 5.5. Pada waktu siang, iluminan *indoor* cenderung lebih rendah dari waktu lainnya karena posisi matahari berada di puncak hampir mendekati *zenith*. Ketiga model *folding shutter* dapat menurunkan iluminan pada TUU1 hingga 500 lux, namun iluminan pada titik terjauh (TUU5) juga menurun hingga 100 lux. Penerapan FS1 masih menghasilkan penurunan iluminan yang tajam seiring kedalaman ruang. Hal ini berbeda dengan hasil penelitian Kim (2010), karena pada waktu siang *sloped shutter* ditemukan kurang dapat memantulkan cahaya dalam ruang dengan baik. Dari sudut lainnya, FS1-0 hanya dapat memantulkan cahaya hingga TUU5 sebesar 4,82%. Sedangkan penerapan sudut kisi-kisi lainnya berdampak pada penerangan cenderung redup dengan penurunan iluminan lebih besar dari 20%.

Di sisi lain, performa dari FS2 dapat berubah drastis jika diterapkan sudut kisi-kisi berbeda. FS2-90 dapat meningkatkan iluminan tertinggi dengan persentase 40%, karena paparan cahaya matahari dapat langsung mengenai bidang *light shelf*. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi *light shelf* dan *shutter* dapat bekerja dengan efektif pada waktu siang. Posisi *shutter* yang menghadap depan juga membantu menahan paparan refleksi cahaya dari awan. Namun, *shutter* yang tertutup (FS2-45) cenderung menghasilkan penerangan gelap karena iluminan menurun hingga -45% seiring kedalaman ruang. Dengan ini maka kontrol kisi-kisi *shutter* sangat penting dalam integrasinya dengan *light shelf*, seperti yang dikemukakan oleh Lim (2013).

FS3 yang merupakan integrasi *overhang* dan *shutter* ditemukan dapat menurunkan iluminan paling baik dari model lainnya. Terutama pada waktu siang, *overhang* dapat memberikan pembayangan paling baik dari paparan cahaya dari atas. Dari model lainnya, FS3 memiliki deviasi paling rendah yang berarti persebaran nilai iluminan lebih rapat dari model lainnya. Penerapan sudut kisi-kisi 0° dan 45° menghasilkan performa yang seimbang antara pembayangan dan pemantulan. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu oleh Carletti (2016) bahwa sudut 0° dan 45° dapat menghasilkan iluminan *indoor* yang paling menyeluruh. Namun, *shutter* yang ditutup sepenuhnya (FS3-90) menghasilkan penurunan iluminan hingga -32%. Oleh sebab itu, penerapan kisi-kisi *shutter* terbuka (FS3-0) lebih direkomendasikan untuk waktu siang khususnya pada saat *equinox*.





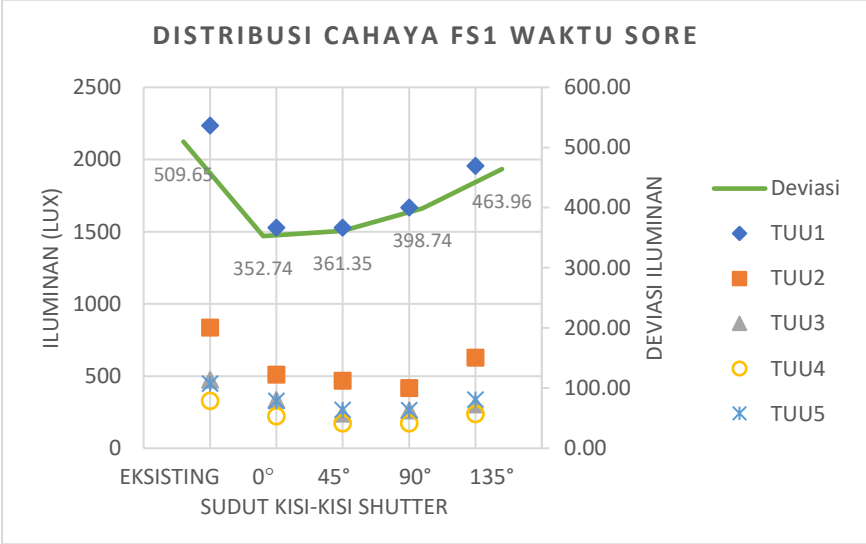


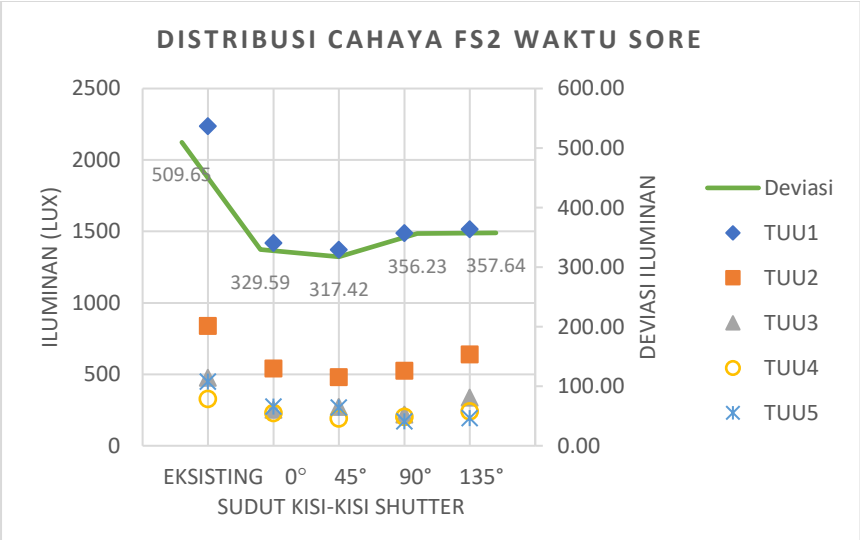
Gambar 5.5 Distribusi cahaya dari sudut kisi-kisi *shutter* (waktu siang)

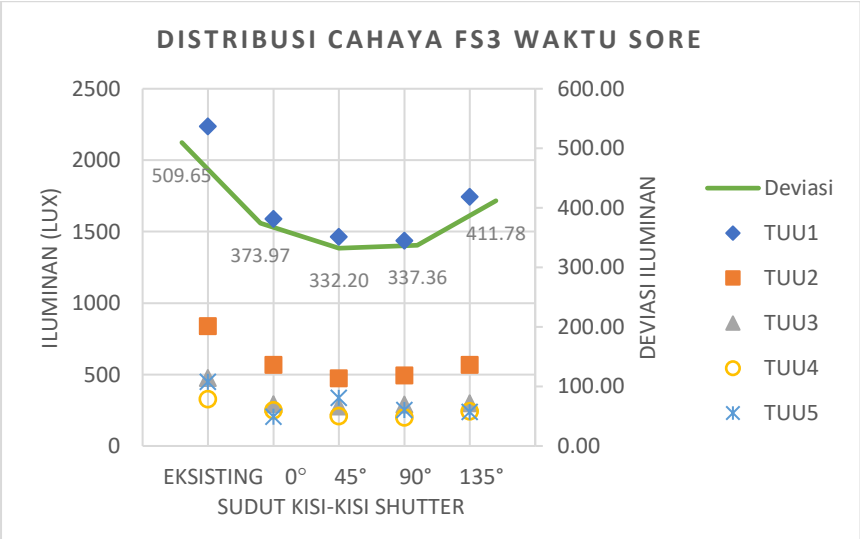
Kurva iluminan dari simulasi waktu sore ditunjukkan pada Gambar 5.6. Sama seperti waktu pagi, posisi matahari waktu sore juga hampir mendekati horizon dengan sudut *altitude* yang rendah. Kondisi eksisting memiliki rata-rata iluminan di area dekat jendela (TUU1) yang tinggi sebesar 2235 lux. Dari hasil simulasi, hampir seluruh model dapat menurunkan intensitas cahaya di dekat jendela (TUU1). Namun, FS1 yang memiliki kisi-kisi *shutter* paling banyak justru menghasilkan iluminan tertinggi di TUU1 dibandingkan model lainnya. Hal ini berbeda dengan pernyataan Koo (2010) karena kisi-kisi *shutter* ditemukan kurang efektif untuk menahan paparan cahaya langsung ketika posisi matahari dekat dengan horizon. Meskipun demikian, FS1 dapat mendistribusikan cahaya hingga TUU5 dengan baik karena seluruh sudut kisi-kisi dapat memantulkan cahaya > 30%.

Penerapan FS2 pada waktu sore menghasilkan pembayangan terbaik dari model lainnya. Secara keseluruhan, FS2 memiliki deviasi iluminan paling rendah yang berarti iluminan pada tiap titik ukur tidak memiliki selisih yang besar. Dari sudut lainnya, FS2-45 menghasilkan distribusi cahaya paling merata, karena dapat membantu menurunkan intensitas cahaya di TUU1 (> 30%) serta tidak menghasilkan penurunan iluminan yang tajam. Penerapan sudut kisi-kisi 45° pada FS3 juga menghasilkan distribusi cahaya paling merata dengan deviasi iluminan terendah. Hal ini memperkuat hasil penelitian terdahulu bahwa sudut kisi-kisi 45° dapat menurunkan kontras luminan Lim (2012) serta menurunkan iluminan maksimum paling baik untuk bangunan residensial (Carletti, 2016).

Diantara sudut kisi-kisi lainnya, penerapan sudut 0° pada seluruh model dapat menghasilkan pemantulan cahaya paling baik. Hal ini sesuai dengan pernyataan Lim (2012;2013) bahwa sudut 0° pada *shutter* dapat menghasilkan nilai iluminan yang tinggi. Namun untuk mencegah terjadinya efek silau pada waktu sore, diperlukan upaya untuk mendifusikan cahaya yang masuk. Penerapan sudut 45° bekerja dengan baik dalam menurunkan intensitas cahaya sekaligus memantulkan cahaya hingga TUU5. Sedangkan penerapan sudut kisi-kisi 135° menghasilkan distribusi cahaya terburuk dengan deviasi iluminan tertinggi dari sudut lainnya. Sudut kisi-kisi 135° memiliki kemiringan sudut yang hampir sejajar dengan sudut *altitude* di tropis, hal ini dapat menyebabkan arah pantulan cahaya terlalu rendah dan tidak dapat mencapai area terdalam ruang dengan baik.







Gambar 5.6 Distribusi cahaya dari sudut kisi-kisi *shutter* (waktu sore)

Analisis distribusi selanjutnya dilakukan menggunakan parameter rasio uniformitas (iluminan minimum / rata-rata iluminan). Rasio uniformitas yang tinggi menandakan distribusi cahaya yang lebih baik (Dubois, 2001). Hasil perhitungan rasio uniformitas dari tiap sudut kisi-kisi *shutter* ditunjukkan pada Gambar 5.7. Pada waktu pagi, sudut kisi-kisi 0° dan 45° menghasilkan rasio uniformitas tertinggi dibandingkan sudut lainnya. Hal ini sesuai dengan pernyataan Carletti (2016) bahwa sudut kisi-kisi 0° dan 45° dapat menghasilkan iluminan *indoor* yang menyeluruh untuk bangunan residensial. Pada waktu siang, tiap model menghasilkan kecenderungan performa yang berbeda satu sama lain. FS1 menghasilkan performa paling baik jika *shutter* dibuka sebagian (FS1-90), sedangkan FS3 berfungsi lebih baik dengan *shutter* terbuka (FS3-0). Hal ini karena elemen *overhang* pada FS3 berfungsi baik dalam pembayangan, sehingga *shutter* yang tertutup dapat semakin menghalangi masuknya cahaya. FS2 menghasilkan rasio uniformitas yang konstan antara 39-40% meskipun diterapkan sudut kisi-kisi berbeda. Hal ini menandakan bahwa penerapan sudut kisi-kisi *shutter* yang berbeda pada FS2 tidak terlalu mempengaruhi performa penerangan yang dihasilkan.

Gambar 5.7 Rasio uniformitas dari sudut kisi-kisi FS1, FS2 dan FS3

Sama seperti waktu pagi, penerapan sudut kisi-kisi 0° dan 45° dapat menghasilkan rasio uniformitas tertinggi pada waktu sore. Ditemukan bahwa rasio uniformitas pada FS1 semakin meningkat jika *shutter* dibuka (FS1-0), sedangkan pada FS2 lebih meningkat jika *shutter* ditutup sepenuhnya (FS2-45). Penerapan sudut kisi-kisi 45° pada FS3 juga menghasilkan rasio uniformitas tertinggi secara konsisten pada tiga waktu berbeda. Dari hasil simulasi, sudut kisi-kisi 45° menghasilkan rata-rata iluminan paling rendah dari lainnya. Dengan ini maka sudut yang menghasilkan performa pembayangan terbaik dapat berfungsi dengan efektif pada saat *equinox*. Di sisi lain, penerapan sudut kisi-kisi 135° pada ketiga model menghasilkan distribusi cahaya terburuk dengan rasio uniformitas terendah pada waktu sore. Seperti yang disebutkan sebelumnya, sudut kisi-kisi 135° memiliki sudut kemiringan yang hampir sejajar dengan sudut *altitude* matahari pada waktu *equinox*. Hal ini menyebabkan kontrol cahaya oleh kisi-kisi berkurang dan masih menghasilkan adanya kontras cahaya dalam ruang.

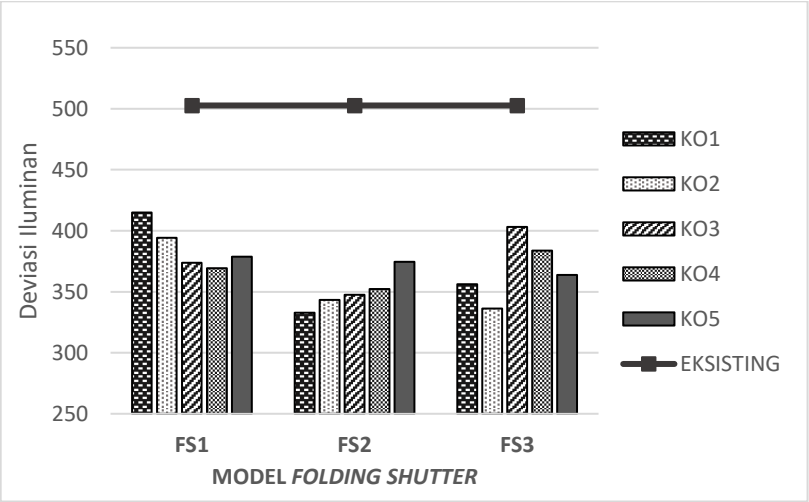
Secara keseluruhan, FS3 menghasilkan rasio uniformitas tertinggi dari model lainnya. Hal ini menandakan bahwa elemen *overhang* pada FS3 dapat mengkontrol cahaya paling baik pada saat *equinox* dimana posisi matahari sedang berada di puncak langit. Dengan demikian, maka model dengan performa pembayangan terbaik cenderung menghasilkan rasio uniformitas yang tinggi pada kondisi tersebut. Sementara itu, FS1 yang dapat memantulkan cahaya paling baik justru menghasilkan rasio uniformitas paling rendah dari model lainnya. Hal ini berarti FS1 masih kurang efektif dalam menurunkan tingginya intensitas cahaya pada iklim tropis. Dari model lainnya, FS2 cenderung menghasilkan rasio uniformitas yang konstan sepanjang hari dengan penerapan sudut kisi-kisi berbeda. Hal ini berbeda dengan hasil penelitian sebelumnya (Lim, 2012), karena integrasi *light shelf* dan *shutter* pada *folding shutter* masih kurang efektif dalam menghasilkan distribusi cahaya yang merata.

- **Pengaruh konfigurasi operatif terhadap distribusi cahaya**

Konfigurasi operatif bisa diartikan sebagai suatu kondisi terbuka atau tertutup dari suatu sistem (Romero, 2005). Pada penelitian ini, konfigurasi operatif *folding shutter* meliputi kondisi tertutup total (KO1), kondisi semi-tertutup hingga

semi-terbuka (KO2-KO3-KO4) dan kondisi terbuka total (KO5). Analisis distribusi cahaya pada pembahasan ini menggunakan simpangan baku (deviasi) iluminan pada titik ukur yang dihasilkan apabila model dioperasikan dari KO1 ke KO5. Semakin tingginya nilai deviasi maka persebaran nilai iluminan semakin besar, yang menandakan distribusi cahaya kurang merata. Sebaliknya, nilai deviasi yang lebih kecil menandakan distribusi iluminan yang lebih merata. Data iluminan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 9.

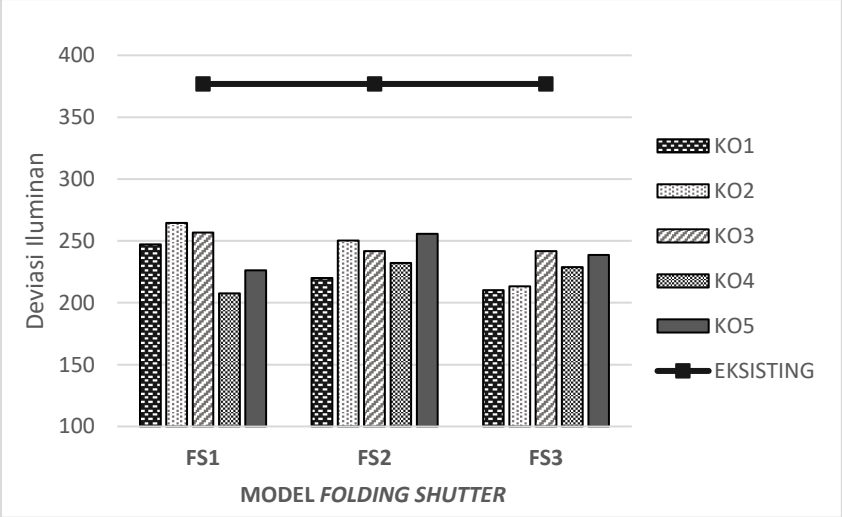
Deviasi iluminan pada waktu pagi ditunjukkan pada Gambar 5.8. Pada waktu pagi, nilai iluminan pada eksisting cenderung tinggi karena paparan cahaya matahari yang langsung mengenai fasad. Penerapan FS2 dan FS3 dapat menghasilkan distribusi cahaya lebih merata apabila model semakin ditutup (KO1), dan FS1 lebih berfungsi baik jika lipatan semakin dibuka (KO5). Hal ini menandakan bahwa FS1 yang ditutup sepenuhnya justru meningkatkan kontras cahaya dalam ruang. *Sloped shutter* pada FS1 cenderung menghasilkan refleksi cahaya yang tinggi karena memiliki kisi-kisi *shutter* pada dua sisi yang dilipat. Sedangkan FS2 dan FS3 yang sama-sama diintegrasikan dengan bidang pantulan solid (*light shelf* dan *overhang*) dapat menghalangi paparan cahaya lebih baik daripada kisi-kisi *shutter*. Hal ini sesuai dengan penelitian Kensek (2011) bahwa *folding panel* dengan material solid dapat berfungsi lebih baik dalam memberikan pembayangan dan mengurangi efek panas. Dengan ini maka FS2 dan FS3 (kondisi tertutup) dapat menghasilkan distribusi cahaya yang lebih baik pada waktu pagi.



Gambar 5.8 Deviasi iluminan dari konfigurasi operatif pada waktu pagi

Distribusi cahaya waktu siang dari penerapan konfigurasi operatif ditunjukkan pada Gambar 5.9. Ditemukan bahwa pada kondisi semi-terbuka terjadi deviasi iluminan yang besar. Hal ini berbeda dengan pernyataan Acosta (2015) karena persentase bukaan cahaya tidak selalu sebanding dengan peningkatan iluminan. Hal ini dapat disebabkan oleh kondisi langit dan posisi matahari di tropis pada waktu siang. Langit *partly cloudy* memiliki kuat penerangan cahaya yang bervariasi dari tiap area karena mengalami perubahan cepat (Givoni, 1998). Penerapan konfigurasi tertutup (KO1) menghasilkan distribusi terbaik karena dapat mengkontrol seluruh cahaya yang mengenai bukaan cahaya. Namun pada kondisi semi-terbuka, kontrol cahaya hanya dilakukan pada sebagian bukaan cahaya. Dengan ini maka hampir setengah cahaya yang masuk tidak terkontrol dengan baik dalam menghadapi pergerakan awan yang tidak konsisten. Sedangkan pada kondisi terbuka (KO5), *folding shutter* dilipat secara maksimal sehingga memiliki bentuk yang menyerupai *overhang.* Konfigurasi tersebut berfungsi baik dalam menghadapi paparan cahaya waktu siang yang berasal dari sudut *altitude* yang tinggi.

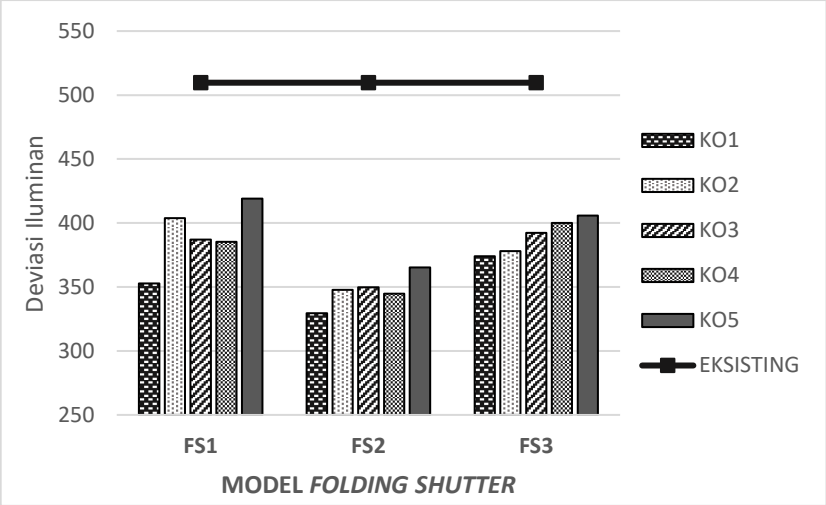
FS1 dan FS3 menghasilkan deviasi yang rendah karena konfigurasi yang dihasilkan pada kondisi terbuka menyerupai *overhang*. Sementara FS2 menghasilkan distribusi cahaya yang memburuk jika semakin dibuka. Hal ini karena pada FS2 yang dibuka sepenuhnya, kuantitas cahaya yang masuk ke dalam ruang semakin meningkat akibat pemantulan cahaya melalui *light shelf.*



Gambar 5.9 Deviasi iluminan dari konfigurasi operatif pada waktu siang

Deviasi iluminan pada waktu sore ditunjukkan pada Gambar 5.10. Posisi matahari waktu sore cukup rendah sama seperti waktu pagi, namun kondisi eksisting menghasilkan rata-rata iluminan paling tinggi (631 lux). Pada waktu ini, ketiga model dapat mendistribusikan cahaya paling baik pada kondisi tertutup (KO1). Penerapan ketiga model *folding shutter* juga dapat membantu menurunkan iluminan pada TUU1 eksisting hingga 200 lux (Lampiran 9). Dibandingkan model lainnya, konfigurasi operatif FS3 dapat menghasilkan penurunan distribusi cahaya secara bertahap jika semakin dilipat. Hal tersebut dapat disebabkan karena elemen *overhang* pada FS3 yang berfungsi sebagai *fixed shading* dapat membantu menahan paparan cahaya yang tidak konsisten pada langit *partly cloudy* dengan baik.

FS1 cenderung menghasilkan beberapa fluktuasi pada kondisi semi-terbuka. Hal ini dapat dipengaruhi oleh *sloped shutter* pada FS1 yang menghasilkan refleksi cahaya tinggi jika kisi-kisi *shutter* kontak langsung dengan cahaya matahari. Berbeda dengan model lainnya, FS2 yang dilipat total (KO5) menghasilkan bukaan cahaya yang lebar pada bagian atas jendela. Namun, hasil simulasi menunjukkan bahwa FS2 dapat mendistribusikan cahaya lebih baik pada kondisi tertutup (KO1). Hasil ini berbeda dengan pernyataan Acosta (2015) bahwa bukaan cahaya pada bagian atas jendela dapat mendistribusikan iluminan hingga area terdalam ruang dengan baik. Hal ini dapat disebabkan karena iklim tropis memiliki sudut *altitude* yang tinggi dan perlu dikontrol dengan penerapan *shading* pada bagian atas jendela.



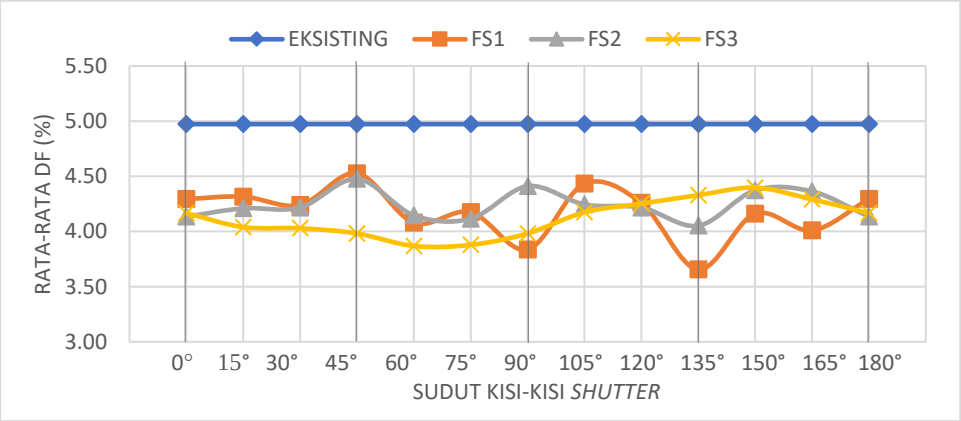
Gambar 5.10 Deviasi iluminan dari konfigurasi operatif pada waktu sore

5.2.2 *Daylight Factor* (DF)

Analisis performa penerangan alami selanjutnya dilakukan menggunakan parameter *daylight factor* (DF). Telah diketahui bahwa penggunaan program *Radiance* untuk simulasi DF menggunakan input waktu secara otomatis, yaitu pada 21 Juni pukul 12 siang dibawah langit *overcast*. Oleh sebab itu, analisis DF berfokus pada performa penerangan model pada kondisi terburuk di iklim tropis.

- **Pengaruh sudut kisi-kisi *shutter* terhadap nilai DF**

Hasil simulasi DF dari tiap sudut kisi-kisi *shutter* selengkapnya ditunjukkan pada Lampiran 10. Dari hasil simulasi ditemukan bahwa kondisi eksisting menghasilkan nilai DF yang tinggi, dengan DF maksimum 13,11% dan rata-rata DF 4,97%. Rata-rata DF pada eksisting tersebut hampir mendekati 5%, dimana nilai DF > 5% masuk dalam kategori terang benderang (Baker, 2002). Pada eksisting juga terdapat kontras nilai DF antara TUU1 (13,11%) dan TUS5 (3,12%). Dengan ini maka pada waktu *summer solstice* nilai DF yang dihasilkan cenderung tinggi dan dapat melebihi standar DF terutama pada area dekat jendela. Penelitian Lim (2016) juga menunjukkan bahwa *summer solstice* (21 Juni) adalah kondisi terkritis untuk orientasi utara di iklim tropis. Posisi matahari pada waktu itu berada pada *sunpath* miring ke utara, yang membuat paparan cahaya tepat menghadap ke fasad bangunan seperti pada Gambar 2.32. Rata-rata DF yang dihasilkan dari penerapan sudut kisi-kisi *shutter* dari 0° hingga 180° ditunjukkan pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Rata-rata DF dari sudut kisi-kisi *shutter* berbeda

Penerapan *folding shutter* pada orientasi utara dapat menurunkan rata-rata DF pada eksisting menjadi lebih mendekati standar DF (2–5%). Dari model lainnya,

FS3 menghasilkan rata-rata DF paling rendah namun meningkat secara stabil jika kisi-kisi *shutter* semakin dibuka. FS3 memiliki elemen *overhang* yang berfungsi paling efektif sebagai pembayangan dan dapat membantu menurunkan intensitas cahaya. Hal ini sesuai dengan teori Lechner (2015) bahwa *overhang* dapat memberikan pembayangan yang baik dengan mencegah paparan cahaya langsung. Sedangkan FS1 dan FS2 yang sama-sama memiliki *sloped shutter* cenderung menghasilkan rata-rata DF tinggi. Hal ini berbeda dengan pernyataan Koo (2010), karena penerapan kisi-kisi *shutter* masih kurang efektif dalam memberikan perlindungan dari paparan cahaya matahari jika diterapkan pada bagian atas jendela.

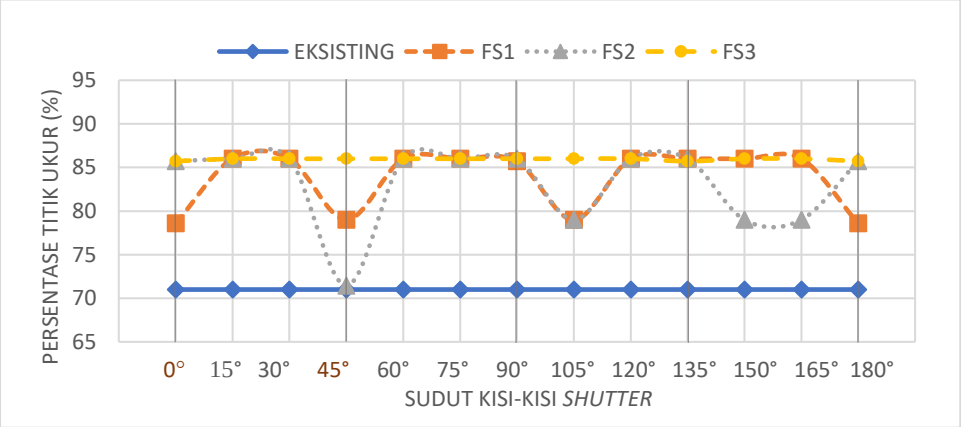
Rata-rata DF dari penerapan sudut kisi-kisi *shutter* yang sama pada ketiga model menunjukkan beberapa pola yang mirip. FS1-45 dan FS2-45 (*shutter* tertutup total) memiliki rata-rata DF tertinggi dari sudut lainnya. Hal ini menandakan bahwa peningkatan DF tidak hanya disebabkan oleh cahaya matahari langsung, namun juga karena refleksi cahaya dari bidang pantulan. Dalam hal ini, material kisi-kisi *shutter* adalah aluminium yang memiliki tingkat reflektifitas tinggi dimana semakin memicu intensitas cahaya (DF) yang dipantulkan ke dalam ruang. Rata-rata DF pada FS3 cenderung menurun jika *shutter* semakin ditutup dari sudut 45° hingga 90° dan meningkat jika semakin dibuka hingga sudut 180°. Berbeda dengan model lainnya, FS3 memiliki *horizontal shutter* yang dilengkapi dengan *overhang* yang dapat memberikan pembayangan lebih baik.

FS1 memiliki garis kurva rata-rata DF dengan fluktuasi yang tinggi pada penerapan sudut kisi-kisi berbeda. Pada FS1 penerapan kisi-kisi *shutter* semakin dibuka (FS1-0/FS1-180) maka nilai DF semakin menurun. Hal ini menunjukkan sesuai dengan penelitian Kim (2010) bahwa penerapan sudut kisi-kisi 0° pada *sloped shutter* dapat menghasilkan pembayangan terbaik. Sedangkan penerapan kisi-kisi *shutter* yang ditutup sepenuhnya (F1-45) memiliki rata-rata DF tertinggi. Hasil ini berbeda dengan penelitian Lim (2012;2013), karena sudut 45° justru menghasilkan nilai DF yang tinggi daripada sudut 0°. Hal ini dapat disebabkan oleh cahaya yang masuk melalui celah antara *sloped shutter* dengan fasad direfleksikan kembali oleh kisi-kisi *shutter* yang tertutup. Sedangkan FS2 memiliki rata-rata DF cukup konstan meskipun diterapkan sudut kisi-kisi yang berbeda. FS2 memiliki pola garis kurva hampir sama dengan FS1, dimana nilai DF meningkat jika *shutter*

ditutup sepenuhnya. Dari sudut lainnya, FS2-90 menghasilkan rata-rata DF paling tinggi sebesar 4,43%. Peningkatan rata-rata DF dapat dipengaruhi oleh cahaya yang dipantulkan oleh *light shelf* yang meningkatkan nilai DF pada area terdalam ruang.

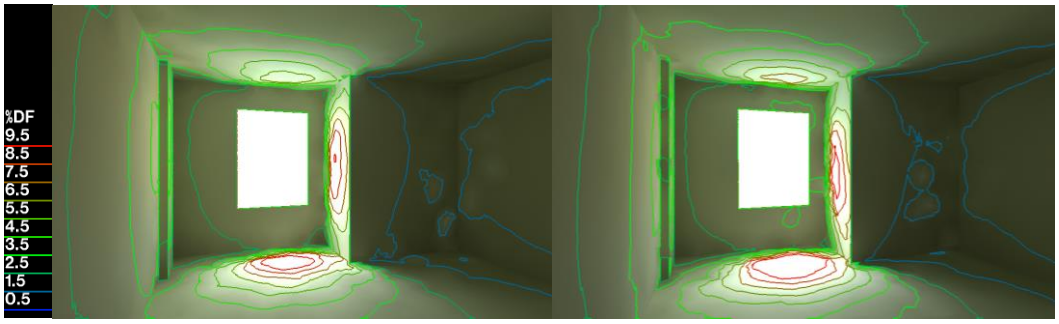
Dari hasil simulasi, seluruh model *folding shutter* dapat menghasilkan penerangan alami diatas standar DF minimum 2%. Dengan ini maka penerangan yang dihasilkan cenderung terang dan tidak ada permasalahan gelap. Persentase titik ukur yang memenuhi standar DF (2–5%) ditunjukkan pada Gambar 5.12. Pada kondisi eksisting, hanya sebanyak 71% titik ukur yang dapat memenuhi standar DF. Sedangkan dari hasil simulasi ketiga model *folding shutter*, persentase titik ukur yang memenuhi standar DF dapat meningkat sebanyak 15%.

FS3 dapat memenuhi standar DF secara konsisten dengan penerapan seluruh sudut kisi-kisi. Dari sudut kisi-kisi 0° hingga 180°, penerapan sudut 45° cenderung menghasilkan nilai DF terendah pada FS1 dan FS2. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, *sloped shutter* yang tertutup sepenuhnya cenderung menghasilkan kontras cahaya karena tingginya intensitas cahaya pada bidang pantulan. Sedangkan pada sudut 60° hingga 90°, ketiga model sama-sama menghasilkan 86% titik ukur yang memenuhi standar DF. Hal ini sesuai dengan pernyataan Hernandez (2017) bahwa sudut 60° yang menghadap orientasi utara cenderung menghasilkan iluminan yang rendah namun lebih efektif untuk mengurangi efek panas. Sudut 135° juga dapat menurunkan DF pada area dekat jendela (TUU1) terbaik pada FS1 dan FS2, hal ini menandakan bahwa performa pembayangan yang dihasilkan cukup baik.

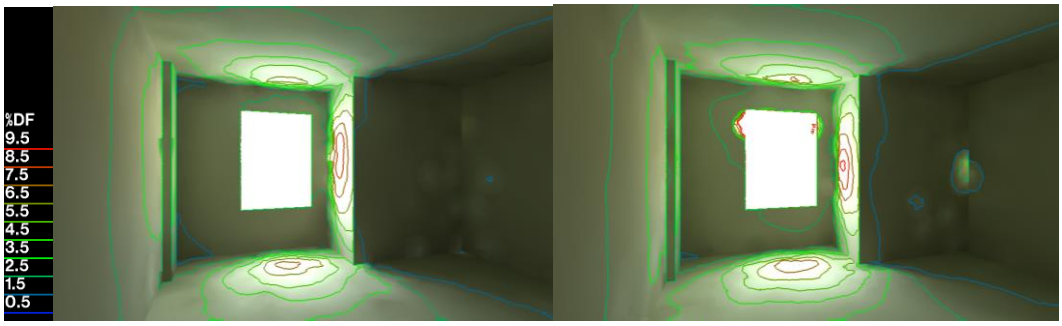


Gambar 5.12 Persentase titik ukur yang memenuhi standar DF dari penerapan sudut kisi-kisi *shutter* berbeda

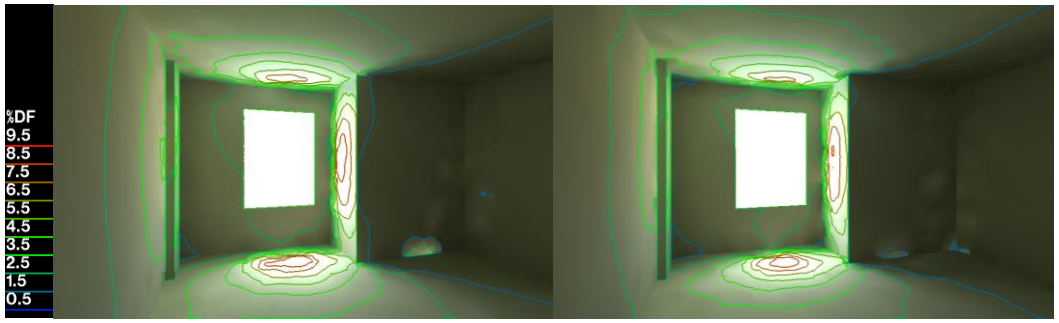
Hasil simulasi grafik DF dengan sudut kisi-kisi terbaik pada tiap model ditunjukkan pada Gambar 5.13, 5.14, dan 5.15. Untuk hasil simulasi grafik pada eksisting (tanpa penerapan model) ditunjukkan pada Lampiran 11. Grafik distribusi cahaya pada eksisting menunjukkan adanya kontras cahaya di dalam ruang, dimana area terdalam ruang yang terhalang oleh dinding cenderung gelap. Penerapan FS1 dapat memantulkan cahaya hingga ke area terdalam ruang dengan baik, namun masih kurang adanya pembayangan pada area dekat jendela. FS2 secara keseluruhan dapat menghasilkan pembayangan cukup baik namun nilai DF yang dihasilkan cenderung rendah. Adapun penerapan FS2-90 dapat menghasilkan distribusi cahaya lebih merata karena dapat memantulkan cahaya paling baik. Sedangkan FS3 dapat menurunkan nilai DF di area dekat jendela serta memantulkan cahaya dengan baik dengan penerapan sudut kisi-kisi 0°.



Gambar 5.13 Grafik DF dari penerapan FS1-0 dan FS1-135



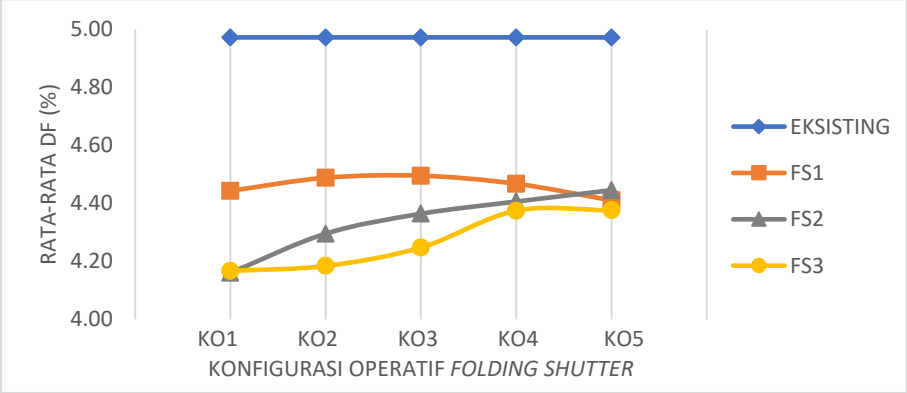
Gambar 5.14 Grafik DF dari penerapan FS2-0 dan FS2-90



Gambar 5.15 Grafik DF dari penerapan FS3-0 dan FS3-45

- **Pengaruh konfigurasi operatif terhadap nilai *daylight factor***

Konfigurasi operatif bisa diartikan sebagai suatu kondisi terbuka atau tertutup dari suatu sistem (Romero, 2005). Pada penelitian ini, konfigurasi operatif *folding shutter* diuji untuk melihat pengaruh dari lipatan model terhadap performa penerangan alami yang dihasilkan. Dari hasil simulasi DF dari tiap konfigurasi operatif (Lampiran 12) disusun kurva perbandingan rata-rata DF antara tiap model (Gambar 5.16). Penerapan konfigurasi operatif dari kondisi tertutup (KO1) hingga kondisi terbuka (KO5) pada FS2 dan FS3 menghasilkan peningkatan nilai DF secara signifikan. Dengan ini maka setiap model dilipat sebesar 15°, terjadi kenaikan rata-rata DF sebanyak 3%. Hal ini sesuai dengan pernyataan Acosta (2015) bahwa besar bukaan cahaya sebanding dengan peningkatan nilai DF. Meskipun demikian, rata-rata DF ketiga model pada KO5 masih lebih rendah dibandingkan kondisi eksisting yang cenderung tinggi (5%). Dalam hal ini, *folding shutter* yang dibuka total dapat membantu memasukkan pemandangan (*view*) sebanyak mungkin dengan tetap menghasilkan penerangan yang memenuhi standar kenyamanan visual.

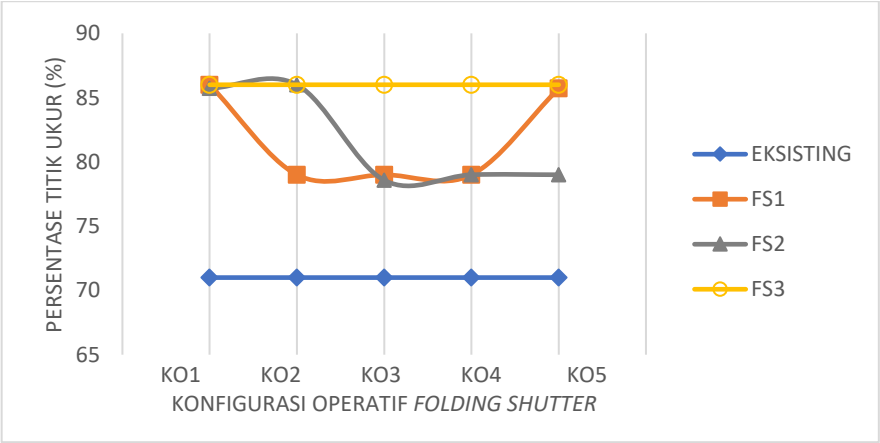


Gambar 5.16 Rata-rata DF dari konfigurasi operatif *folding shutter*

FS1 menghasilkan rata-rata DF tertinggi secara konsisten di tiap konfigurasi yang dioperasikan. Hal ini dapat disebabkan karena FS1 memiliki dua permukaan *shutter* yang memiliki banyak celah untuk memasukkan cahaya. Namun berbeda dengan model lainnya, rata-rata DF pada FS1 semakin meningkat pada kondisi semi terbuka (KO3) dimana model dilipat sebesar 45°. Sedangkan rata-rata DF semakin menurun apabila FS1 ditutup atau dibuka sepenuhnya (KO1, KO5). Hal ini semakin membuktikan bahwa *shutter* yang tertutup dapat tetap menghasilkan intensitas cahaya yang tinggi apabila memiliki tingkat reflektifitas

yang tinggi. Pada saat *summer solstice* yang merupakan kondisi kritis untuk orientasi utara, FS1 yang dioperasikan tertutup (KO1) dapat membantu menurunkan rata-rata DF paling baik jika dibandingkan dengan kondisi lainnya.

Gambar 5.17 menunjukkan persentase titik ukur yang memenuhi standar DF dengan rentang 2-5%. Hasil simulasi seluruh konfigurasi operatif menghasilkan nilai DF diatas DF minimum (> 2%). Dengan ini maka sisa titik ukur lainnya memiliki DF > 5%, yang masuk dalam kategori terang benderang (Baker, 2002). Kurva menunjukkan bahwa konfigurasi yang memiliki rata-rata DF terendah dapat menghasilkan penerangan yang paling banyak memenuhi standar DF. FS3 dapat memenuhi standar DF dengan persentase tertinggi (86%) secara konstan dari KO1 hingga KO5. Hal ini berarti penerapan kontrol lipat tidak terlalu mempengaruhi performa DF dari FS3, meskipun terdapat sedikit peningkatan rata-rata DF. FS3 dapat menghasilkan pembayangan terbaik karena memiliki elemen *overhang* yang berfungsi baik untuk menahan paparan cahaya dari sudut *altitude* yang tinggi. Dengan ini maka penerapan rasio *overhang* dari rekomendasi Ossen (2005) untuk orientasi utara dapat berfungsi dengan baik dalam memenuhi standar DF.



Gambar 5.17 Persentase titik ukur yang memenuhi standar DF dari konfigurasi operatif *folding shutter*

Telah diketahui bahwa rata-rata DF pada FS1 semakin meningkat jika model diterapkan pada kondisi semi-terbuka (KO3). Pada kondisi semi-terbuka tersebut, nilai DF cenderung tinggi melebihi standar DF 2-5%. Sedangkan pada KO1 dan KO5 yang merupakan kondisi yang saling berlawanan, FS1 dapat memenuhi standar DF dengan persentase yang tinggi. Hal ini karena bentuk FS1 pada KO5 menyerupai *overhang*, yang dapat memberikan pembayangan dengan

baik sesuai dengan teori Baker (2002). Di sisi lain, FS2 cenderung menghasilkan penerangan yang melebihi standar DF dari KO3 hingga KO5. Berbeda dengan model lainnya, FS2 dioperasikan dengan cara melipat sisi *shutter* ke arah bidang *light shelf*. Hal ini membuat fungsi *shutter* sebagai elemen pembayangan semakin menurun jika model semakin dilipat. Oleh sebab itu, pada saat *summer solstice* yang merupakan kondisi kritis untuk orientasi utara (Lim, 2016), FS2 lebih direkomendasikan untuk dioperasikan pada kondisi tertutup (KO1).

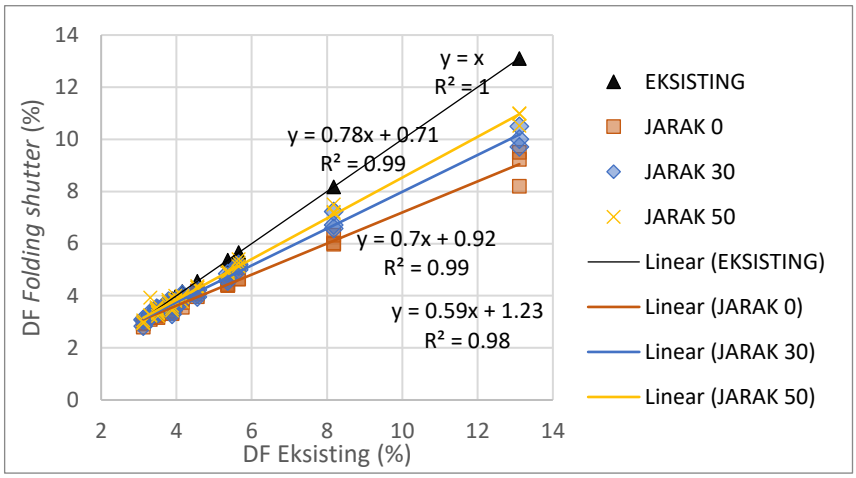
Dari hasil analisis diatas dapat disimpulkan bahwa rata-rata DF dari setiap model dapat mengalami peningkatan dan penurunan apabila model dioperasikan dengan cara dilipat. Selain itu, sudut lipatan dari *folding shutter* juga dapat membantu meningkatkan persentase titik ukur yang memenuhi standar DF. Sehubungan dengan itu, peneliti merekomendasikan strategi sistem kontrol berikut untuk menghadapi perubahan kondisi iklim pada eksisting. Pada kondisi ekstrim seperti waktu *summer solstice* dimana intensitas cahaya cenderung tinggi dan diperlukan pembayangan, maka perlu diterapkan KO1 untuk FS1 dan FS2, sedangkan untuk FS3 dapat berfungsi dengan baik pada konfigurasi apapun. Adapun pada waktu *winter solstice* dimana penerangan alami cenderung gelap, maka sebaiknya diterapkan KO3 untuk FS1, dan KO5 untuk FS2 dan FS3.

- **Pengaruh jarak penempatan model terhadap nilai *daylight factor***

Dari pembahasan sebelumnya, telah diketahui bahwa unit rumah susun Siwalankerto 2 menggunakan jendela bertipe *casement* yang berfungsi sebagai akses ventilasi/angin. Dikarenakan perlu adanya jarak untuk akses ventilasi, maka penempatan model perlu disesuaikan dengan rentang bukaan jendela. Selain itu, *folding shutter* berfungsi sebagai sistem *shading* eksternal yang menerima kontak langsung dengan cahaya matahari. Dalam hal ini, maka pengaruh dari jarak penempatan model dievaluasi dengan menggunakan parameter *daylight factor* (DF).

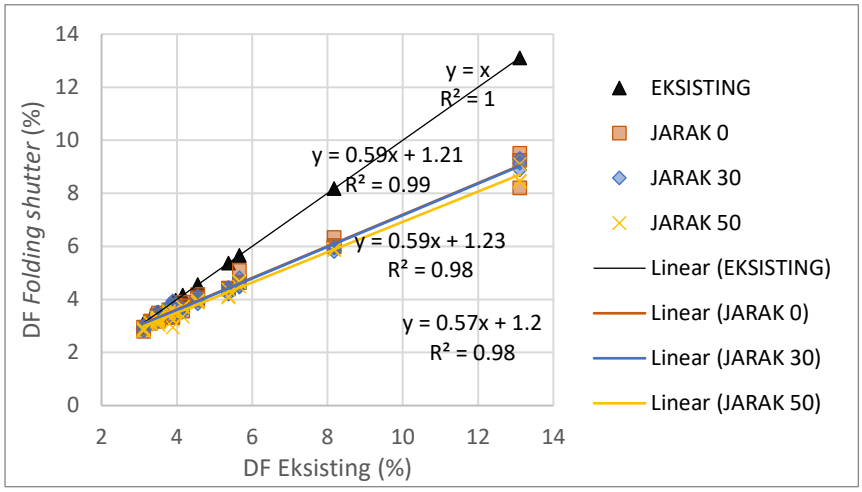
Dari hasil simulasi DF (Lampiran 13), disusun regresi linear untuk melihat kecenderungan performa DF dari tiga jarak penempatan model (Gambar 5.18). Ditemukan bahwa *folding shutter* dapat menurunkan nilai DF di eksisting lebih baik jika memiliki jarak lebih dekat dengan fasad. Pada penempatan dengan jarak 30 dan 50 cm, koefisien R^2 yang dihasilkan hampir mendekati eksisting yaitu sebesar 0,99.

Dengan ini maka penempatan model dengan jarak lebih besar dari 30 cm dapat menurunkan efektivitas sistem *shading* dalam menghadapi permasalahan penerangan di eksisting. Hal ini karena posisi matahari di iklim tropis memiliki sudut *altitude* yang tinggi. Dimana paparan cahaya dari matahari secara langsung memiliki arah yang tajam dan tingkat kecerahan tinggi (Lehner, 2015). Oleh sebab itu maka penerapan sistem *shading* dibagian atas jendela sangat diperlukan untuk menurunkan intensitas cahaya matahari. Dengan ini maka bertambahnya jarak antara model dengan fasad dapat menyebabkan berkurangnya persentase pembayangan dari paparan cahaya matahari secara langsung (*direct sunlight*).



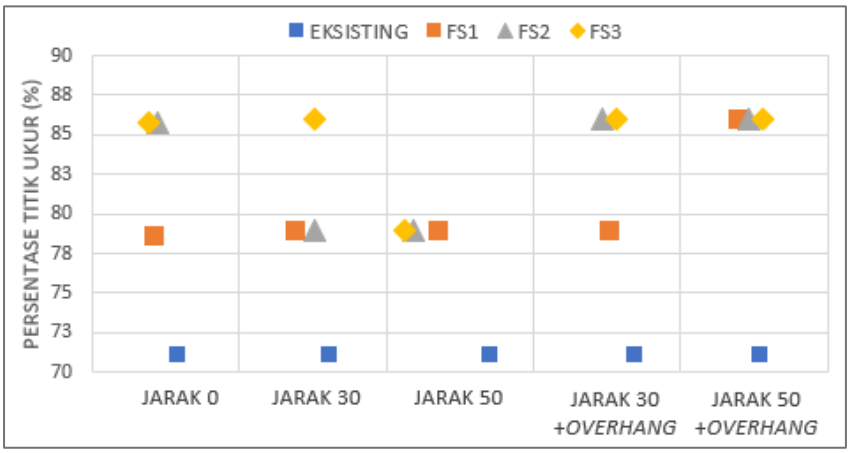
Gambar 5.18 Regresi linear dari jarak penempatan model pada fasad

Untuk tetap memaksimalkan potensi model jika ditempatkan pada jarak tertentu, maka dilakukan penambahan sistem *shading* yaitu *overhang* untuk menutupi celah bukaan pada sisi atas. Gambar 5.19 menunjukkan hasil regresi linear dari tiga jarak penempatan model dengan adanya penambahan *overhang* pada tiap model. Hasil simulasi membuktikan bahwa penerapan *overhang* dapat mencegah paparan cahaya langsung dengan baik, yang sesuai dengan teori Lechner (2015). Penambahan *overhang* juga dapat membantu memberikan pembayangan pada celah bukaan yang dihasilkan jika diterapkan jarak tertentu dari fasad. Berbeda dengan hasil sebelumnya, jarak penempatan 50 cm dapat menurunkan nilai DF paling baik meskipun memiliki jarak terjauh dari jendela. Hal ini sesuai dengan pernyataan Ye (2016), bahwa performa sistem *shading* eksternal sangat dipengaruhi oleh ukuran celah bukaan dan jarak *shading* dengan jendela.



Gambar 5.19 Regresi linear dari jarak penempatan model (penambahan *overhang*)

Hasil perbandingan nilai DF terhadap standar DF (2-5%) ditunjukkan pada Gambar 5.20. Ditemukan bahwa persentase titik ukur yang memenuhi standar DF semakin meningkat pada dua kondisi, yaitu jika: 1) jarak model ke fasad lebih dekat, atau 2) ditambahkan *overhang* pada sisi atas celah bukaan. Hal ini terlihat pada FS2 dan FS3 yang menghasilkan kenaikan persentase jika diterapkan dua kondisi tersebut. Dari seluruh model, FS3 (integrasi *overhang* dan *shutter*) dapat memenuhi standar DF paling konsisten jika tidak ditempatkan pada jarak > 50 cm. Dengan ini maka penerapan *overhang* terbukti paling efektif untuk mengkontrol intensitas cahaya (*direct sunlight*) pada iklim tropis. Sedangkan FS1 cenderung menghasilkan persentase yang paling rendah dari model lainnya, dengan sedikit peningkatan jika ditambahkan *overhang*. Hal ini karena FS1 memiliki celah bukaan lebih banyak dari model lainnya, yang berakibat besar dalam meningkatkan nilai DF.



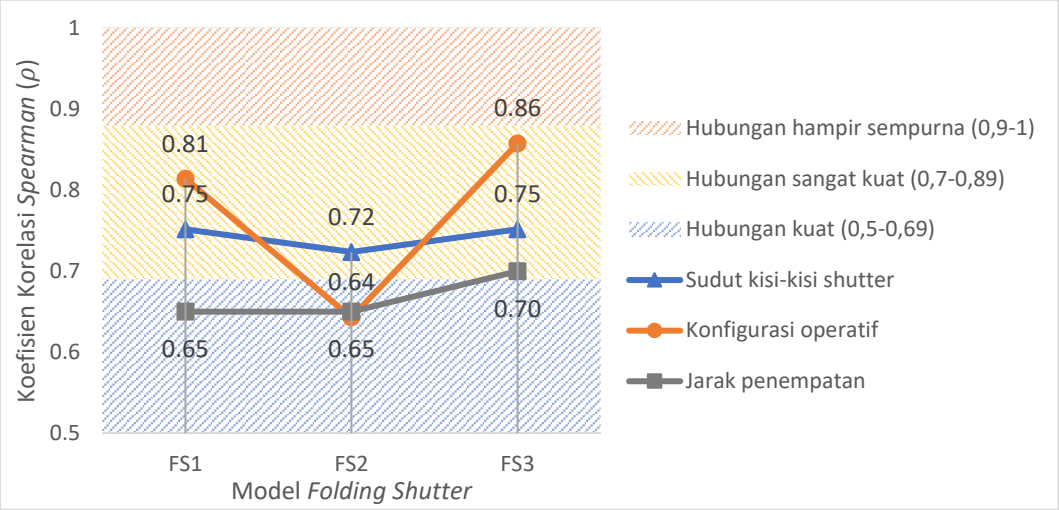
Gambar 5.20 Persentase titik ukur yang memenuhi standar DF dari jarak penempatan model

5.3 Analisis Kuat Hubungan *Folding Shutter* terhadap Performa Penerangan Alami (Korelasi *Spearman*)

Dalam mengidentifikasi seberapa besar kuat hubungan dari sub variabel *folding shutter* terhadap performa penerangan alami, maka hasil simulasi akan dianalisis menggunakan korelasi *Spearman.* Nilai koefisien yang diperoleh kemudian diinterpretasi menggunakan tabel interpretasi korelasi dari De Vaus (2002), yang ditunjukkan pada Tabel 3.5. Hasil dari perhitungan korelasi *Spearman* selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 14.

Koefisien korelasi dari tiga model (Gambar 5.21) menunjukkan bahwa konfigurasi operatif memiliki hubungan sangat kuat dengan performa penerangan alami. FS1 dan FS3 menghasilkan koefisien korelasi tertinggi diatas 0,8 yang menandakan adanya hubungan positif dan signifikan antara kedua model *folding shutter* tersebut dengan performa yang dihasilkan. Hal ini dapat disebabkan oleh banyaknya lipatan yang dapat dihasilkan dari tiap model. FS1 dan FS3 memiliki rentang lipatan dari 0° hingga 90° yang memungkinkan model untuk menghasilkan lebih banyak konfigurasi ketika dioperasikan. Sedangkan FS2 hanya dapat dilipat hingga 45°, sehingga performa yang dihasilkan pada tiap konfigurasi memiliki selisih yang tidak terlalu besar. Hal tersebut menyebabkan FS2 menghasilkan koefisien korelasi lebih rendah dari model lainnya.

Penelitian terdahulu tentang sistem kontrol dinamis oleh Atzeri (2018) juga menunjukkan bahwa model yang dapat menghasilkan banyak konfigurasi *intermediate* (semi-terbuka/tertutup) memiliki sistem kontrol terbaik dalam menghadapi berbagai posisi matahari. Dalam hal ini, FS1 dan FS3 dapat menghasilkan 7 konfigurasi jika dilipat setiap 15°, dimana setiap konfigurasi memiliki performa berbeda yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan kondisi lingkungan. Sedangkan FS2 memiliki pengaruh lebih sedikit karena hanya dapat menghasilkan 4 konfigurasi jika dilipat setiap 15°. Sebagai sistem *shading* dinamis, FS1 dan FS3 memiliki kelebihan dibandingkan FS2 karena memiliki lebih banyak pilihan konfigurasi yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan/preferensi pengguna.



Gambar 5.21 Kuat hubungan sub-variabel *folding shutter* dengan performa penerangan alami

Sub variabel selanjutnya yang juga memiliki hubungan sangat kuat dengan performa penerangan adalah sudut kisi-kisi *shutter*. Berbeda dengan konfigurasi operatif yang dapat meningkatkan persentase bukaan cahaya ketika dilipat, sudut kisi-kisi *shutter* tidak meningkatkan persentase bukaan cahaya secara drastis ketika dirotasi. Hal ini sesuai dengan pernyataan Lim (2013) bahwa *blinds/shutter* tidak terlalu berpotensi untuk mengutilisasi penerangan alami, namun lebih efektif dalam menurunkan kontras luminan. Hasil simulasi iluminan juga membuktikan bahwa penerapan sudut tertentu pada *shutter* dapat membantu meratakan distribusi cahaya dengan cara pembayangan dan pemantulan cahaya. FS1 dan FS3 memiliki koefisien korelasi sebesar 0,75, sedangkan koefisien dari FS2 cenderung lebih rendah (Gambar 5.22). Kuatnya hubungan dapat disebabkan karena FS1 dan FS3 menghasilkan perubahan nilai iluminan/DF paling besar dibandingkan kondisi eksisting. Dari model lainnya, FS1 menghasilkan pemantulan cahaya terbaik hingga sebesar 30% dan FS3 menghasilkan pembayangan terbaik hingga 34%. Hal ini menandakan bahwa rotasi sudut kisi-kisi *shutter* memiliki keterkaitan positif dengan performa penerangan alami, terutama dalam aspek distribusi cahaya.

Korelasi antara jarak penempatan model dengan performa penerangan alami menghasilkan hubungan yang kuat untuk FS1 dan FS2 (0,65), dan hubungan sangat kuat untuk FS3 (0,7). Dibandingkan sub variabel lainnya, jarak penempatan model memiliki pengaruh paling rendah pada performa penerangan alami. Hal ini

karena bertambahnya jarak penempatan model cenderung lebih mempengaruhi nilai DF di titik ukur dekat jendela. Sedangkan pada titik ukur bagian dalam ruang masih memiliki DF yang memenuhi standar (> 2%). Meskipun demikian, cahaya matahari yang berlebihan pada sebagian area tersebut dapat menyebabkan ketidaknyamanan visual dan permasalahan silau (Munaaim, 2016). Selain itu, kecenderungan performa (R^2) yang dihasilkan terhadap eksisting memiliki perbedaan cukup kecil (0,1–0,2%). Hal ini dapat disebabkan karena penambahan jarak antara model dan fasad semakin mempertinggi persentase bukaan yang terpapar cahaya matahari dari atas. Dimana besar bukaan cahaya berbanding lurus dengan peningkatan nilai DF (Acosta, 2015). Adapun FS3 memiliki koefisien tertinggi dari model lainnya, yang sangat dipengaruhi oleh adanya elemen *overhang* yang membantu menurunkan nilai DF paling baik. Dengan demikian, jarak penempatan model memiliki hubungan positif dengan performa penerangan di iklim tropis, terutama pada peningkatan nilai DF di titik ukur dekat jendela.

Sebagai sistem *shading* dinamis, *folding shutter* dapat berubah bentuk dengan teknik gerak lipat dan rotasi sudut kisi-kisi *shutter*. Dari uji korelasi yang telah dilakukan, terdapat hubungan yang sangat kuat dan signifikan antara konfigurasi operatif dan sudut kisi-kisi *shutter* dengan performa penerangan alami. Adapun untuk jarak penempatan model juga memiliki hubungan kuat meskipun koefisien yang dihasilkan cukup rendah. Dengan ini maka *folding shutter* dapat menghasilkan performa yang dinamis karena setiap teknik gerak yang diterapkan dapat memberikan pengaruh yang cukup signifikan. Meskipun demikian, pengaruh yang dihasilkan dapat berdampak positif ataupun negatif. Hal ini karena data ordinal yang digunakan untuk korelasi *Spearman* tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan standar DF dan iluminan. Seperti halnya yang terlihat pada FS1 dan FS3 yang sama-sama memiliki koefisien korelasi yang tinggi. Dalam hal ini, FS3 cenderung memberikan pengaruh terbesar dalam aspek penurunan intensitas cahaya, dimana dapat lebih memenuhi standar DF pada eksisting. Sedangkan FS1 cenderung menghasilkan penerangan yang terlalu terang dan melebihi standar DF yang dibutuhkan untuk bangunan rumah tinggal.

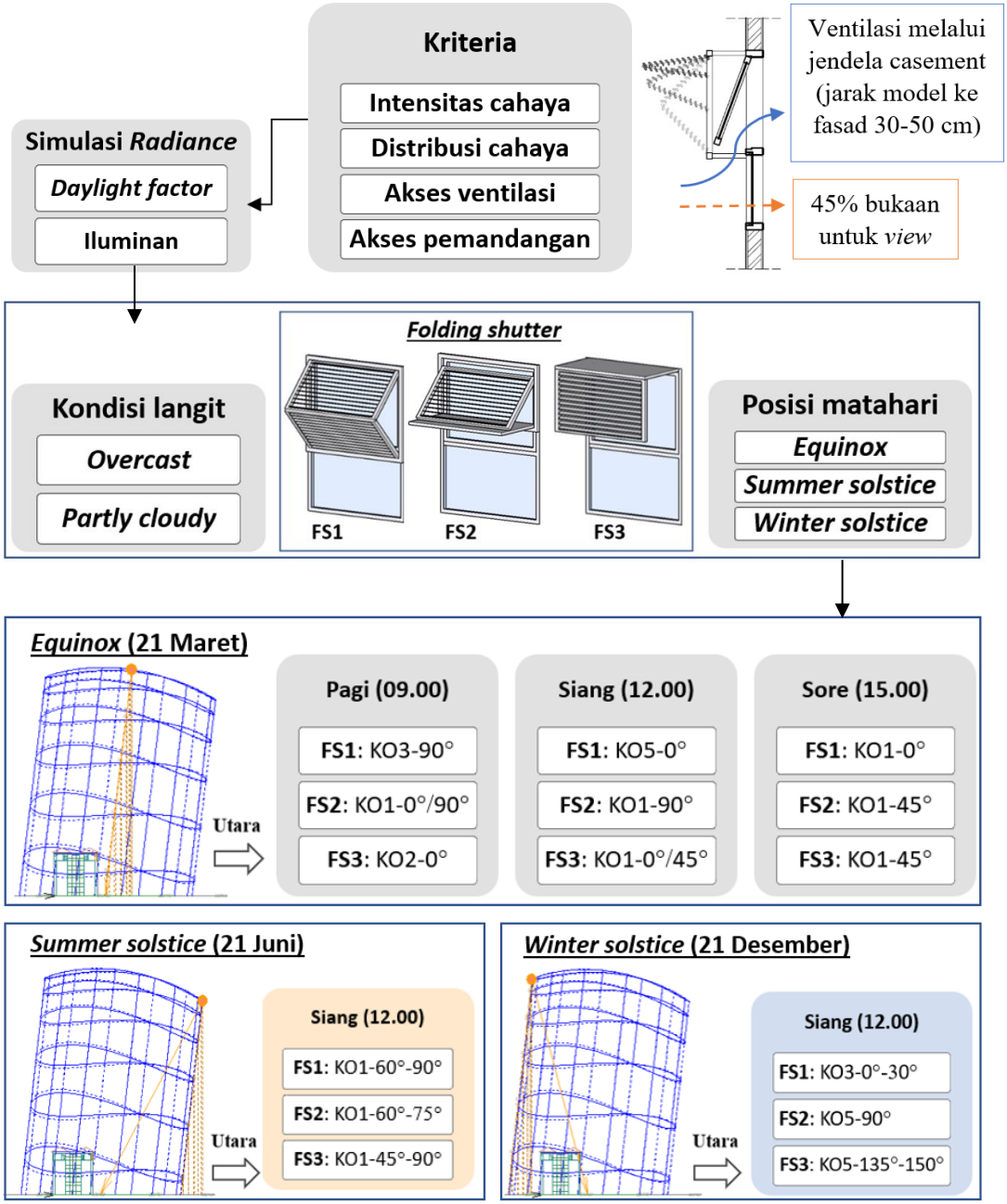
5.4 Konsep Model *Folding Shutter*

Dari hasil eksperimen dan korelasi *Spearman*, telah diidentifikasi kecenderungan performa dari sub variabel *folding shutter* serta kuat hubungannya terhadap performa penerangan alami. Berdasarkan data tersebut maka dilakukan penyusunan konsep model *folding shutter* berdasarkan kondisi di iklim tropis. Konsep model yang diajukan meliputi rekomendasi kontrol gerak *folding shutter* untuk diterapkan pada posisi matahari berbeda, yaitu *summer solstice* (21 Juni), *equinox* (21 Maret), dan *winter solstice* (21 Desember). Konsep model untuk tiap model *folding shutter* selengkapnya terdapat pada Gambar 5.22.

Pemanfaatan penerangan alami untuk interior bangunan di iklim tropis memiliki tantangan tersendiri yang disebabkan oleh kondisi langit tropis (*partly cloudy*) yang memiliki sifat dinamis (Al-Obaidi, 2017). Kombinasi kontrol gerak secara lipat dan rotasi digunakan sebagai strategi dalam menghadapi kondisi tersebut. Konfigurasi operatif memberikan pengaruh terbesar dalam peningkatan iluminan, maka sebaiknya kontrol gerak lipat hanya diterapkan jika tidak terdapat paparan cahaya langsung atau saat kondisi langit mendung. Penerangan alami lebih baik dimasukkan melalui celah kisi-kisi *shutter*, karena *shutter* berfungsi baik dalam mendifusikan cahaya. Pada waktu *equinox* dimana paparan cahaya berasal dari sudut *altitude* yang tinggi, sangat diperlukan adanya pembayangan untuk bagian atas jendela. Konfigurasi operatif tertutup (KO1) dengan kisi-kisi terbuka (0°-45°) berfungsi baik pada waktu tersebut, hal ini juga untuk mengantisipasi perubahan intensitas cahaya karena pergerakan awan yang tidak konsisten. Namun apabila pengguna menginginkan akses pemandangan luar dengan lebih leluasa, dapat diterapkan konfigurasi semi-terbuka yang disertai kisi-kisi tertutup (45°-90°).

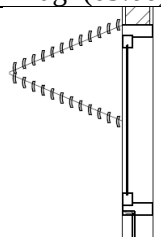
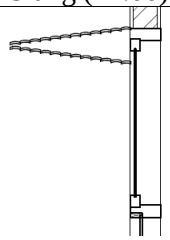
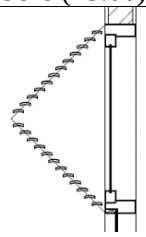
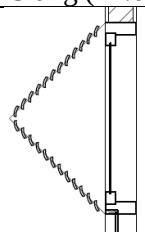
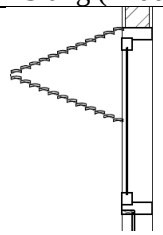
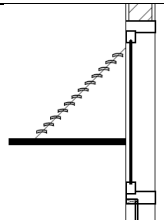
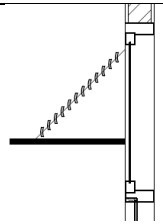
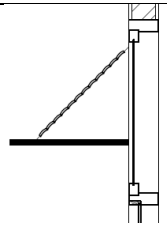
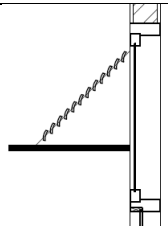
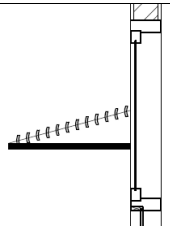
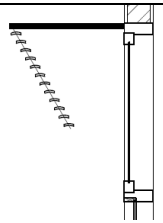
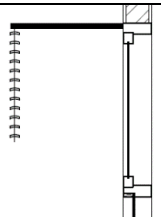
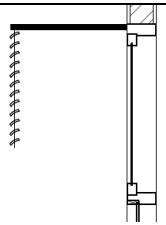
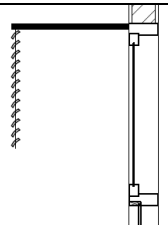
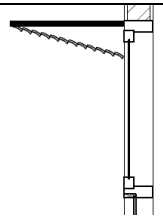
Pada waktu *summer solstice* (langit *overcast*) yang merupakan kondisi terkritis untuk orientasi utara (Lim, 2016), penerapan *folding shutter* yang tertutup (KO1) dengan sudut kisi-kisi 60°-90° menghasilkan performa paling baik. Hal ini karena intensitas cahaya pada waktu tersebut terlalu tinggi dan hanya perlu dimasukkan secukupnya agar tidak mengganggu kenyamanan visual. Sebaliknya, pada waktu *winter solstice* dimana posisi matahari menghadap ke bagian belakang bangunan rumah susun, sumber cahaya berasal dari refleksi awan (cahaya terdifusi). Dikarenakan cahaya terdifusi tidak memiliki intensitas yang terlalu tinggi, maka

cahaya matahari dapat dimasukkan sebanyak-banyaknya untuk keperluan penerangan alami. Penerapan konfigurasi operatif terbuka (KO3-KO5) lebih direkomendasikan untuk membantu meningkatkan rata-rata iluminan dalam ruang sekaligus memberikan akses pemandangan luar dengan lebih leluasa. Adapun untuk rekomendasi kontrol gerak dan ilustrasi konfigurasi tiap model selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 5.22 dan Tabel 5.1 berikut.



Gambar 5.22 Konsep model *folding shutter* berdasarkan kondisi di iklim tropis

Tabel 5.1 Ilustrasi konfigurasi *folding shutter* berdasarkan kondisi di iklim tropis

Model FS	*Equinox*, langit *partly cloudy*			*Summer solstice*, langit *overcast*	*Winter solstice*, langit *overcast*
	Pagi (09.00)	Siang (12.00)	Sore (15.00)	Siang (12.00)	Siang (1200)
FS1	 Semi-terbuka (KO3) Kisi-kisi 90°	 Terbuka (KO5) Kisi-kisi 0°	 Tertutup (KO1) Kisi-kisi 0°	 Tertutup (KO1) Kisi-kisi 60°-90°	 Semi-terbuka (KO3) Kisi-kisi 0°-30°
FS2	 Tertutup (KO1) Kisi-kisi 0°/90°	 Tertutup (KO1) Kisi-kisi 90°	 Tertutup (KO1) Kisi-kisi 45°	 Tertutup (KO1-KO2) Kisi-kisi 60°-75°	 Terbuka (KO5) Kisi-kisi 90°
FS3	 Semi-tertutup (KO2) Kisi-kisi 0°	 Tertutup (KO1) Kisi-kisi 0°/45°	 Tertutup (KO1) Kisi-kisi 45°	 Tertutup (KO1) Kisi-kisi 45°-90°	 Terbuka (KO5) Kisi-kisi 135°/150°

Sumber: Penulis (2020)

5.5 Diskusi Hasil Simulasi

Folding shutter merupakan pengembangan *shutter* yang dapat dilipat dengan sudut kemiringan tertentu dari fasad (*sloped shutter*). Hasil eksperimen menunjukkan kesamaan dengan penelitian terdahulu (Kim, 2010) bahwa *sloped shutter* dapat merefleksikan cahaya lebih baik dibandingkan *horizontal shutter* karena setiap kisi-kisi *shutter* menerima kontak langsung dengan cahaya matahari. Namun, *sloped shutter* kurang efisien untuk menurunkan intensitas cahaya yang tinggi, terutama jika diterapkan pada unit rumah susun di lantai tertinggi yang memperoleh paparan cahaya secara langsung. Meskipun demikian, kontrol cahaya dapat dilakukan dengan memutar sudut kisi-kisi pada *folding shutter*. Sudut kisi-kisi 0° terbukti dapat memantulkan cahaya paling baik dari sudut lainnya jika diterapkan pada *sloped shutter* maupun *horizontal shutter*. Pada kondisi terkritis di iklim tropis (*summer solstice*), penerapan sudut kisi-kisi 45° dan 90° dapat memberikan pembayangan terbaik seperti hasil penelitian Lim (2012;2013). Sedangkan penerapan sudut kisi-kisi 135° kurang dapat memproyeksi cahaya dengan baik karena hampir sejajar dengan sudut *altitude* matahari di iklim tropis.

Dari hasil eksperimen ditemukan bahwa ketiga *folding shutter* yang diuji memiliki kecenderungan performa yang berbeda. *Folding shutter* yang memiliki dua sisi *sloped shutter* dapat merefleksikan cahaya paling baik hingga ke area terdalam ruang. Namun, *sloped shutter* cenderung menghasilkan penerangan yang terang hingga melebihi standar DF pada kondisi terkritis di tropis. Di sisi lain, integrasi *folding shutter* dengan *light shelf* menghasilkan distribusi cahaya yang tidak merata, yang berbeda dengan hasil penelitian Lim (2012). Hal ini karena posisi *shutter* yang berada diatas *light shelf* cenderung menghalangi akses cahaya ke bidang pantulan. Meskipun model ini dapat menghasilkan pembayangan yang baik pada kondisi terkritis, namun penerangan yang dihasilkan cenderung redup dan tidak memenuhi standar DF. Sedangkan apabila model dilipat sepenuhnya, cahaya yang dipantulkan memiliki intensitas terlalu tinggi dan melebihi standar DF. Dengan ini maka integrasi dua *shading* tersebut tidak bekerja secara sinergis karena masih belum dapat memenuhi standar kenyamanan visual secara stabil.

Dari model lainnya, integrasi antara *folding shutter* dengan *overhang* menghasilkan performa terbaik karena dapat menurunkan intensitas cahaya di dekat

jendela dengan tetap memasukkan penerangan alami yang memadai. Hal ini karena elemen *overhang* hasil pengembangan penelitian Ossen (2005) terbukti dapat menahan paparan cahaya dari sudut *altitude* tinggi di tropis dengan baik. Selain itu, kisi-kisi *shutter* mendukung masuknya penerangan alami karena dapat memantulkan cahaya dengan baik. Seluruh konfigurasi dan kisi-kisi *shutter* yang diterapkan dapat memenuhi standar DF, khususnya pada kondisi terkritis di iklim tropis. Dengan ini maka konfigurasi terbuka dapat diterapkan untuk menampilkan pemandangan luar secara leluasa dengan tetap mempertahankan kenyamanan visual pengguna. Penerapan model ini juga memiliki kelebihan karena dapat berfungsi baik pada periode waktu yang lebih panjang dari model lainnya.

Dari hasil uji korelasi *Spearman,* kontrol gerak lipat dan rotasi pada *folding shutter* memiliki hubungan yang sangat kuat dengan performa penerangan alami (ρ = 0,70–0,89). Penerapan kontrol gerak lipat dapat membantu mengkontrol kuantitas cahaya yang masuk karena persentase bukaan semakin meningkat apabila model semakin dilipat. Sedangkan gerak rotasi pada kisi-kisi *shutter* lebih berfungsi baik dalam mengkontrol kualitas cahaya, yaitu dengan mendifusikan cahaya langsung (*direct sunlight*) serta memantulkan cahaya hingga ke area terdalam ruang. Kombinasi gerak lipat dan rotasi tersebut dapat membantu mengkontrol cahaya untuk memenuhi standar kenyamanan visual supaya dapat dimanfaatkan sebagai penerangan alami. Jarak penempatan *folding shutter* dengan fasad juga memiliki hubungan yang kuat dengan performa penerangan alami (ρ = 0,50–0,69). Bertambahnya jarak antara sistem *shading* dengan fasad rumah susun berdampak pada meningkatnya intensitas cahaya di area dekat jendela. Dalam hal ini, penambahan jarak antara model dan fasad perlu dilengkapi dengan penambahan *shading* pada bagian atas untuk menghalangi paparan cahaya pada waktu siang.

Dalam menghadapi perubahan kondisi di iklim tropis, penerapan konfigurasi tertutup dan kisi-kisi terbuka (0°-45°) dapat berfungsi baik dalam menghadapi pergerakan awan yang cepat pada langit *partly cloudy*. Sedangkan untuk kondisi terkritis pada langit *overcast,* penerapan konfigurasi tertutup dan kisi-kisi semi-terbuka (60°-90°) dapat mencegah masuknya cahaya langsung dengan tetap memasukkan cahaya secukupnya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *shading*

dinamis memiliki fleksibilitas untuk berubah bentuk sebagai respon untuk menghadapi perubahan kondisi iklim. Kapabilitas gerak yang dimiliki juga memberikan kebebasan kepada pengguna rumah susun untuk mengkontrol sendiri tingkat penerangan yang diinginkan. Namun, penerapan sistem *shading* dinamis perlu diimbangi dengan perencanaan elemen bangunan yang mendukung distribusi cahaya dalam ruang, khususnya pada bukaan cahaya dan penempatan sekat interior. Bukaan cahaya sebaiknya memanjang secara horizontal dan tidak berdekatan dengan sekat interior supaya distribusi cahaya dapat lebih menyeluruh. Selain itu, perlu adanya pemisahan fungsi jendela antara akses cahaya dan ventilasi supaya pemanfaatan energi alami dapat dilakukan dengan lebih maksimal.

5.6 Kesimpulan Hasil Simulasi

Kesimpulan dari analisis hasil simulasi dan korelasi model *folding shutter* yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Verifikasi program *Radiance* menunjukkan bahwa hasil simulasi iluminan cenderung lebih rendah daripada kondisi lapangan. Hal ini disebabkan karena simulasi dengan langit CIE menghasilkan iluminan *outdoor* dibawah 20.000 lux (Lim, 2012), dimana jauh lebih rendah dari kondisi di iklim tropis.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sudut kisi-kisi yang ditutup sepenuhnya (45° dan 90°) dapat menurunkan iluminan paling baik, dan sudut 0° dapat menghasilkan pemantulan cahaya paling baik. Sedangkan sudut 135° menghasilkan distribusi cahaya terburuk karena kemiringan sudut hampir sejajar dengan sudut *altitude* matahari pada saat *equinox*.
3. Pada waktu pagi ketika posisi matahari dekat dengan horizon, *sloped shutter* (FS1 dan FS2) berfungsi lebih baik dengan sudut kisi-kisi 90°. Sedangkan *horizontal shutter* (FS3) berfungsi lebih baik dengan sudut kisi-kisi 0°.
4. Pada waktu siang, sumber penerangan alami adalah cahaya terdifusi dengan iluminan *indoor* yang cenderung rendah karena posisi matahari berada di puncak langit. Penerapan sudut kisi-kisi yang dapat memantulkan cahaya paling baik (FS1-0, FS2-90, dan FS3-0) menghasilkan distribusi yang merata.
5. Pada waktu sore dimana intensitas cahaya cenderung tinggi, penerapan sudut kisi-kisi FS1-0, FS2-45 dan FS3-45 menghasilkan pembayangan paling baik.

6. Dari hasil analisis performa iluminan dan distribusi cahaya, tiap model yang diuji menghasilkan kecenderungan performa sebagai berikut:
   a) *Folding shutters* (FS1) dapat menghasilkan pemantulan cahaya paling baik, namun kurang dapat menurunkan iluminan pada area dekat jendela. FS1 memiliki rasio uniformitas terendah dan deviasi iluminan tertinggi yang berarti distribusi cahaya yang dihasilkan kurang merata.
   b) Integrasi *folding shutter* dan *light shelf* (FS2) menghasilkan penerangan yang cenderung redup dengan penurunan iluminan tertinggi. FS2 memiliki rasio uniformitas yang rendah dan terus konstan meskipun diterapkan sudut kisi-kisi berbeda.
   c) Integrasi *folding shutter* dan *overhang* (FS3) dapat menghasilkan performa pembayangan paling baik secara konsisten pada tiga waktu. FS3 juga memiliki rasio uniformitas tertinggi dan dapat mencegah paparan cahaya terbaik pada waktu *equinox*.
7. Pada waktu *summer solstice* yang merupakan kondisi terburuk untuk orientasi utara, penerapan *folding shutter* dapat menurunkan rata-rata DF pada eksisting menjadi lebih mendekati standar DF 2-5 %. FS3 dapat memenuhi standar DF dengan persentase tertinggi (86%) secara konsisten dari kondisi terbuka hingga tertutup dengan penerapan sudut kisi-kisi 0° hingga 180°.
8. FS1 dengan *shutter* semakin dibuka (0°/180°) cenderung menurunkan nilai DF, sedangkan *shutter* yang ditutup sepenuhnya (45°) menghasilkan nilai DF yang tinggi. FS2 menghasilkan rata-rata DF yang konstan dengan sudut kisi-kisi berbeda. Sedangkan rata-rata DF pada FS3 semakin meningkat jika *shutter* semakin dibuka dari sudut kisi-kisi 90° hingga 180°.
9. Perubahan konfigurasi operatif dari tertutup hingga terbuka berdampak pada peningkatan nilai iluminan dan DF. Pada kondisi terkritis di iklim tropis, konfigurasi tertutup (KO1) dapat memenuhi standar DF dengan persentase tertinggi karena dapat menurunkan rata-rata DF paling baik.
10. Bertambahnya jarak antara model dengan fasad dapat menyebabkan berkurangnya persentase pembayangan dari paparan cahaya matahari dengan sudut *altitude* yang tinggi. Penambahan *overhang* pada celah bukaan antara model dengan fasad dapat membantu menurunkan nilai DF yang tinggi.

11. Dari hasil uji korelasi *Spearman* diperoleh bahwa konfigurasi operatif dan sudut kisi-kisi *shutter* memiliki hubungan sangat kuat dengan performa penerangan alami (rs = 0,70–0,89). Sedangkan jarak penempatan model memiliki hubungan kuat dengan performa penerangan alami (rs = 0,50–0,69).
12. Kontrol gerak lipat dapat membantu mengkontrol kuantitas cahaya yang masuk melalui penerapan konfigurasi terbuka hingga tertutup. Kontrol gerak rotasi kisi-kisi *shutter* dapat digunakan untuk mengkontrol kualitas cahaya, karena dapat mendifusikan cahaya langsung serta memantulkan cahaya hingga ke area terdalam ruang.
13. Dalam menghadapi perubahan kondisi di iklim tropis, peneliti mengusulkan konsep model *folding shutter* dengan strategi kontrol gerak sebagai berikut:
    a) Pada kondisi rata-rata di tropis (*equinox* dan langit *partly cloudy*), diperlukan penerapan konfigurasi tertutup (KO1) dan sudut kisi-kisi 0°-45° untuk menghadapi pergerakan awan yang tidak konsisten.
    b) Pada kondisi terkritis di tropis (*summer solstice* dan langit *overcast*), diperlukan penerapan konfigurasi tertutup (KO1) dan sudut kisi-kisi 60°-90°. Sedangkan pada kondisi yang tidak kritis (*winter solstice*), diperlukan penerapan konfigurasi terbuka (KO3-KO5) untuk memasukkan penerangan alami sebanyak-banyaknya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 6
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Pemanfaatan penerangan alami merupakan salah satu upaya konservasi energi bangunan, terutama untuk bangunan rumah susun yang dihuni oleh masyarakat menengah ke bawah. Dalam menghadirkan penerangan alami yang memenuhi standar kenyamanan visual, maka diperlukan adanya kontrol cahaya matahari dengan menggunakan sistem *shading* dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti pengaruh sistem *shading* dinamis dengan teknik gerak lipat dan rotasi (*folding shutter*) terhadap performa penerangan alami yang dihasilkan.

Dari hasil pengukuran kondisi eksisting di Rusunawa Siwalankerto 2, dapat disimpulkan bahwa elemen interior seperti bukaan cahaya dan penempatan sekat pada unit rumah susun dapat mempengaruhi distribusi cahaya dalam ruang. Dalam hal ini, bukaan cahaya yang memanjang secara vertikal dan berdekatan dengan sekat interior semakin memicu terjadinya kontras cahaya yang tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan penerangan alami di dalam unit memiliki intensitas cahaya yang tinggi dan distribusi cahaya kurang merata. Hal ini menunjukkan bahwa strategi penerangan alami sangat diperlukan dari tahap awal desain unit rumah susun. Bukaan cahaya sebaiknya memanjang secara horizontal dan tidak berdekatan dengan sekat supaya distribusi cahaya dapat mencapai seluruh bagian ruang. Apabila kondisi tersebut tidak dapat terpenuhi, maka diperlukan adanya sistem *shading* pada fasad rumah susun untuk mengkontrol cahaya yang masuk.

Perlu diperhatikan bahwa eksperimen pada penelitian ini hanya menggunakan bantuan simulasi dan belum dilakukan pengujian secara fisik pada kondisi nyata di iklim tropis. Hal tersebut tidak menutup kemungkinan bahwa dapat terjadi penyesuaian baru pada proses penyusunan model fisik, dimana dapat menghasilkan performa yang sedikit berbeda. Meskipun demikian, hasil simulasi dari setiap sub-variabel *folding shutter* dapat digunakan sebagai gambaran mengenai kecenderungan performa yang dihasilkan pada kondisi berbeda di iklim tropis. Hasil simulasi juga menunjukkan kelebihan maupun kekurangan dari

kombinasi kontrol gerak lipat dan rotasi pada sistem *shading* dinamis terhadap performa penerangan alami yang dihasilkan.

Meskipun hasil uji korelasi *Spearman* menunjukkan bahwa kontrol gerak lipat dan rotasi memiliki hubungan kuat dengan performa penerangan alami, namun kecenderungan performa keduanya cukup berbeda. Pergerakan lipat pada *shutter* dapat membantu mengkontrol persentase bukaan cahaya dan kuantitas cahaya yang masuk. Kontrol gerak lipat juga memiliki pengaruh yang kuat pada peningkatan intensitas cahaya, dengan ini maka penerapan gerak lipat sebaiknya hanya dilakukan pada kondisi ketika diperlukan cahaya sebanyak-banyaknya. Selain itu, penerapan kontrol lipat pada kondisi nyata memerlukan teknis pemasangan yang lebih rumit dibandingkan rotasi, khususnya untuk menahan beban *shading* pada ketinggian tertentu. Oleh sebab itu maka diperlukan adanya perencanaan desain yang lebih matang dalam menyusun model fisik *folding shutter*. Di sisi lain, rotasi kisi-kisi *shutter* dari sudut 0° -90° dapat membantu mendifusikan dan mengkontrol arah pantul cahaya. Namun, rotasi kisi-kisi diatas 90° perlu dihindari karena tidak dapat memproyeksi sudut *altitude* di iklim tropis dengan baik. Pergerakan rotasi juga dapat digerakkan dengan mudah untuk kebutuhan sehari-hari, namun posisi kisi-kisi *shutter* yang terlalu rapat dapat mengurangi akses pemandangan luar.

Dari hasil simulasi, integrasi *folding shutter* dengan overhang 60 cm menghasilkan performa yang paling memenuhi kenyamanan visual khususnya pada kondisi terkritis di iklim tropis. Dengan ini maka dapat disimpulkan bahwa penerapan *overhang* pada jendela bagian atas memiliki peran penting dalam mencegah paparan cahaya dari sudut *altitude* tinggi di iklim tropis. Penerapan *shutter* pada jendela bagian atas juga membantu memantulkan cahaya ke dalam ruang. Dengan memanfaatkan sistem *shading* dinamis untuk mengkontrol cahaya pada jendela bagian atas, maka jendela bagian bawah dapat dimanfaatkan untuk akses pemandangan dan ventilasi. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa kisi-kisi *shutter* dapat memantulkan cahaya dengan tetap memenuhi standar kenyamanan visual. *Shutter* yang dilipat dengan kisi-kisi tertutup juga dapat berperan sebagai bidang pantulan, namun penerangan yang dihasilkan cenderung melebihi kenyamanan visual karena memiliki intensitas cahaya yang tinggi. Dengan ini maka

bidang pantul berukuran kecil dengan jumlah yang banyak lebih berfungsi baik dalam mengkontrol intensitas cahaya dan distribusi cahaya dalam ruang.

Penelitian ini diakhiri dengan rekomendasi konsep model *folding shutter* untuk berbagai kondisi di iklim tropis. Aplikasi *folding shutter* di iklim tropis perlu diintegrasikan dengan *overhang* karena dapat membantu mengkontrol cahaya untuk memenuhi kenyamanan visual dengan baik. Pada kondisi rata-rata di tropis, penerapan kisi-kisi *shutter* sebesar 0° dan 45° dapat mendistribusikan cahaya dengan baik ke dalam ruang. Pada kondisi terkritis di tropis, penerapan sudut kisi-kisi 60°-90° dapat menahan paparan cahaya langsung dengan tetap memasukkan cahaya yang terdifusi. Sedangkan pada kondisi dimana dibutuhkan cahaya sebanyak-banyaknya, maka *folding shutter* dapat dilipat hingga 15° untuk meningkatkan intensitas cahaya. Pada penerapannya, konsep model ini dapat berfungsi sebagai rekomendasi kontrol gerak *folding shutter* yang dapat diaplikasikan oleh pengguna. Fleksibilitas gerak dari *folding shutter* tersebut dapat membantu merespon pola pergerakan matahari pada periode tahunan serta mengantisipasi pergerakan awan yang cepat pada kondisi langit *partly cloudy*.

Penyediaan penerangan alami yang memenuhi standar kenyamanan visual secara konsisten tentunya dapat membantu mengurangi konsumsi energi lampu pada rumah susun. Selain itu, dengan mencegah paparan cahaya secara langsung maka efek samping lain dari matahari seperti *solar heat gains* juga dapat dihindari. Dengan demikian, maka manfaat dari lingkungan dapat lebih diutilisasi ke dalam bangunan untuk mendukung kenyamanan pengguna pada kehidupan sehari-hari.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka penulis mengajukan saran untuk perkembangan penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Dalam mendesain unit rumah susun diperlukan adanya pertimbangan mengenai orientasi bangunan dan distribusi cahaya, khususnya pada penempatan bukaan cahaya dan sekat interior. Selain itu, dalam mendesain sistem *shading* dinamis juga diperlukan strategi penerangan alami dengan

mempertimbangkan kondisi iklim setempat dan riset yang mendalam mengenai sistem kontrol dan teknik gerak yang diterapkan.

2. Saran untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan meneliti lebih lanjut mengenai batasan dari penelitian ini, diantaranya seperti berikut:
   a. Pengujian *mock-up folding shutter* pada kondisi nyata di iklim tropis.
   b. Pergerakan *folding shutter* secara horizontal dan optimasi sudut lipatan.
   c. Modifikasi pada *shutter* seperti geometri *shutter*, celah antara kisi-kisi, serta sudut kemiringan rotasi.
   d. Performa *folding shutter* dengan menggunakan sistem kontrol mekanik.

DAFTAR PUSTAKA

Acosta, I., Munoz, C., Campano, M.A., dan Navarro, J. (2015). "Analysis of daylight factors and energy saving allowed by windows under overcast sky conditions". Renewable Energy. Vol.77, hal. 194-207.

Ahmed, M.S.A. Abdel-Rahman, M. Bady, E. Mahrous, M. Suzuki (2016), "Optimum energy consumption by using kinetic *shading* system for residential buildings in hot arid areas", Int. J. Smart Grid Clean Energy, Vol. 5, No. 2, hal. 121-128.

Aksamija, A. (2013). "Building Simulations and High-Performance Buildings Research : (Use of Building Information Modeling (Bim) for Integrated Design and Analysis)", Perkins+Will Research Journal, Vol. 05, No. 1, hal 19-37.

Al Dakheel, J. (2017). "Building Applications, Opportunities and Challenges of Active *Shading* Systems: A State-Of-The-Art Review". MDPI : Civil Engineering & Architecture, Vol. 55, No. 1, hal. 84-97.

Al-Masrani, S.M., Al-Obaidi, K.M., Zalin, N.A., dan Isma, M.I.A. (2018). "Design optimisation of solar *shading* systems for tropical office buildings: Challenges and future trends". Solar Energy. Vol. 170, hal. 849-872.

Al-Obaidi, K.M., Ismail, M.A., Abdul Rahman, A.M., (2015). "Assessing the allowable daylight iluminan from skylights in single-storey buildings in Malaysia: a review". Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev. Vol. 6, No. 4, hal. 236-248.

Al-Tamimi, N. A., dan Fadzil, S. F. S. (2011). "The potential of *shading* devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics". Procedia Engn., Vol. 21, hal. 273-282.

Andersen, M., Gagne, J.M.L., Kleindienst S. (2013). “Interactive expert support for early stage full-year daylighting design: a user's perspective on light solve”. Autom Constr. Vol. 35, hal. 338-352.

Avesta R., Putri A.D., Hanifah R.A., Hidayat N.A., Dunggi M.D. (2017). “Strategi Desain Bukaan terhadap Penerangan Alami untuk Menunjang Konsep Bangunan Hemat Energi pada Rusunawa Jatinegara Barat” Jurnal Rekayasa Hijau. Vol. 2, No. 1, hal. 124-135.

Badan Standarisasi Nasional (2001). SNI 03-2396-2001. *Tata cara perancangan sistem penerangan alami pada bangunan gedung*. Badan Standarisasi Nasional, Bandung.

Badan Standarisasi Nasional (2001). SNI 03-6575-2001. *Tata cara perancangan sistem penerangan buatan pada bangunan gedung*. Badan Standarisasi Nasional, Bandung.

Baek, S. dan J. C. Park (2016). “Fundamental Study on the Optimal Design of a Folding *Shading* Device: Solar Radiation Model & Potential Cooling Load Saving”. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 15, No. 2, hal. 335-341.

Baker, Nick (2002). *Daylight Design of Buildings*. James & James, London.

Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., dan Monticelli, C. (2016). “The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture”. Procedia Engineering. 155. 275-284.

Bennett, Jeff (2014), *Statistical Reasoning for Everyday Life*, British Library Cataloguing-in-Publication Data, London.

Bueno B., Wienold J., Katsifaraki A., Fener Kuhn T.E. (2015). “A radiance-based modelling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces”. Energy Build, Vol. 94, hal. 10-20.

Carletti, C., Sciurpi, F., Pierangioli, L., Asdrubali, F., Pisello, A.L., Bianchi, F., Sambuco, S., dan Guattari, C. (2016). “Thermal and lighting effects of an external venetian blind: Experimental analysis in a full scale test room”. Building and Environment, Vol. 106, hal. 45-56.

Choi, S.J., et al. (2017). ”Lighting and cooling energy assessment of multi-purpose control strategies for external movable *shading* devices by using shaded fraction”. Energy and Building, Vol. 150, hal. 328-338.

De Chiara, Joseph (1995). *Time Saver Standards for Housing and Residential Development 2nd Edition*. McGraw-Hill Education, New York.

De Vaus, David (2002). *Survey in Social Research, 5th Edition*. Allen and Unwin, New South Wales.

Departemen Pekerjaan Umum (1991). *Tata Cara Perencanaan* Rumah *susun Modular*, Yayasan LPMB, Bandung.

Djamila H, Ming CC, Kumaresan S. (2011). “Estimation of exterior vertical daylight for the humid tropic of Kota Kinabalu city in East Malaysia”. Renew Energy, Vol. 36, hal. 9-15.

Dora P.E. dan Nilasari P.F. (2011). *Pemanfaatan Penerangan Alami pada* Rumah *Tinggal Tipe Townhouse di Surabaya*. In: Seminar Nasional Living Green: Mensinergikan Kehidupan, Mewujudkan Keberlanjutan, 26 Mei 2011, Universitas Kristen Petra, Surabaya.

Dubois, M.C. (2001). *Impact of Solar Shading Devices on Daylight Quality: Simulations with Radiance.Research Report*, Lund University, Lund, Sweden.

Dubois, M.C., (2003). “Shading devices and daylight quality: an evaluation based on simple performance indicators”. Light. Res. Technol. Vol. 35, hal 61– 76.

Eisenman, Peter (1991) sebagaimana dikutip dalam Lynn, Greg (2004), *Architecture Curvilinearity, the Folded, the Pliant and the Supple, Folding in Architecture, Architectural Design*. John Wiley & Sons, Chichester.

Frick, Et. Al. (2008), *Ilmu Fisika Bangunan Pengantar Pemahaman Cahaya, Kalor, Kelembapan, Iklim, Gempa Bumi, Bunyi, dan Kebakaran*. Kanisus, Yogyakarta.

Frick, Heinz dan Suskiyatno, Bambang (1998), *Dasar-Dasar Eko-Arsitektur*, Kanisus, Yogyakarta.

Giovannini, L., Verso, V.R.L., Karamata, B., Andersen, M., (2015). "Lighting and energy performance of an adaptive *shading* and daylighting system for arid climates". Energy Procedia, Vol. 78, hal. 370-375.

Groat, Linda N. dan Wang, David (2013). *Architectural Research Methods*. John Wiley & Sons, New Jersey.

Hernández, F.F., López, J.M.C., Suárez, J.M.P., Muriano, M.C.G., Rueda, S.C. (2017). "Effects of louvers shading devices on visual comfort and energy demand of an office building. A case of study." Energy Procedia, Vol. 140, hal. 207-216.

Ho, M.C., Chaing, C.M., Chou, P.C., Chang, K.F., Lee, C.Y. (2008). "Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms". Energy Building, Vol. 40, hal. 1844–1855.

Hox, J.J., dan Boeije, H.R. (2005). *Data collection, primary vs. secondary*. Encyclopedia of social measurement (hal. 593-599), Elsevier, New York.

Hraska, J. (2015). "Chronobiological aspects of green buildings daylighting". Renew Energy. Vol. 73, hal. 109–114.

Jackson, P. (2011), *Folding Techniques for Designers: From Sheet to Form*. Laurence King Publishing, London.

Karlsen, L., Heiselberg, P., Bryn, I., Johra, H. (2015). "Verification of simple illuminance based measures for indication of discomfort glare from windows", Building and Environment, Vol. 92, hal. 615-626.

Kamal, M.A. (2012). “An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings : Design Concepts and Architectural Interventions”. Acta Technica Napocensis : Civil Engineering & Architecture, Vol. 55, No. 1, hal. 84-97.

Karjalainen, S., (2009). “Thermal comfort and use of thermostats in Finnish homes and offices”. Building Environment. Vol. 44, No. 6, hal. 1237-1245.

Kensek, Karen dan Hansanuwat, Ryan (2011). “Environment Control Systems for Sustainable Design: A Methodology for Testing, Simulating and Comparing Kinetic Facade Systems”. Journal of Creative Sustainable Architecture & Built Environment. Vol. 1, hal. 27-46.

Kim, J.H., Park, Y.J., Yeo, M.S., Kim, K.W., (2009). “An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer”. Building Environment. Vol. 44, No. 7, hal. 1517-1527.

Kim, Jeong & Kim, Gon. (2010). “Advanced External Shading Device to Maximize Visual and View Performance”. Indoor and Built Environment. Vol 19, hal. 65-72.

Kirimtat, A., Koyunbaba, B.K., Chatzikonstantinou, I., Sariyildiz, S. (2016), “Review of simulation modeling for *shading* devices in buildings”. Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 53, hal. 23-49.

Kisnarini, R. (2015). Functionality and adaptability of low cost apartment space design : a case of Surabaya Indonesia. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.

Koenigsberger, O.H et al (1973), *Manual of Tropical Housing and Building, Part 1 Climatic Design*, Longman Group Limited, London.

Konstantoglou, Maria dan Tsangrassoulis, Aris (2016). “Dynamic operation of daylighting and *shading* systems: A literature review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Vol. 60, hal. 268-283.

Koo, S.Y., Yeo, M.S., dan Kim, K.W. (2010). “Automated blind control to maximize the benefits of daylight in buildings”. Building and Environment, Vol. 45, hal. 1508–1520.

Krarti, M., Erickson, P.M., Hillman, T.C. (2005). “A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting”. Build Environ. Vol. 40, hal. 747–754.

Kruse, F. dan Thestrup, J.B. (2014). “Research Libraries New Role in Research Data Management, Current Trends and Visions in Denmark”. LIBER Quarterly, Vol. 23, No. 4, hal. 310-335.

Lam, W.M.C. (1986). *Sunlighting as formgiver for architecture*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Latifah, Nur Laela (2015). *Fisika Bangunan 1*. Griya Kreasi, Bandung.

Lebée, Arthur (2015). “From Folds to Structures, a Review”. International Journal of Space Structures, Multi- Science Publishing, Vol. 30, No. 2, hal. 55-74.

Lechner, Norbert. (2009). *Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects*, 3rd edition. John Wiley & Sons, New Jersey.

Lechner, Norbert. (2015). *Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects, 4th edition*. John Wiley & Sons, New Jersey.

Lignarolo, L., Lelieveld, C., Teuffel, P. (2011). “*Shape morphing wind-responsive facade systems realized with smart materials*.” In Proceedings of the International Adaptive Architecture Conference, London, UK, hal. 3-5.

Lim Y.W., Zin M, Hamdan M, Remaz D. (2012). “Building façade design for daylighting quality in typical government office building”. Build and Environment, Vol. 27, hal. 194-204.

Lim, Y.W., (2013). “Indoor environmental comfort in malaysian urban housing”. American Journal of Environmental Sciences, Vol. 9, No. 5, hal. 431-438.

Lim, Y.W., M.A. Hamdan dan D.R. Ossen, (2013). “Internal *shading* for efficient tropical daylighting in existing high-rise open plan office”. Indoor Built Environment, Vol. 22, hal. 932-951.

Lim, Y.W. dan Heng, C.Y.S. (2016), “Dynamic internal light shelf for tropical daylighting in high-rise office buildings”, Build and Environment, Vol. 106, hal. 155-166.

Liu, M., et al. (2015). “Control strategies for intelligent glazed façade and their influence on energy and comfort performance of office buildings in Denmark”. Applied Energy, Vol. 45, hal. 43-51.

Loonen, R.C.G.M., Trčka, M., Cóstola, D., Hensen, J.L.M., (2013). “Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges”. Renew. Sustain. Energy Rev. Vol. 25, hal. 483-493.

Mufidah, M., Murti, F., Bintarjo DH, B., Pratama, H.C., dan Putranto, Y.T. (2016). “Studi Fasade Rumah susun Untuk Optimasi Energi Alam pada Bangunan di Tropis Lembab”. Prosiding SNST Fakultas Teknik ISBN.

Moloney, J., (2009). *A Morphology of Pattern for Kinetic Facades*. University of Melbourne, Melbourne School of design, Melbourne.

Moloney, J., (2011). *Designing Kinetics for Architectural Facades: State Change*. Routledge, New York.

Maiman, W.L., (2014). *Automated Shading Systems*. Tersedia di: http://www.automatedbuildings.com/news/dec14/interviews/141125115505maiman.html (Diakses tanggal 24 Maret 2019).

Mistrick, R.G. (2000). *Dekstop Radiance Overview*. The Pennsylvania State University, Pennsylvania.

Moore (1991). *Concepts and practices of daylighting in architecture*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Munaaim, M.A.C., Al-Obaidi, K.M., Ismail, M.R., Abdul Rahman, A.M., (2016). “Potential of fibre optic daylighting systems in tropical Malaysia”. Indoor Built Environ. Vol. 25, No. 3, hal. 466-480.

Newsham, G.R., (1994). “Manual control of window blinds and electric lighting: implications for comfort and energy consumption”. Indoor Environ. Vol. 3, No. 3, hal. 135-144.

Niezabitowska E. (2018) *Research methods and techniques in architecture*, Routledge, England.

Nishiyama, Y. Miura. (2012). “folding: Applying origami to space exploration”. Int. J. Pure Appl. Math, Vol. 79, hal. 269-279.

O'Brien, W., Kapsis, K., Athienitis, A.K., (2013). “Manually-operated window shade patterns in office buildings: a critical review”. Build. Environ. Vol. 60, hal. 319-338.

Ossen, D.R. (2005). “Optimum Overhang Geometry for Building Energy Saving in Tropical Climates”. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 4, hal. 563-570.

Olbina S., Hu, J., (2012). “Daylighting and thermal performance of automated split-controlled blinds”. Building Environment, Vol. 56, hal. 127–138.

Phillips, Derek (2004). *Daylighting: Natural Light in Architecture*. Architectural Press, Oxford.

Republik Indonesia (1985). *Undang-Undang No. 16 Tahun 1985 tentang* Rumah *susun*. Lembaran Negara RI Tahun 1985, No. 75. Sekretariat Negara, Jakarta.

Republik Indonesia (1988). *Undang-Undang No. 4 Tahun 1988 tentang* Rumah *susun*. Lembaran Negara RI Tahun 1988, No. 7. Sekretariat Negara, Jakarta.

Republik Indonesia (2011). *Undang-Undang No. 20 Tahun 2011 tentang* Rumah *susun*. Lembaran Negara RI Tahun 2011, No. 108. Sekretariat Negara, Jakarta.

Romero Aguero, J. dan Vargas, A. (2005). “Inference of Operative Configuration of Distribution Networks Using Fuzzy Logic Techniques—Part I: Real-Time Model”. Power Systems, IEEE Transactions on. Vol. 20, hal. 1551-1561.

Ruck, N., Aschehoug, Øyvind, Aydinli, S., Christoffersen, J., Edmonds, I., Jakobiak, R., Kischkoweit-Lopin, M., Klinger, M., Lee, E., Courret, G., Michel, L., Scartezzini, J., dan Selkowitz, S. (2000). *Daylight in Buildings - A source book on daylighting systems and components.* International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, Washington, DC.

Schnittich, Christian (2006), *Building Skins, Detail*, Birkhäuser, Basel.

Seguro, F. dan Palmer, J. (2016), *Solar Shading Impact Report*. National Energy Foundation. Tersedia di: http://www.nef.org.uk/ (Diakses tanggal 10 Juni 2019)

Shen, T. dan Nagai, Y. (2017). “An Overview of Folding Techniques in Architecture Design”. World Journal of Engineering and Technology, Vol. 5, hal. 12-19.

Steffy, Gary (2002). *Architectural Lighting Design*. John Wiley & Sons, New Jersey.

Sugiyono (2011). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Afabeta, Bandung.

Suryani, R.L. dan Marisa, A. (2017), *Aspek-aspek yang mempengaruhi Masalah Permukiman di perkotaan*, Tersedia di: www.usu.ac.id (Diakses tanggal 24 Maret 2019).

Tang, C.K., Chin, N., (2013). *Building Energy Efficiency Technical Guideline for Passive Design*. Public Works Department Malaysia, Kuala Lumpur.

Tuaycharoen , N., Tregenza, P. (2005). View and Discomfort Glare from Windows. Lighting Research and Technology. 39, 171-184.

Thumann, Albert (2008), *Handbook of Energy Engineering (Sixth edition*), The Fairmont Inc, Lilburn.

Wong, I. L. (2017). “A review of daylighting design and implementation in buildings”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 74, hal. 959-968.

Ye, Y., Xu, P., Mao, J., dan Ji, Y. (2016). “Experimental study on the effectiveness of internal shading devices”. Energy and Buildings, Vol. 111, hal. 154-163.

Zain-Ahmed, A., Kamaruzzaman Sopian, M.Y.H., Othman, A.A.M. Sayigh, Surendran, P.N., (2002). “Daylighting as a passive solar design strategy in tropical buildings: a case study of Malaysia”. Energy Convers. Manage. Vol. 43, No. 13, hal. 1725-1736.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Nilai Iluminan *outdoor* pada eksisting (langit *partly cloudy*)

Pengukuran waktu Pagi (09.00)			
Titik Ukur	**Pengukuran 1**	**Pengukuran 2**	**Pengukuran 3**
TUU1	54,267	8,333	7,100
TUU2	39,767	7,600	8,800
TUU3	30,933	6,767	14,233
TUU4	28,167	6,333	16,167
TUU5	44,933	5,933	16,033
TUS1	36,967	8,633	7,233
TUS2	58,033	8,067	8,867
TUS3	32,100	7,000	15,000
TUS4	28,400	6,167	17,200
TUS5	27,300	6,367	17,800
TUS6	34,833	7,400	11,333
TUS7	28,233	6,633	15,967
TUS8	34,400	7,133	11,200
TUS9	25,667	6,700	15,500
Rata-rata	**36,000**	**7,076**	**13,031**

Pengukuran waktu Siang (12.00)			
Titik Ukur	**Pengukuran 1**	**Pengukuran 2**	**Pengukuran 3**
TUU1	13,900	109,633	108,267
TUU2	18,367	108,600	109,467
TUU3	47,967	108,967	107,200
TUU4	111,933	109,133	110,167
TUU5	107,667	109,600	112,033
TUS1	109,267	108,767	108,500
TUS2	20,700	109,400	110,067
TUS3	27,900	109,367	97,267
TUS4	108,400	108,867	103,500
TUS5	109,667	76,633	135,667
TUS6	17,467	109,300	109,233
TUS7	107,567	109,433	109,400
TUS8	18,600	107,633	109,767
TUS9	109,300	108,800	101,200
Rata-rata	**66,336**	**106,724**	**109,410**

Pengukuran waktu Sore (15.00)			
Titik Ukur	**Pengukuran 1**	**Pengukuran 2**	**Pengukuran 3**
TUU1	12,567	11,400	6,067
TUU2	11,800	8,667	5,733
TUU3	14,033	8,967	5,933
TUU4	10,433	7,733	6,367
TUU5	12,767	8,000	5,850
TUS1	11,933	10,100	6,667
TUS2	12,933	10,300	6,900
TUS3	14,633	9,800	6,200
TUS4	10,767	7,500	6,433
TUS5	10,067	8,000	6,367
TUS6	12,733	9,067	5,400
TUS7	14,400	8,733	5,800
TUS8	12,767	8,533	5,800
TUS9	12,600	8,067	6,167
Rata-rata	**12,460**	**8,919**	**6,120**

Lampiran 2. Nilai Iluminan *outdoor* pada eksisting (langit *overcast*)

Pengukuran waktu Pagi (09.00)			
Titik Ukur	**Pengukuran 1**	**Pengukuran 2**	**Pengukuran 3**
TUU1	13,467	7,800	7,133
TUU2	14,867	7,167	6,967
TUU3	13,633	8,167	6,800
TUU4	9,933	7,300	6,767
TUU5	9,000	7,100	7,000
TUS1	13,000	7,633	6,967
TUS2	14,533	7,467	7,133
TUS3	13,300	7,867	6,667
TUS4	10,667	7,433	6,900
TUS5	9,133	7,267	6,933
TUS6	14,633	7,000	6,967
TUS7	11,800	7,667	6,700
TUS8	13,900	7,033	6,700
TUS9	11,700	7,533	6,667
Rata-rata	**12,398**	**7,460**	**6,879**

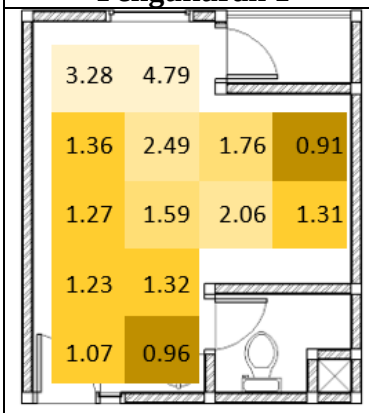
Pengukuran waktu Siang (12.00)			
Titik Ukur	**Pengukuran 1**	**Pengukuran 2**	**Pengukuran 3**
TUU1	119,800	18,400	60,967
TUU2	97,667	19,233	57,800
TUU3	109,300	24,000	36,367
TUU4	99,700	26,100	45,700
TUU5	108,300	28,900	44,567
TUS1	108,733	18,367	30,500
TUS2	160,333	18,333	63,733
TUS3	106,567	22,167	37,533
TUS4	103,800	28,000	42,533
TUS5	103,267	27,267	49,433
TUS6	166,000	19,433	48,133
TUS7	108,867	25,200	39,367
TUS8	109,333	20,000	41,033
TUS9	108,633	27,067	40,533
Rata-rata	**115,021**	**23,033**	**45,586**

Pengukuran waktu Sore (15.00)			
Titik Ukur	**Pengukuran 1**	**Pengukuran 2**	**Pengukuran 3**
TUU1	53,867	15,433	16,767
TUU2	66,733	15,767	14,667
TUU3	70,933	14,467	13,000
TUU4	51,333	12,967	12,867
TUU5	56,333	13,633	13,450
TUS1	45,500	16,967	15,100
TUS2	37,967	16,133	15,633
TUS3	62,033	15,767	14,333
TUS4	56,433	14,033	10,033
TUS5	55,133	12,500	13,267
TUS6	21,133	16,200	14,000
TUS7	62,033	13,700	12,700
TUS8	46,167	15,700	13,667
TUS9	65,033	13,700	12,567
Rata-rata	**53,617**	**14,783**	**13,718**

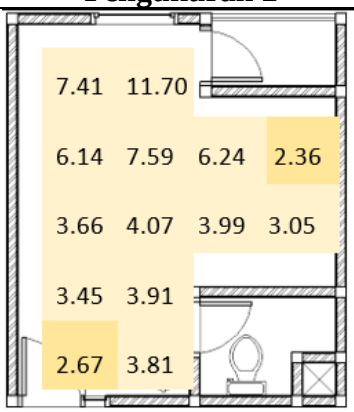
Lampiran 3. Nilai DF hasil pengukuran eksisting pada kondisi langit *partly cloudy*

Nilai DF pada waktu Pagi (09.00)

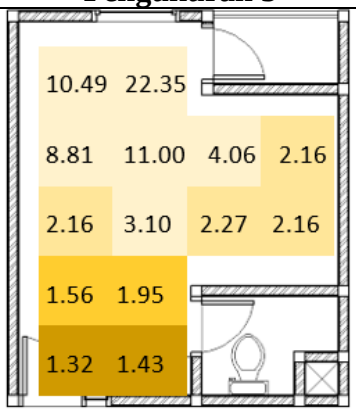
Pengukuran 1



Pengukuran 2



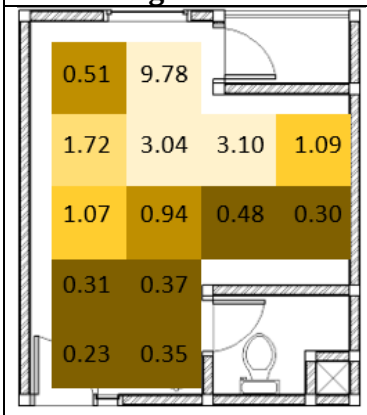
Pengukuran 3



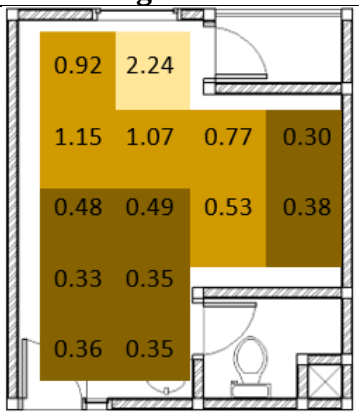
5.00
2.50
1.50
0.50
0.10

Nilai DF pada waktu Siang (12.00)

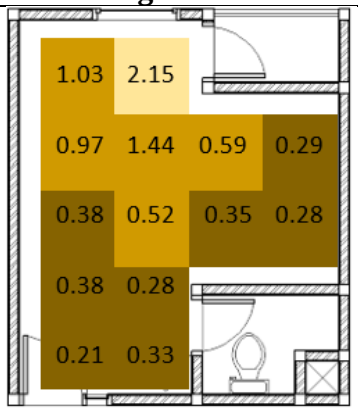
Pengukuran 1



Pengukuran 2



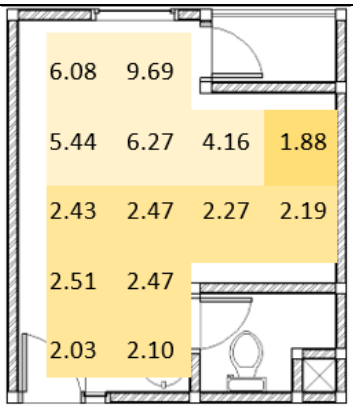
Pengukuran 3



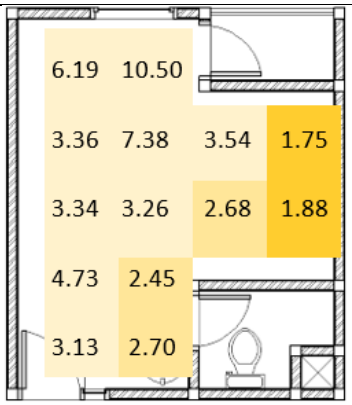
5.00
2.50
1.50
0.50
0.10

Nilai DF pada waktu Sore (15.00)

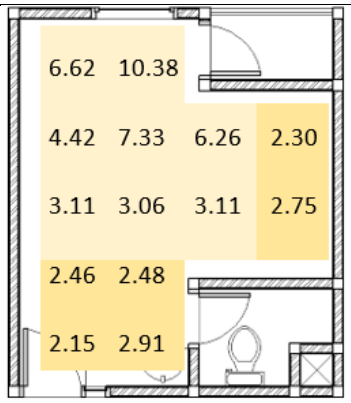
Pengukuran 1



Pengukuran 2



Pengukuran 3

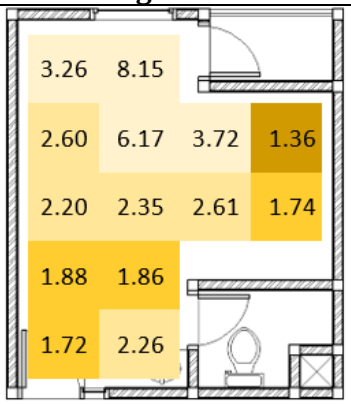


5.00
2.50
1.50
0.50
0.10

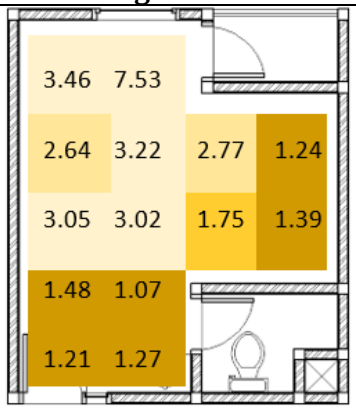
Lampiran 4. Nilai DF hasil pengukuran eksisting pada kondisi langit *overcast*

Nilai DF pada waktu Pagi (09.00)

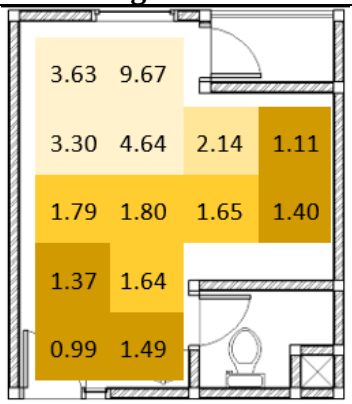
Pengukuran 1



Pengukuran 2



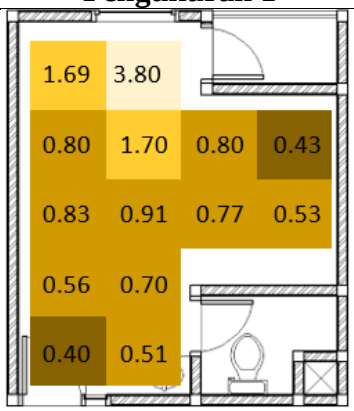
Pengukuran 3



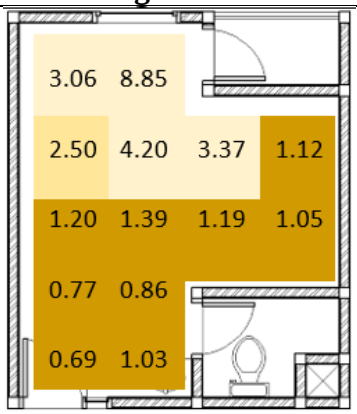
5.00
2.50
1.50
0.50
0.10

Nilai DF pada waktu Siang (12.00)

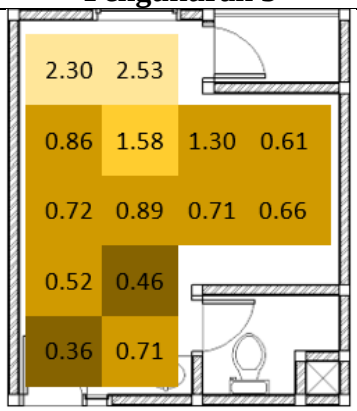
Pengukuran 1



Pengukuran 2



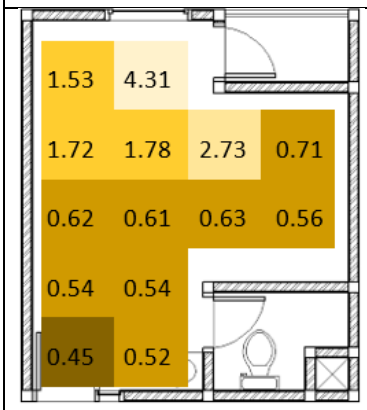
Pengukuran 3



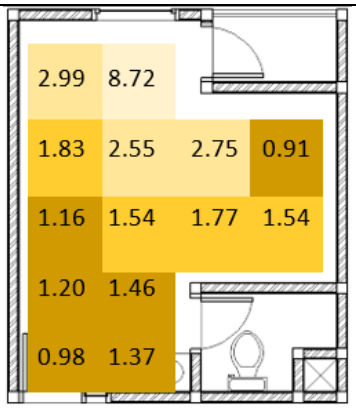
5.00
2.50
1.50
0.50
0.10

Nilai DF pada waktu Sore (15.00)

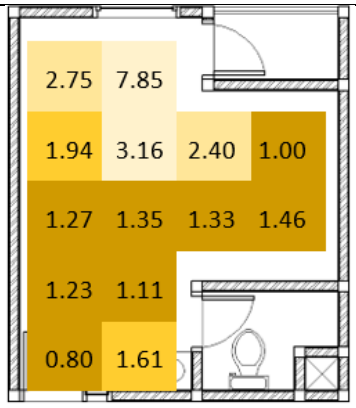
Pengukuran 1



Pengukuran 2



Pengukuran 3



5.00
2.50
1.50
0.50
0.10

Lampiran 5. Data iluminan pengukuran lapangan dan simulasi *Radiance*

Waktu Pengukuran	Titik Ukur	Langit *Partly Cloudy*		Langit *Overcast*	
		Pengukuran Lapangan	Simulasi *Radiance*	Pengukuran Lapangan	Simulasi *Radiance*
Pagi (09.00)	TUU1	1299	1115.22	1112	952.09
	TUU2	1143	546.43	982	480.21
	TUU3	507	320.2	539	319.55
	TUU4	330	241.12	301	233.96
	TUU5	177	220.31	176	180.76
	TUS1	2530	1218.96	2250	1629.08
	TUS2	1140	490.01	998	560.6
	TUS3	499	309.73	481	305.75
	TUS4	272	240.52	240	225.18
	TUS5	215	240.57	198	222.06
	TUS6	422	310.1	369	399.34
	TUS7	324	245.85	325	276
	TUS8	192	162.11	154	161.02
	TUS9	240	190.2	187	183.98
Siang (12.00)	TUU1	939	380.15	709	1188.22
	TUU2	795	227.78	582	633.08
	TUU3	536	154.87	391	386.11
	TUU4	316	124.39	280	312.72
	TUU5	257	101.98	200	238.38
	TUS1	2033	650.71	1760	2140.53
	TUS2	1000	236.26	814	709.34
	TUS3	578	154.29	325	396.57
	TUS4	376	127.34	238	321.05
	TUS5	317	104.9	223	325.22
	TUS6	808	157.19	337	518.06
	TUS7	557	134.65	297	356.94
	TUS8	294	95.8	192	209.68
	TUS9	365	102.22	209	272.26
Sore (15.00)	TUU1	680	666.71	568	795.9
	TUU2	677	465.93	511	445.54
	TUU3	402	318.43	388	280.13
	TUU4	293	249.11	280	197.19
	TUU5	217	239.1	219	143.29
	TUS1	1627	1454.03	1440	1398.38
	TUS2	780	547.43	593	476.55
	TUS3	410	320.97	399	251.97
	TUS4	253	280.75	289	186.39
	TUS5	238	301.6	189	212.13
	TUS6	576	458.83	498	335.72
	TUS7	308	321.96	375	224.98
	TUS8	204	195.36	201	142.63
	TUS9	243	241.76	242	163.93

Lampiran 6. Data *daylight factor* pengukuran lapangan dan simulasi *Radiance*

Titik Ukur	Pengukuran 1		Pengukuran 2		Pengukuran 3	
	Pengukuran Lapangan	Simulasi *Radiance*	Pengukuran Lapangan	Simulasi *Radiance*	Pengukuran Lapangan	Simulasi *Radiance*
TUU1	3.80	13.11	8.85	13.11	2.53	13.11
TUU2	1.70	5.66	4.20	5.66	1.58	5.66
TUU3	0.91	4.16	1.39	4.16	0.89	4.16
TUU4	0.70	3.48	0.86	3.48	0.46	3.48
TUU5	0.51	3.89	1.03	3.89	0.71	3.89
TUS1	1.69	8.18	3.06	8.18	2.30	8.18
TUS2	0.80	5.37	2.50	5.37	0.86	5.37
TUS3	0.83	3.97	1.20	3.97	0.72	3.97
TUS4	0.56	3.51	0.77	3.51	0.52	3.51
TUS5	0.40	3.12	0.69	3.12	0.36	3.12
TUS6	0.80	4.56	3.37	4.56	1.30	4.56
TUS7	0.77	3.79	1.19	3.79	0.71	3.79
TUS8	0.43	3.31	1.12	3.31	0.61	3.31
TUS9	0.53	3.51	1.05	3.51	0.66	3.51

Lampiran 7. Hasil simulasi iluminan dari sudut kisi-kisi *folding shutter*

Simulasi waktu pagi (09.00)													
Titik ukur	**Simulasi Ekisting**	**FS1**				**FS2**				**FS3**			
		0°	**45°**	**90°**	**135°**	**0°**	**45°**	**90°**	**135°**	**0°**	**45°**	**90°**	**135°**
TUU1	1768	1496	1298	1274	1479	1249	1143	1182	1401	1306	1229	1150	1394
TUU2	691	572	352	389	532	512	392	475	499	500	458	448	480
TUU3	395	321	192	194	274	307	277	248	299	292	256	247	244
TUU4	304	219	180	181	224	208	228	205	199	216	186	191	195
TUU5	283	260	208	222	189	199	151	193	191	248	154	221	218
TUS1	1650	1266	1043	1238	1437	1013	833	980	1171	1106	980	973	1180
TUS2	739	569	475	388	573	632	479	555	554	539	559	454	522
TUS3	466	351	264	234	286	358	305	287	330	298	266	307	304
TUS4	325	224	158	175	210	260	212	164	245	201	213	219	207
TUS5	279	195	230	211	165	221	172	182	149	219	194	152	161
TUS6	426	354	231	226	335	347	269	289	272	314	306	265	295
TUS7	346	243	175	166	228	239	188	198	224	253	226	212	238
TUS8	214	145	115	115	145	152	118	125	134	136	134	117	128
TUS9	246	178	124	131	170	171	138	129	154	169	180	152	153
Rata-rata	581	457	360	367	446	419	350	372	416	414	382	365	409
Rasio Uniformitas	0.37	0.32	0.32	0.31	0.32	0.36	0.34	0.34	0.32	0.33	0.35	0.32	0.31

Simulasi waktu siang (12.00)													
Titik ukur	**Simulasi Eksisting**	**FS1**				**FS2**				**FS3**			
		0°	**45°**	**90°**	**135°**	**0°**	**45°**	**90°**	**135°**	**0°**	**45°**	**90°**	**135°**
TUU1	1597	1033	902	987	1331	922	777	1007	1078	916	857	790	970
TUU2	476	344	254	288	351	357	310	310	355	357	336	274	333
TUU3	293	193	168	166	193	196	170	176	200	223	213	191	200
TUU4	247	158	138	132	129	152	152	124	159	177	171	131	153
TUU5	207	166	131	110	110	153	103	208	152	178	154	99	158
TUS1	779	532	486	512	646	494	424	525	565	523	493	444	525
TUS2	451	306	250	254	316	331	289	294	344	339	306	285	333
TUS3	285	198	166	158	195	198	180	168	201	219	207	179	202
TUS4	215	150	124	138	140	135	126	122	149	177	155	128	157
TUS5	191	104	92	97	95	107	108	102	115	148	136	95	110
TUS6	355	235	205	196	220	250	221	217	279	256	234	200	233
TUS7	271	185	143	138	168	171	176	155	173	199	176	157	173
TUS8	182	100	127	122	108	103	93	112	134	125	117	99	133
TUS9	216	120	102	108	131	122	108	103	115	158	138	124	132
Rata-rata	412	273	235	243	295	264	231	259	287	285	264	228	272
Rasio Uniformitas	0.44	0.37	0.39	0.40	0.32	0.39	0.40	0.39	0.40	0.44	0.44	0.42	0.40

Simulasi waktu sore (15.00)													
Titik ukur	**Simulasi Eksisting**	**FS1**				**FS2**				**FS3**			
		0°	**45°**	**90°**	**135°**	**0°**	**45°**	**90°**	**135°**	**0°**	**45°**	**90°**	**135°**
TUU1	2235	1527	1527	1668	1955	1418	1370	1488	1515	1588	1463	1437	1743
TUU2	837	511	468	418	628	541	479	524	639	566	472	493	567
TUU3	474	335	239	261	304	250	271	217	336	292	276	289	299
TUU4	328	222	174	174	237	228	191	201	240	248	209	199	243
TUU5	448	329	267	265	338	274	267	171	193	203	336	252	238
TUS1	967	720	613	675	780	624	566	578	692	652	612	627	661
TUS2	677	431	334	375	522	417	384	390	431	396	412	365	481
TUS3	433	270	237	211	288	270	252	255	301	272	286	234	277
TUS4	344	231	170	168	217	179	162	177	196	174	188	171	190
TUS5	304	155	177	135	185	154	151	129	161	134	190	142	172
TUS6	746	442	387	424	593	373	430	422	522	404	404	381	482
TUS7	440	307	194	203	273	319	282	198	398	319	270	254	241
TUS8	260	166	127	142	168	140	134	124	152	151	202	133	153
TUS9	347	239	175	218	250	201	183	168	226	212	198	196	197
Rata-rata	631	420	364	381	481	385	366	360	429	401	394	370	425
Rasio Uniformitas	0.41	0.37	0.35	0.35	0.35	0.36	0.37	0.34	0.35	0.33	0.48	0.36	0.36

Lampiran 8. Persentase distribusi cahaya dari sudut kisi-kisi *folding shutter*

Simulasi waktu pagi (09.00)							
Model Simulasi	**Pembayangan**			**Pemantulan cahaya**			
	TUU1 (lux)	**Selisih**	**% Penurunan**	**TUU4 (lux)**	**TUU5 (lux)**	**Selisih**	**% Kenaikan**
Eksisting	1768	-	-	304	283	-21	-6.91 %
FS1 - 0	1496	272	15.38 %	219	260	41	18.72 %
FS1 - 45	1298	470	26.58 %	180	208	28	15.56 %
FS1 - 90	1274	494	27.94 %	181	222	41	22.65 %
FS1 - 135	1479	289	16.35 %	224	189	-35	-15.63 %
FS2 - 0	1249	519	29.36 %	208	199	-9	-4.33 %
FS2 - 45	1143	625	35.35 %	228	151	-77	-33.77 %
FS2 - 90	1182	586	33.14 %	205	193	-12	-5.85 %
FS2 - 135	1401	367	20.76 %	199	191	-8	-4.02 %
FS3 - 0	1306	462	26.13 %	216	248	32	14.81 %
FS3 - 45	1229	539	30.49 %	186	154	-32	-17.20 %
FS3 - 90	1150	618	34.95 %	191	221	30	15.71 %
FS3 - 135	1394	374	21.15 %	195	218	23	11.79 %
Simulasi waktu siang (12.00)							
Model Simulasi	**Pembayangan**			**Pemantulan cahaya**			
	TUU1 (lux)	**Selisih**	**% Penurunan**	**TUU4 (lux)**	**TUU5 (lux)**	**Selisih**	**% Kenaikan**
Eksisting	1597	-	-	247	207	-40	-19.32 %
FS1 - 0	1033	564	35.32 %	158	166	8	4.82 %
FS1 - 45	902	695	43.52 %	180	131	-49	-37.40 %
FS1 - 90	987	610	38.20 %	132	110	-22	-20.00 %
FS1 - 135	1331	266	16.66 %	129	110	-19	-17.27 %
FS2 - 0	922	675	42.27 %	152	153	1	0.65 %
FS2 - 45	777	820	51.35 %	152	103	-49	-47.57 %
FS2 - 90	1007	590	36.94 %	124	208	84	40.38 %
FS2 - 135	1078	519	32.50 %	159	152	-7	-4.61 %
FS3 - 0	916	681	42.64 %	177	178	1	0.56 %
FS3 - 45	857	740	46.34 %	171	154	-17	-11.04 %
FS3 - 90	790	807	50.53 %	131	99	-32	-32.32 %
FS3 - 135	970	627	39.26 %	153	158	5	3.16 %
Simulasi waktu sore (15.00)							
Model Simulasi	**Pembayangan**			**Pemantulan cahaya**			
	TUU1 (lux)	**Selisih**	**% Penurunan**	**TUU4 (lux)**	**TUU5 (lux)**	**Selisih**	**% Kenaikan**
Eksisting	2235	-	-	328	448	120	26.79 %
FS1 - 0	1527	708	31.68 %	222	329	107	32.52 %
FS1 - 45	1527	708	31.68 %	174	267	93	34.83 %
FS1 - 90	1668	567	25.37 %	174	265	91	34.34 %
FS1 - 135	1955	280	12.53 %	237	338	101	29.88 %
FS2 - 0	1418	817	36.55 %	228	274	46	16.79 %
FS2 - 45	1370	865	38.70 %	191	267	76	28.46 %
FS2 - 90	1488	747	33.42 %	201	171	-30	-17.54 %
FS2 - 135	1515	720	32.21 %	240	193	-47	-24.35 %
FS3 - 0	1588	647	28.95 %	248	203	-45	-22.17 %
FS3 - 45	1463	772	34.54 %	209	336	127	37.80 %
FS3 - 90	1437	798	35.70 %	199	252	53	21.03 %
FS3 - 135	1743	492	22.01 %	243	238	-5	-2.10 %

Lampiran 9. Hasil simulasi iluminan dari konfigurasi operatif *folding shutter*

Simulasi waktu pagi (09.00)																
Titik ukur	**Eksisting**	**FS1**					**FS2**					**FS3**				
		KO1	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**
TUU1	1768	1496	1408	1391	1307	1376	1249	1268	1283	1308	1394	1306	1240	1457	1367	1340
TUU2	691	572	507	520	510	504	512	580	476	522	543	500	484	448	522	477
TUU3	395	321	256	294	273	280	307	317	207	341	305	292	272	252	287	280
TUU4	304	219	201	226	244	223	208	248	238	189	219	216	203	188	213	214
TUU5	283	260	184	194	212	212	199	232	243	212	224	248	244	225	211	227
TUS1	1650	1266	1179	1112	1164	1146	1013	1071	1033	1046	1103	1106	1036	1200	1185	1094
TUS2	739	569	547	596	542	584	632	576	632	617	653	539	529	515	578	521
TUS3	466	351	289	363	327	324	358	309	279	296	353	298	310	321	309	293
TUS4	325	224	230	246	206	245	260	220	256	210	222	201	217	216	222	198
TUS5	279	195	155	200	197	194	221	225	173	197	236	219	175	185	172	197
TUS6	426	354	301	323	283	278	347	309	326	334	336	314	296	303	300	290
TUS7	346	243	239	262	222	234	239	280	259	246	276	253	240	250	241	246
TUS8	214	145	133	144	134	138	152	156	133	164	133	136	134	137	153	136
TUS9	246	178	169	179	155	171	171	152	157	157	164	169	163	153	169	163
Rata-rata	581	457	414	432	413	422	419	425	407	417	440	414	396	418	424	405
Deviasi iluminan	503	415	394	374	369	379	333	343	348	352	375	356	336	403	384	364

Simulasi waktu siang (12.00)																
Titik ukur	**Eksisting**	**FS1**					**FS2**					**FS3**				
		KO1	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**
TUU1	1597	1033	1105	1078	887	940	922	1053	1010	987	1066	916	909	1010	960	1014
TUU2	476	344	323	385	313	338	357	354	358	352	371	357	320	306	323	334
TUU3	293	193	185	202	196	213	196	199	214	210	211	223	195	192	190	212
TUU4	247	158	138	150	149	163	152	148	169	171	165	177	147	139	150	152
TUU5	207	166	135	138	150	185	153	157	111	180	180	178	202	131	149	124
TUS1	779	532	526	541	467	567	494	504	530	524	584	523	479	504	505	487
TUS2	451	306	313	322	310	327	331	310	318	320	333	339	308	290	321	300
TUS3	285	198	207	212	200	193	198	203	211	205	198	219	192	186	196	206
TUS4	215	150	153	159	141	158	135	145	149	158	150	177	141	144	139	153
TUS5	191	104	105	129	112	120	107	103	114	123	127	148	102	104	98	121
TUS6	355	235	252	272	225	218	250	242	252	225	269	256	208	218	228	243
TUS7	271	185	179	180	172	184	171	174	178	176	191	199	175	171	174	178
TUS8	182	100	104	121	101	105	103	105	115	111	110	125	102	101	105	105
TUS9	216	120	131	138	132	130	122	131	126	138	144	158	126	118	133	127
Rata-rata	412	273	275	288	254	274	264	273	275	277	293	285	258	258	262	268
Deviasi iluminan	377	247	265	257	207	226	220	250	242	232	256	210	213	242	229	239

Simulasi waktu sore (15.00)																
Titik ukur	**Eksisting**	**FS1**					**FS2**					**FS3**				
		KO1	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**
TUU1	2235	1527	1725	1657	1665	1787	1418	1474	1484	1498	1574	1588	1643	1689	1720	1744
TUU2	837	511	645	640	546	606	541	549	599	578	582	566	549	548	576	557
TUU3	474	335	320	317	330	301	250	288	321	387	327	292	298	297	321	335
TUU4	328	222	267	250	261	267	228	189	197	252	222	248	230	215	248	238
TUU5	448	329	314	265	358	323	274	178	279	223	412	203	347	331	352	364
TUS1	967	720	724	683	714	759	624	591	641	654	626	652	651	680	693	675
TUS2	677	431	476	506	469	475	417	463	452	471	446	396	425	409	435	465
TUS3	433	270	322	334	320	321	270	283	273	300	274	272	286	261	303	299
TUS4	344	231	217	224	244	223	179	204	226	244	211	174	210	205	214	224
TUS5	304	155	150	180	171	193	154	142	138	148	163	134	170	193	185	145
TUS6	746	442	497	449	278	438	373	499	552	453	554	404	360	465	503	410
TUS7	440	307	276	315	316	311	319	291	280	314	301	319	312	293	320	275
TUS8	260	166	158	161	188	154	140	129	138	149	133	151	168	158	160	152
TUS9	347	239	270	193	194	203	201	210	216	256	218	212	239	240	178	222
Rata-rata	631	420	454	441	432	454	385	392	414	423	432	401	421	427	443	436
Deviasi iluminan	510	353	404	387	385	419	330	348	350	345	365	374	378	392	400	406

Lampiran 10. Hasil simulasi *daylight factor* dari sudut kisi-kisi *folding shutter*

Model FS1													
Titik ukur	**Eksi-sting**	**0°**	**15°**	**30°**	**45°**	**60°**	**75°**	**90°**	**105°**	**120°**	**135°**	**150°**	**165°**
TUU1	13.11	9.51	9.73	9.79	11.5	9.94	10.3	9.61	11.5	10.8	9.21	9.93	10.5
TUU2	5.66	5.09	4.48	4.59	5.37	4.06	4.64	4.22	5.01	4.34	3.97	4.77	4.79
TUU3	4.16	3.9	3.72	3.67	3.64	3.49	3.41	3.32	3.51	3.52	2.88	3.44	3.28
TUU4	3.48	3.36	3.43	3.34	3.24	3.1	3.22	2.86	3.3	3.06	2.8	3	2.79
TUU5	3.89	3.32	3.45	3.05	3.05	3.26	3.46	3.02	3.38	3.44	2.72	3.12	2.9
TUS1	8.18	6.33	6.63	6.7	7.42	6.77	6.73	6.73	7.17	7.1	5.94	7.09	6.55
TUS2	5.37	4.43	4.54	4.67	4.87	4.09	4.23	4.08	4.68	4.45	3.91	4.52	4.68
TUS3	3.97	3.79	3.74	3.66	3.75	3.42	3.39	2.96	3.59	3.47	2.92	3.53	3.34
TUS4	3.51	3.17	3.3	3.05	3.34	3.07	3.05	2.63	3.14	3.06	2.74	3.05	2.83
TUS5	3.12	2.96	2.81	2.89	2.83	2.73	2.69	2.54	2.93	2.86	2.56	2.59	2.5
TUS6	4.56	3.97	4.28	3.99	4.2	3.61	3.65	3.37	4.03	3.76	3.15	3.82	3.58
TUS7	3.79	3.61	3.79	3.5	3.64	3.42	3.41	2.99	3.48	3.38	2.94	3.49	3.1
TUS8	3.31	3.18	3.15	3.21	3.21	3.12	3.19	2.72	3.22	3.08	2.63	2.82	2.55
TUS9	3.51	3.49	3.37	3.24	3.29	3.04	3.12	2.66	3.26	3.25	2.81	3.08	2.75
Rata-rata	4.97	4.29	4.32	4.24	4.53	4.08	4.18	3.84	4.45	4.26	3.66	4.16	4.01
Persentase titik ukur FS1 dalam Standar DF													
< 2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2 – 5%	71%	79%	86%	86%	79%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%
> 5%	29%	21%	14%	14%	21%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%

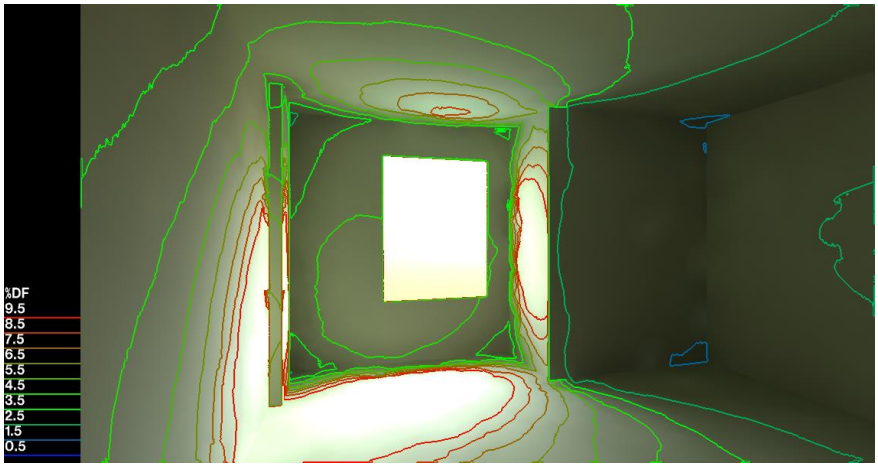
Model FS2													
Titik ukur	**Eksi-sting**	**0°**	**15°**	**30°**	**45°**	**60°**	**75°**	**90°**	**105°**	**120°**	**135°**	**150°**	**165°**
TUU1	13.1	8.2	8.68	9.28	9.96	9.05	8.66	10.0	9.58	9.58	8.01	9.07	9.34
TUU2	5.66	4.64	4.8	4.71	5.22	4.66	4.62	4.97	5.17	4.66	4.67	5.18	5.15
TUU3	4.16	3.75	3.75	3.68	3.94	3.62	3.52	3.86	3.68	3.67	3.79	3.92	3.75
TUU4	3.48	3.22	3.36	3.41	3.37	3.27	3.24	3.42	3.2	3.22	3.32	3.53	3.32
TUU5	3.89	3.61	3.66	3.11	3.64	3.32	3.35	3.94	3.48	3.32	3.3	3.67	3.64
TUS1	8.18	6.03	6.13	5.97	6.75	5.83	6.02	6.87	6.14	5.98	5.46	6.31	6.37
TUS2	5.37	4.4	4.44	4.75	5.05	4.34	4.45	4.76	4.54	4.61	4.61	4.81	4.73
TUS3	3.97	3.7	3.75	3.62	3.88	3.65	3.52	3.5	3.75	3.86	3.64	3.95	3.79
TUS4	3.51	3.27	3.21	3.31	3.5	3.19	3.25	3.28	3.27	3.21	3.36	3.45	3.19
TUS5	3.12	2.93	3.07	3.1	2.99	2.94	3.05	2.89	2.83	2.9	2.87	3.18	2.95
TUS6	4.56	4.19	3.88	4.08	4.04	4.05	4.08	4.12	3.86	4.12	3.97	4.1	4.49
TUS7	3.79	3.42	3.59	3.47	3.73	3.74	3.56	3.55	3.55	3.55	3.44	3.7	3.69
TUS8	3.31	3.19	3.2	3.17	3.19	3.13	3.12	3.2	3.12	3.11	3.06	3.15	3.23
TUS9	3.51	3.33	3.41	3.38	3.41	3.25	3.18	3.34	3.25	3.25	3.23	3.21	3.44
Rata-rata	4.97	4.13	4.21	4.22	4.48	4.15	4.12	4.41	4.24	4.22	4.05	4.37	4.36

Persentase titik ukur FS2 dalam Standar DF													
< 2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2 – 5%	71%	86%	86%	86%	71%	86%	86%	86%	79%	86%	86%	79%	79%
> 5%	29%	14%	14%	14%	29%	14%	14%	14%	21%	14%	14%	21%	21%

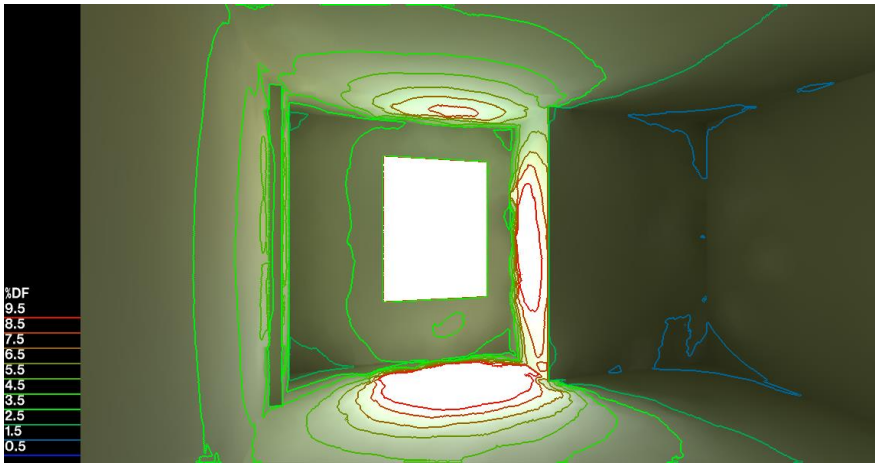
Model FS3													
Titik ukur	**Eksi-sting**	**0°**	**15°**	**30°**	**45°**	**60°**	**75°**	**90°**	**105°**	**120°**	**135°**	**150°**	**165°**
TUU1	13.1	9.24	8.78	8.32	8.74	8.06	8.29	8.51	9.89	9.72	10.1	10.5	9.65
TUU2	5.66	4.65	4.41	4.4	4.35	4.33	4.24	4.36	4.43	4.67	4.94	4.91	4.74
TUU3	4.16	3.56	3.62	3.58	3.54	3.44	3.34	3.38	3.5	3.72	3.66	3.62	3.79
TUU4	3.48	3.41	3.25	3.17	3.13	3.16	2.99	3.15	3.17	3.35	3.36	3.37	3.24
TUU5	3.89	3.36	3.19	3.55	3.43	3.2	3.07	3.61	3.26	3.73	3.48	3.47	3.45
TUS1	8.18	5.98	5.75	5.56	5.57	5.27	5.72	5.68	6.05	6.1	6.62	6.67	6.29
TUS2	5.37	4.41	4.23	4.26	4.23	4.05	3.98	3.92	4.27	4.43	4.69	4.58	4.64
TUS3	3.97	3.64	3.53	3.74	3.5	3.43	3.39	3.32	3.66	3.72	3.59	3.73	3.69
TUS4	3.51	3.27	3.14	3.11	3.07	3.04	3.04	3.02	3.11	3.19	3.27	3.25	3.28
TUS5	3.12	2.8	2.84	2.87	2.8	2.74	2.94	2.79	2.82	2.94	2.82	3.02	2.89
TUS6	4.56	4.07	3.96	3.94	3.65	3.65	3.78	3.51	4.01	4.04	3.87	4.2	4.05
TUS7	3.79	3.55	3.45	3.58	3.48	3.54	3.38	3.48	3.58	3.52	3.68	3.62	3.78
TUS8	3.31	3.1	3.09	3.07	3.1	3.11	3.01	3.01	3.31	3.19	3.16	3.2	3.15
TUS9	3.51	3.29	3.31	3.26	3.16	3.14	3.13	3.17	3.38	3.21	3.34	3.38	3.44
Rata-rata	4.97	4.17	4.04	4.03	3.98	3.87	3.88	3.98	4.17	4.25	4.33	4.40	4.29
Persentase titik ukur FS3 dalam Standar DF													
< 2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2 – 5%	71%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%
> 5%	29%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%

Lampiran 11. Grafik DF pada kondisi eksisting

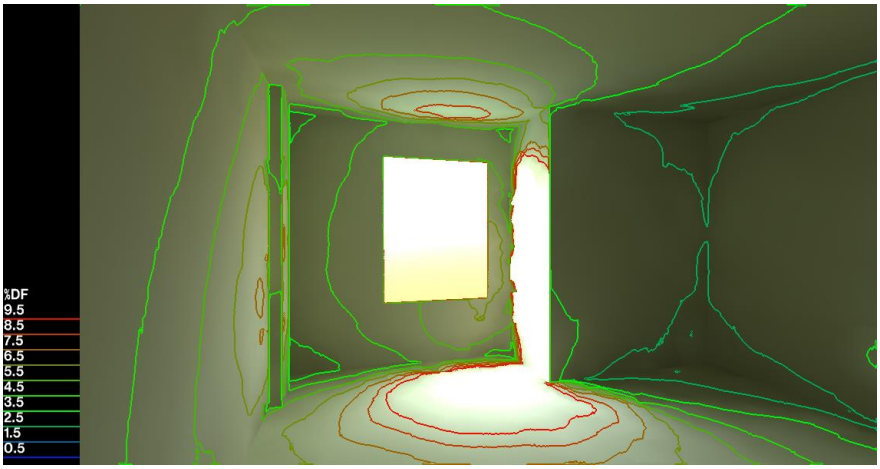
1. Waktu Pagi (09.00)



2. Waktu Siang (12.00)



3. Waktu Sore (15.00)



Lampiran 12. Hasil simulasi *daylight factor* dari konfigurasi operatif *folding shutter*

Titik ukur	**Simulasi Eksisting**	**FS1**					**FS2**					**FS3**				
		KO1	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**
TUU1	13.11	9.51	10.29	10.42	10.31	10.14	8.2	9.19	9.42	9.73	9.38	9.24	9.43	9.9	10.21	9.98
TUU2	5.66	5.09	5.31	5.16	4.91	4.88	4.64	4.98	5.14	5.45	5.1	4.65	4.79	4.67	4.78	4.85
TUU3	4.16	3.9	3.98	3.92	3.86	3.82	3.75	3.72	3.61	3.87	4.06	3.56	3.62	3.57	3.7	3.75
TUU4	3.48	3.36	3.27	3.39	3.46	3.52	3.22	3.3	3.39	3.54	3.56	3.41	3.31	3.27	3.38	3.44
TUU5	3.89	3.32	3.68	3.47	3.89	3.55	3.61	3.58	3.57	3.44	4.07	3.36	3.43	3.66	3.62	3.65
TUS1	8.18	6.33	6.67	6.93	6.46	6.36	6.03	6.66	6.65	6.07	6.47	5.98	5.95	6.48	6.44	6.36
TUS2	5.37	4.43	4.9	4.84	5.09	4.72	4.4	4.65	4.82	4.71	4.94	4.41	4.33	4.31	4.66	4.6
TUS3	3.97	3.79	3.75	3.73	3.65	3.76	3.7	3.74	3.84	3.79	3.88	3.64	3.47	3.59	3.81	3.79
TUS4	3.51	3.17	3.37	3.37	3.37	3.27	3.27	3.29	3.16	3.44	3.24	3.27	3.18	3.2	3.36	3.28
TUS5	3.12	2.96	3.1	2.93	3.13	3.07	2.93	2.95	2.94	3.1	3.06	2.8	3.04	3.06	2.85	2.96
TUS6	4.56	3.97	4.3	4.51	4	4.24	4.19	3.85	4.31	4.31	4.25	4.07	3.97	3.83	4.18	4.17
TUS7	3.79	3.61	3.71	3.66	3.75	3.78	3.42	3.58	3.69	3.67	3.68	3.55	3.57	3.46	3.68	3.72
TUS8	3.31	3.18	3.21	3.18	3.2	3.21	3.19	3.23	3.19	3.13	3.18	3.1	3.17	3.17	3.23	3.31
TUS9	3.51	3.49	3.3	3.43	3.47	3.43	3.33	3.42	3.37	3.44	3.37	3.29	3.32	3.3	3.35	3.41
Rata-rata	4.97	4.29	4.49	4.50	4.47	4.41	4.13	4.30	4.36	4.41	4.45	4.17	4.18	4.25	4.38	4.38
Persentase titik ukur dalam Standar DF																
Rentang DF	**Eksisting**	**FS1**					**FS2**					**FS3**				
		KO1	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**	**KO1**	**KO2**	**KO3**	**KO4**	**KO5**
< 2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2 – 5%	71%	86%	79%	79%	79%	86%	86%	86%	79%	79%	79%	86%	86%	86%	86%	86%
> 5%	29%	14%	21%	21%	21%	14%	14%	14%	21%	21%	21%	14%	14%	14%	14%	14%

Lampiran 13. Hasil simulasi *daylight factor* dari jarak penempatan *folding shutter*

Penambahan jarak dari fasad										
Titik ukur	**Simulasi Eksisting**	**FS1**			**FS2**			**FS3**		
		0	**30**	**50**	**0**	**30**	**50**	**0**	**30**	**50**
TUU1	13.11	9.51	10.01	10.98	8.2	10.5	11.01	9.24	9.72	10.53
TUU2	5.66	5.09	5.12	5.27	4.64	5.21	5.41	4.65	5	5.14
TUU3	4.16	3.9	4.05	3.78	3.75	3.81	3.95	3.56	3.96	4
TUU4	3.48	3.36	3.52	3.51	3.22	3.47	3.45	3.41	3.43	3.56
TUU5	3.89	3.32	3.68	3.52	3.61	3.29	3.44	3.36	3.4	3.62
TUS1	8.18	6.33	6.58	7.22	6.03	7.24	7.51	5.98	6.72	7.17
TUS2	5.37	4.43	4.69	4.96	4.4	4.85	4.88	4.41	4.57	4.89
TUS3	3.97	3.79	3.78	3.86	3.7	3.55	4.01	3.64	3.75	3.81
TUS4	3.51	3.17	3.49	3.23	3.27	3.34	3.46	3.27	3.38	3.38
TUS5	3.12	2.96	3.1	3.06	2.93	2.84	2.95	2.8	3.07	2.97
TUS6	4.56	3.97	4.07	4.31	4.19	3.96	4.32	4.07	4.23	4.37
TUS7	3.79	3.61	3.72	3.65	3.42	3.8	3.85	3.55	3.67	3.77
TUS8	3.31	3.18	3.18	3.93	3.19	3.34	3.26	3.1	3.2	3.24
TUS9	3.51	3.49	3.4	3.36	3.33	3.37	3.37	3.29	3.33	3.33
Rata-rata	4.97	4.29	4.46	4.62	4.13	4.47	4.63	4.17	4.39	4.56
Persentase titik ukur dalam Standar DF										
Rentang	**Simulasi Eksisting**	**FS1**			**FS2**			**FS3**		
		0	**30**	**50**	**0**	**30**	**50**	**0**	**30**	**50**
< 2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2 – 5%	71%	79%	79%	79%	86%	79%	79%	86%	86%	79%
> 5%	29%	21%	21%	21%	14%	21%	21%	14%	14%	21%

Penambahan jarak dari fasad + *overhang*										
Titik ukur	**Simulasi Eksisting**	**FS1**			**FS2**			**FS3**		
		0	**30**	**50**	**0**	**30**	**50**	**0**	**30**	**50**
TUU1	13.11	9.51	8.88	9.1	8.2	9.32	8.48	9.24	9.14	8.43
TUU2	5.66	5.09	4.81	4.48	4.64	4.46	4.69	4.65	4.5	4.65
TUU3	4.16	3.9	3.6	3.73	3.75	3.52	3.72	3.56	3.66	3.36
TUU4	3.48	3.36	3.52	3.3	3.22	3.29	3.23	3.41	3.23	3.17
TUU5	3.89	3.32	3.75	3.54	3.61	3.95	2.95	3.36	3.38	3.21
TUS1	8.18	6.33	5.96	5.89	6.03	5.81	5.86	5.98	5.94	5.88
TUS2	5.37	4.43	4.39	4.13	4.4	4.45	4.37	4.41	4.2	4.08
TUS3	3.97	3.79	3.55	3.48	3.7	3.61	3.57	3.64	3.59	3.55
TUS4	3.51	3.17	3.24	3.2	3.27	3.36	3.13	3.27	3.23	3.04
TUS5	3.12	2.96	3	2.84	2.93	3	2.82	2.8	2.82	2.91
TUS6	4.56	3.97	4.13	3.97	4.19	3.84	3.93	4.07	4	3.88
TUS7	3.79	3.61	3.67	3.56	3.42	3.75	3.49	3.55	3.57	3.4
TUS8	3.31	3.18	3.13	3.12	3.19	3.14	3.09	3.1	3.15	3.11
TUS9	3.51	3.49	3.28	3.32	3.33	3.34	3.29	3.29	3.28	3.21
Rata-rata	4.97	4.29	4.21	4.12	4.13	4.20	4.04	4.17	4.12	3.99
Persentase titik ukur dalam Standar DF										
Rentang	**Simulasi Eksisting**	**FS1**			**FS2**			**FS3**		
		0	**30**	**50**	**0**	**30**	**50**	**0**	**30**	**50**
< 2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2 – 5%	71%	79%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%	86%
> 5%	29%	21%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%	14%

Lampiran 14. Perhitungan Kuat hubungan dengan Korelasi *Spearman*

1) Korelasi antara sudut kisi-kisi *shutter* dan performa penerangan alami

Keterangan: X = Rata-rata iluminan tanpa penerapan model (eksisting), dan

Y = Rata-rata iluminan dengan penerapan model *folding shutter*

Model : FS1			**Sub variabel : Sudut kisi-kisi *shutter***				
Waktu simulasi	**Sudut kisi-kisi**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS1- 0°	581	457	6.5	2	4.5	20.25
	FS1- 45°	581	360	6.5	8	-1.5	2.25
	FS1- 90°	581	367	6.5	6	0.5	0.25
	FS1- 135°	581	446	6.5	3	3.5	12.25
Siang	FS1- 0°	412	273	10.5	10	0.5	0.25
	FS1- 45°	412	235	10.5	12	-1.5	2.25
	FS1- 90°	412	243	10.5	11	-0.5	0.25
	FS1- 135°	412	295	10.5	9	1.5	2.25
Sore	FS1- 0°	631	420	2.5	4	-1.5	2.25
	FS1- 45°	631	364	2.5	7	-4.5	20.25
	FS1- 90°	631	381	2.5	5	-2.5	6.25
	FS1- 135°	631	481	2.5	1	1.5	2.25
						Total d_i^2	71
						Koefisien korelasi (ρ)	0.75

Model : FS2			**Sub variabel : Sudut kisi-kisi *shutter***				
Waktu simulasi	**Sudut kisi-kisi**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS2- 0°	581	419	6.5	2	4.5	20.25
	FS2- 45°	581	350	6.5	8	-1.5	2.25
	FS2- 90°	581	372	6.5	5	1.5	2.25
	FS2- 135°	581	416	6.5	3	3.5	12.25
Siang	FS2- 0°	412	264	10.5	10	0.5	0.25
	FS2- 45°	412	231	10.5	12	-1.5	2.25
	FS2- 90°	412	259	10.5	11	-0.5	0.25
	FS2- 135°	412	287	10.5	9	1.5	2.25
Sore	FS2- 0°	631	385	2.5	4	-1.5	2.25
	FS2- 45°	631	366	2.5	6	-3.5	12.25
	FS2- 90°	631	360	2.5	7	-4.5	20.25
	FS2- 135°	631	429	2.5	1	1.5	2.25
						Total d_i^2	79
						Koefisien korelasi (ρ)	0.72

Model : FS3			**Sub variabel : Sudut kisi-kisi *shutter***				
Waktu simulasi	**Sudut kisi-kisi**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS3- 0°	581	414	6.5	2	4.5	20.25
	FS3- 45°	581	382	6.5	6	0.5	0.25
	FS3- 90°	581	365	6.5	8	-1.5	2.25
	FS3- 135°	581	409	6.5	3	3.5	12.25
Siang	FS3- 0°	412	285	10.5	9	1.5	2.25
	FS3- 45°	412	264	10.5	11	-0.5	0.25
	FS3- 90°	412	228	10.5	12	-1.5	2.25
	FS3- 135°	412	272	10.5	10	0.5	0.25
Sore	FS3- 0°	631	401	2.5	4	-1.5	2.25
	FS3- 45°	631	394	2.5	5	-2.5	6.25
	FS3- 90°	631	370	2.5	7	-4.5	20.25
	FS3- 135°	631	425	2.5	1	1.5	2.25
						Total d_i^2	71
						Koefisien korelasi (ρ)	0.75

2) Korelasi antara konfigurasi operatif dan performa penerangan alami

Model : FS1			**Sub variabel : Konfigurasi operatif FS**				
Waktu simulasi	**Konfigurasi operatif**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS1 - KO1	581	457	8	1	7	49
	FS1 - KO2	581	414	8	9	-1	1
	FS1 - KO3	581	432	8	5.5	2.5	6.25
	FS1 - KO4	581	413	8	10	-2	4
	FS1 - KO5	581	422	8	7	1	1
Siang	FS1 - KO1	412	273	13	14	-1	1
	FS1 - KO2	412	275	13	12	1	1
	FS1 - KO3	412	288	13	11	2	4
	FS1 - KO4	412	254	13	15	-2	4
	FS1 - KO5	412	274	13	13	0	0
Sore	FS1 - KO1	631	420	3	8	-5	25
	FS1 - KO2	631	454	3	2.5	0.5	0.25
	FS1 - KO3	631	441	3	4	-1	1
	FS1 - KO4	631	432	3	5.5	-2.5	6.25
	FS1 - KO5	631	454	3	2.5	0.5	0.25
						Total d_i^2	104
						Koefisien korelasi (ρ)	0.81

Model : FS2			Sub variabel : Konfigurasi operatif FS				
Waktu simulasi	**Konfigurasi operatif**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS2 - KO1	581	419	8	5	3	9
	FS2 - KO2	581	425	8	3	5	25
	FS2 - KO3	581	407	8	8	0	0
	FS2 - KO4	581	417	8	6	2	4
	FS2 - KO5	581	440	8	1	7	49
Siang	FS2 - KO1	412	264	13	15	-2	4
	FS2 - KO2	412	273	13	14	-1	1
	FS2 - KO3	412	275	13	13	0	0
	FS2 - KO4	412	277	13	12	1	1
	FS2 - KO5	412	293	13	11	2	4
Sore	FS2 - KO1	631	385	3	10	-7	49
	FS2 - KO2	631	392	3	9	-6	36
	FS2 - KO3	631	414	3	7	-4	16
	FS2 - KO4	631	423	3	4	-1	1
	FS2 - KO5	631	432	3	2	1	1
						Total d_i^2	200
						Koefisien korelasi (ρ)	0.64

Model : FS3			Sub variabel : Konfigurasi operatif FS				
Waktu simulasi	**Konfigurasi operatif**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS3 - KO1	581	414	8	7	1	1
	FS3 - KO2	581	396	8	10	-2	4
	FS3 - KO3	581	418	8	6	2	4
	FS3 - KO4	581	424	8	4	4	16
	FS3 - KO5	581	405	8	8	0	0
Siang	FS3 - KO1	412	285	13	11	2	4
	FS3 - KO2	412	258	13	14.5	-1.5	2.25
	FS3 - KO3	412	258	13	14.5	-1.5	2.25
	FS3 - KO4	412	262	13	13	0	0
	FS3 - KO5	412	268	13	12	1	1
Sore	FS3 - KO1	631	401	3	9	-6	36
	FS3 - KO2	631	421	3	5	-2	4
	FS3 - KO3	631	427	3	3	0	0
	FS3 - KO4	631	443	3	1	2	4
	FS3 - KO5	631	436	3	2	1	1
						Total d_i^2	79.5
						Koefisien korelasi (ρ)	0.86

3) Korelasi antara jarak penempatan model dan performa penerangan alami

Model : FS1			**Sub variabel : Jarak penempatan model**				
Waktu simulasi	**Jarak penempatan (cm)**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS1- 0	581	457	5	5	0	0
	FS1- 30	581	466	5	3	2	4
	FS1- 50	581	479	5	1	4	16
Siang	FS1- 0	412	273	8	9	-1	1
	FS1- 30	412	294	8	8	0	0
	FS1- 50	412	330.14	8	7	1	1
Sore	FS1- 0	631	420	2	6	-4	16
	FS1- 30	631	475.07	2	2	0	0
	FS1- 50	631	465.29	2	4	-2	4
						Total d_i^2	42
						Koefisien korelasi (ρ)	0.65

Model : FS2			**Sub variabel : Jarak penempatan model**				
Waktu simulasi	**Jarak penempatan (cm)**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS2- 0	581	419	5	5	0	0
	FS2- 30	581	448	5	3	2	4
	FS2- 50	581	465	5	1	4	16
Siang	FS2- 0	412	264	8	9	-1	1
	FS2- 30	412	299.57	8	8	0	0
	FS2- 50	412	309.36	8	7	1	1
Sore	FS2- 0	631	385	2	6	-4	16
	FS2- 30	631	444.29	2	4	-2	4
	FS2- 50	631	463.07	2	2	0	0
						Total d_i^2	42
						Koefisien korelasi (ρ)	0.65

Model : FS3			**Sub variabel : Jarak penempatan model**				
Waktu simulasi	**Jarak penempatan (cm)**	**X**	**Y**	**Ranking X**	**Ranking Y**	d_i	d_i^2
Pagi	FS3- 0	581	414	5	5	0	0
	FS3- 30	581	447	5	3	2	4
	FS3- 50	581	461	5	2	3	9
Siang	FS3- 0	412	285	8	9	-1	1
	FS3- 30	412	291.43	8	8	0	0
	FS3- 50	412	310.00	8	7	1	1
Sore	FS3- 0	631	401	2	6	-4	16
	FS3- 30	631	437.29	2	4	-2	4
	FS3- 50	631	470.86	2	1	1	1
						Total d_i^2	36
						Koefisien korelasi (ρ)	0.70

(Halaman ini sengaja dikosongkan)