

**SIMULASI RANCANGAN BUKAAN PENCAHAYAAN
CAHAYA MATAHARI LANGSUNG**

Oleh:
RYANI GUNAWAN, ST., MT.
20090009



**FAKULTAS TEKNIK JURUSAN ARSITEKTUR
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

ABSTRAK

**SIMULASI RANCANGAN BUKAAN PENCAHAYAAN
CAHAYA MATAHARI LANGSUNG**

Oleh
RYANI GUNAWAN, ST., MT.
20090009

Penelitian ini menggunakan pendekatan rancangan pasif dan tanggap lingkungan pada bukaan pencahayaan alami siang hari. Rancangan bukaan pencahayaan menggunakan cahaya matahari langsung dari arah Timur dan Barat. Hasil rancangan ini merupakan bagian dari sistem pencahayaan yang menggunakan cahaya matahari langsung di mana terdapat beberapa komponen lain yang menyalurkan dan mendistribusikan dalam sistem pencahayaan tersebut.

Konsep bukaan pencahayaan menggunakan kaidah refleksi dan refraksi cahaya matahari langsung untuk mencapai posisi horisontal agar dapat diteruskan sedalam mungkin ke tengah gedung. Kajian dilakukan menggunakan model fisik tiga dimensi berbentuk prisma dengan bahan akrilik yang diuji secara bertahap. Pertama adalah uji refleksi dengan menggunakan cahaya laser, kedua uji refleksi dan refraksi dengan cahaya buatan dan ketiga uji refleksi dan refraksi dengan cahaya matahari.

Hasil penelitian menunjukkan prisma refleksi dan refraksi mampu membelokkan cahaya laser secara sempurna. Sedangkan uji refleksi dan refraksi dengan cahaya buatan dan cahaya matahari menunjukkan kemampuan menyalurkan cahaya matahari langsung hingga kedalaman 12 meter dari bukaan pencahayaan. Untuk mencapai tingkat pencahayaan yang seragam dilakukan kajian komposisi prisma dimana komposisi tersebut dapat meningkatkan keseragaman dari tingkat pencahayaan di dalam pipa cahaya horisontal.

Bukaan pencahayaan ini tepat digunakan pada fasad gedung-gedung tebal dengan memanfaatkan ruang plenum untuk melengkapi sistem pencahayaan samping (jendela kaca). Bukaan pencahayaan berukuran 30x30 cm mampu bekerja secara optimum pada kedalaman 2,4-4,2 meter dari bukaan pencahayaan pada simulasi di laboratorium dengan sumber cahaya sebesar 1000 lux. Sistem pencahayaan ini berpotensi meningkatkan efisiensi energi pencahayaan pada gedung.

Kata kunci: pembiasan, pemantulan, prisma akrilik

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
Bab I Pendahuluan	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan masalah.....	3
I.3 Pertanyaan penelitian.....	3
I.4 Tujuan penelitian	3
I.5 Diagram penelitian	4
I.6 Batasan penelitian.....	4
I.7 Hipotesis	5
I.8 Kontribusi penelitian	5
I.9 Sistematika Pembahasan	5
Bab II Kajian Pemanfaatan Pencahayaan Alami pada Gedung.....	7
II.1 Pemanfaatan Pencahayaan Alami Siang Hari	7
II.2 Prinsip Perjalanan Cahaya.....	12
II.3 Sistem Pencahayaan Alami siang hari.....	15
II.4 Sistem penyalur cahaya	22
II.5 Penelitian sebelumnya	31
Bab III Metodologi Penelitian	37
III.1 Pendahuluan	37
III.2 Batasan Penelitian	37
III.3 Langkah Penelitian	38
Bab IV Hasil Analisis Kinerja Prisma Pembias dan Pemantul	45
IV.2.1 Analisis keseragaman tingkat pencahayaan	47
IV.2.2 Analisis laju penurunan tingkat pencahayaan	47
IV.2.3 Analisis efisiensi tingkat pencahayaan.....	48
IV.3 Uji Kinerja Prisma Pembias dan Pemantul Menggunakan Cahaya Matahari Langsung.....	49
IV.3.1 Analisis keseragaman tingkat pencahayaan	49

IV.3.2 Analisis laju penurunan tingkat pencahayaan	49
IV.3.3 Analisis efisiensi tingkat pencahayaan	50
Bab V Simulasi Penggunaan Pipa Cahaya Horisontal.....	51
V.1 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada ruang simulasi	51
V.2 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada berbagai tipe bangunan.	61
Bab VI Kesimpulan dan Saran.....	65
Daftar Pustaka	69
Lampiran	71

Bab I Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Akhir-akhir ini terjadi fenomena pengembangan bangunan gedung di perkotaan yang cenderung vertikal dan juga sekaligus tebal. Hal ini diakibatkan karena keterbatasan lahan khususnya di kota-kota besar. Fenomena ini juga dirasakan di kota Bandung dengan mulai berkembangnya gedung hunian vertikal, gedung pusat perbelanjaan komersial maupun gedung perkantoran yang tebal sekaligus bertingkat banyak.

Saat ini pemanfaatan pencahayaan alami pada gedung-gedung tebal seperti perkantoran masih terbatas pada pencahayaan alami melalui jendela. Pencahayaan alami melalui jendela memiliki kelemahan seperti keterbatasan penetrasi cahaya langit ke dalam bangunan dan kontras yang besar antara daerah yang dekat dari jendela dengan daerah yang jauh dari jendela. Penetrasi cahaya langit yang masuk melalui jendela hanya dapat menjangkau kedalaman 1,5-2 kali tinggi jendela. Penerangan untuk daerah yang jauh dari jendela sangat bergantung pada penggunaan lampu. Harga listrik yang relatif murah menjadi salah satu kendala dalam meningkatkan teknologi penggunaan pencahayaan alami secara pasif. Sebagai akibatnya pencahayaan buatan dengan penggunaan lampu lebih digemari daripada pencahayaan alami yang lebih sulit dikendalikan.

Pengurangan beban listrik akibat penggunaan lampu pada daerah tropis bukan hanya mengurangi konsumsi energi untuk penerangan tetapi juga mengurangi beban listrik untuk pendingin udara dalam gedung. Di Indonesia, sumber utama energi listrik masih berasal dari bahan bakar fosil, yang dalam proses pembakarannya menghasilkan emisi karbon dioksida. Pengurangan beban listrik untuk penerangan merupakan salah satu langkah untuk menciptakan gedung yang hemat energi dan berkelanjutan. Hasil penelitian membuktikan bahwa pengurangan beban listrik untuk penerangan pada gedung perkantoran cukup signifikan terhadap upaya penghematan energi karena 40% dari seluruh penggunaan listrik digunakan untuk penerangan (Jenkins and Newborough, 2007; Li et al., 2006; Wah Tong To et al., 2002). Penerapan pencahayaan alami pada

gedung bukan semata-mata untuk penghematan energi saja tetapi juga untuk peningkatan kesehatan dan kepuasan penghuni (Veitch, 2006).

Indonesia dengan kondisi iklim tropis memiliki banyak cahaya matahari di sepanjang tahun. Kondisi iklim ini memberikan peluang besar bagi pemanfaatan pencahayaan alami dalam gedung. Namun pemanfaatan pencahayaan alami pada gedung memiliki beberapa kendala seperti keterbatasan lokasi site bangunan, cahaya matahari yang tidak konsisten, sedikitnya teknologi untuk memasukkan cahaya ke dalam ruangan yang jauh dari akses cahaya matahari, tingginya biaya investasi awal dan tingkat efisiensi dari teknologi tersebut. Berdasarkan beberapa batasan tersebut, penelitian ini berusaha untuk mengembangkan desain bukaan pencahayaan sebagai salah satu strategi pasif pencahayaan alami siang hari yang efektif, efisien dan terintegrasi dalam desain gedung tebal.

Berbagai upaya untuk memasukkan cahaya matahari ke tengah gedung telah dikembangkan. Upaya tersebut dilakukan dengan memanfaatkan cahaya langit ataupun cahaya matahari langsung. Keterbatasan penetrasi dari cahaya langit melalui jendela samping dapat dilengkapi dengan pemanfaatan cahaya matahari langsung untuk penerangan di daerah yang jauh dari jendela melalui pemanfaatan pipa cahaya di ruang plenum (Chirarattananon, 2000). Pemanfaatan cahaya matahari langsung dapat dilakukan dengan berbagai cara diantaranya adalah dengan memantulkan cahaya matahari langsung ke langit-langit atau di atas ketinggian mata. Cara lain adalah dengan menangkap cahaya langsung matahari tersebut, menyalurkan dan mendistribusikan ke dalam ruangan yang memerlukannya. Pada sistem penyaluran cahaya ini digunakan media penyalur berupa ruang plenum atau pipa dengan material reflektif supaya cahaya dapat disalurkan dengan efisien dan kerugian akibat pemantulan dapat dikurangi. Penelitian ini akan berfokus pada rancangan bukaan pencahayaan pada sistem penyalur cahaya supaya rancangan bukaan pencahayaan dapat menangkap dan membelokkan cahaya matahari langsung agar mencapai posisi horisontal sehingga dapat diteruskan sedalam mungkin ke tengah bangunan.

I.2 Rumusan masalah

1. Pencahayaan alami pada gedung tebal melalui penggunaan jendela samping tidak memadai.
2. Pencahayaan alami sangat diminati penghuni gedung namun memiliki karakter yang perlu ditanggulangi seperti pergerakan sudut vertikal maupun horisontal serta tingkat pencahayaan yang tidak stabil sepanjang hari.

I.3 Pertanyaan penelitian

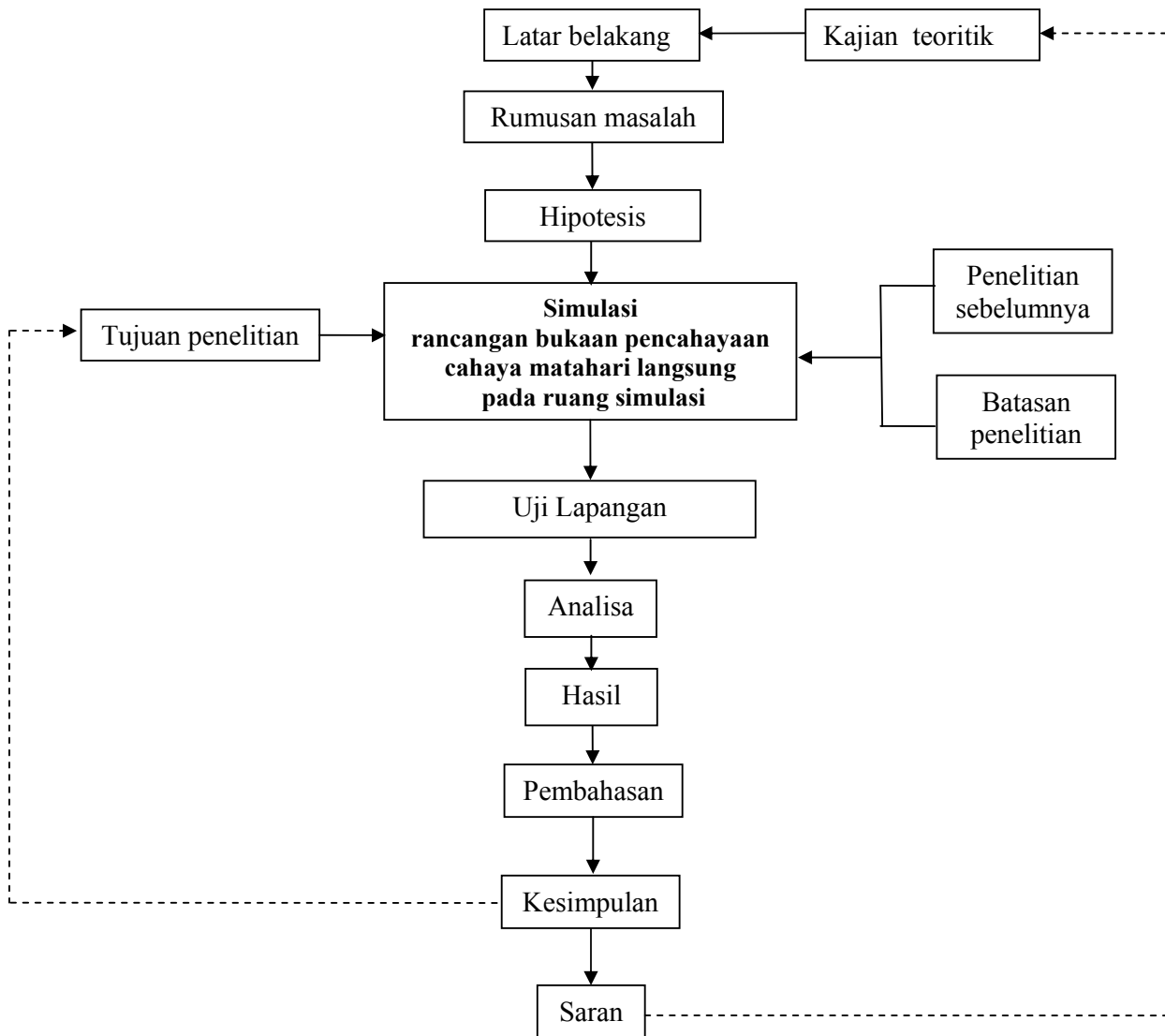
Penelitian ini menitikberatkan pada upaya pemanfaatan cahaya matahari langsung dengan teknik *side lighting* sebagai sumber pencahayaan alami siang hari pada gedung tebal yang dapat melengkapi sistem pencahayaan alami melalui jendela samping. Pertanyaan penelitian dalam tesis ini adalah:

1. Bagaimana penerapan rancangan bukaan pencahayaan cahaya matahari langsung pada ruang simulasi dalam upaya mencapai keseragaman tingkat pencahayaan pada setiap waktu?
2. Bagaimana penerapan rancangan bukaan pencahayaan dengan pemanfaatan cahaya matahari langsung pada orientasi Timur dan Barat pada beberapa tipologi bangunan?

I.4 Tujuan penelitian

1. Menghasilkan suatu strategi penerapan rancangan pasif yang memanfaatkan cahaya matahari langsung dengan orientasi Timur dan Barat.
2. Menguji rancangan bukaan pencahayaan dalam ruang simulasi untuk melihat kinerja tingkat pencahayaan, kedalaman penetrasi maupun keseragaman tingkat pencahayaan cahaya matahari langsung.

I.5 Diagram penelitian



I.6 Batasan penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa batasan seperti:

1. Faktor termal dari radiasi matahari tidak diperhitungkan.
2. Bangunan tidak terbayangi oleh bangunan atau lingkungan sekitar.
3. Perubahan sudut datang cahaya matahari secara horisontal atau HSA (*Horizontal Shadow Angle*) tidak diperhitungkan. Penelitian menggunakan asumsi bahwa cahaya matahari langsung yang datang sejajar dengan pipa

cahaya horisontal ($HSA = 0$) dan baru mengkaji perubahan sudut datang cahaya matahari secara vertikal atau VSA (*Vertical Shadow Angle*).

4. Sudut datang harian yang digunakan diwakili oleh 4 waktu, pukul 08.00, 09.00, 10.00, dan 11.00 WIB masing-masing diwakili oleh sudut datang 30° , 45° , 60° , 75° .
5. Pipa cahaya belum menggunakan material reflektif.
6. Kondisi langit cerah.

I.7 Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini diantaranya:

1. Pemanfaatan kaidah refleksi dan refraksi dapat mengakomodir dan membelokkan pergerakan sudut datang vertikal cahaya matahari langsung untuk mencapai posisi horisontal agar dapat diteruskan sedalam mungkin ke tengah gedung.
2. Fluktuasi tingkat pencahayaan cahaya matahari langsung dapat direduksi dengan pengaturan efisiensi tingkat pencahayaan outlet pipa cahaya horisontal.

I.8 Kontribusi penelitian

1. Menghasilkan suatu kaidah penerapan rancangan bukaan pencahayaan pada pipa cahaya horisontal dalam upaya melengkapi pencahayaan alami samping melalui jendela pada gedung tebal di kota Bandung.
2. Meningkatkan pemanfaatan pencahayaan alami pada bangunan dengan karakteristik tebal yang dapat mengurangi konsumsi energi listrik pada bangunan di siang hari.

I.9 Sistematika Pembahasan

Pembahasan tesis ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I adalah Pendahuluan, berisi tentang uraian latar belakang penelitian yang meliputi latar belakang pemilihan topik dan objek penelitian berupa gedung tebal, upaya pemanfaatan cahaya matahari langsung sebagai sumber pencahayaan alami

pasif pada bangunan tebal. Bagian pendahuluan ini juga berisi tentang perumusan masalah, tujuan penelitian, kontribusi penelitian, batasan penelitian, serta sistematika pembahasan.

Bab II adalah Kajian Pemanfaatan Pencahayaan Alami pada Gedung yang berisi tentang perkembangan teori dan penelitian tentang pencahayaan alami khususnya permasalahan pencahayaan alami pada gedung tebal. Berbagai penelitian terkait juga akan dibahas untuk menggambarkan perkembangan penelitian yang membahas permasalahan ini.

Bab III adalah Metodologi Penelitian yang berisi tentang variabel-variabel penelitian, langkah-langkah penelitian, objek penelitian, desain penelitian, metoda pengumpulan data, dan rancangan model yang akan diuji.

Bab IV adalah Pembahasan. Bab ini membahas beberapa aplikasi dari penggunaan model pada beberapa tipe gedung tebal maupun pada sebuah ruang simulasi. Upaya untuk perbaikan pada ruang simulasi tersebut dengan penggunaan prisma pembias dan pemantul pada bukaan pencahayaan pipa cahaya horisontal.

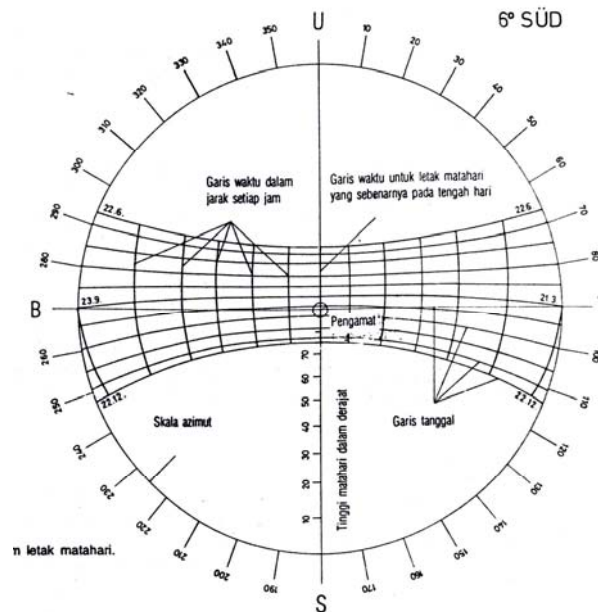
Bab VII adalah Kesimpulan dan Saran. Pada bab ini dinyatakan kesimpulan dari hasil penelitian ini dan saran-saran berupa hal-hal yang perlu dikembangkan pada penelitian selanjutnya.

Bab II Kajian Pemanfaatan Pencahayaan Alami pada Gedung

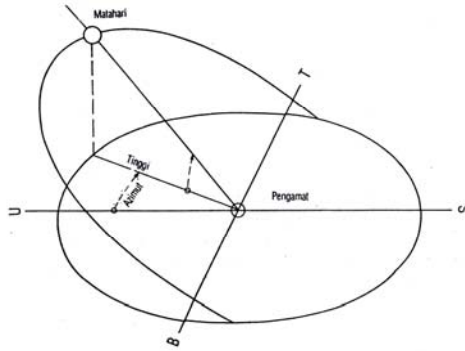
II.1 Pemanfaatan Pencahayaan Alami Siang Hari

Cahaya matahari global terdiri atas komponen cahaya matahari langsung dan komponen cahaya langit. Pada siang hari cahaya matahari global merupakan sumber utama pencahayaan di dalam suatu ruangan. Pencahayaan dengan memanfaatkan cahaya alami ini dikenal sebagai 'pencahayaan alami siang hari' ('daylighting'). Usaha optimalisasi pemanfaatan pencahayaan alami siang hari telah lama dikenal. Hal ini dilakukan karena cahaya matahari merupakan sumber cahaya yang paling potensial. Dari segi ekonomi cahaya matahari mudah didapat dan murah, selain itu juga memberikan perspektif psikologi yang menyenangkan dan mewujudkan sentuhan nyata dengan dunia luar.

Pemanfaatan pencahayaan alami sangat terkait erat dengan posisi geografis suatu bangunan karena pergerakan relatif matahari pada setiap koordinat di bumi berbeda-beda. Untuk itu diperlukan diagram matahari yang dapat membantu pengamatan dan perkiraan jumlah cahaya matahari yang masuk ke dalam sebuah bangunan.



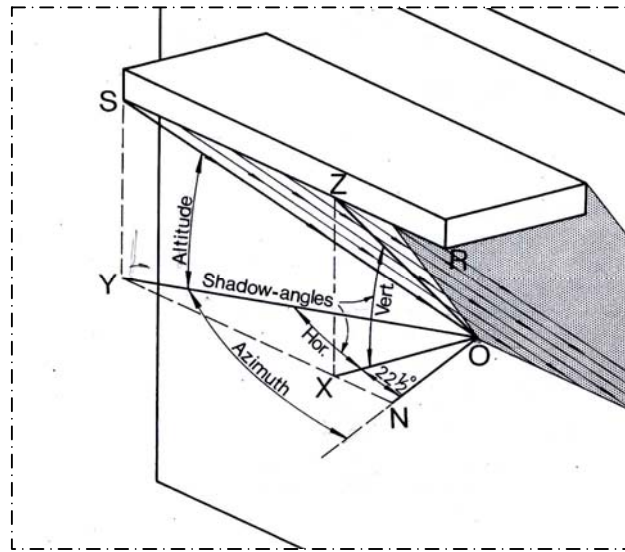
Gambar II.1 Diagram letak matahari pada koordinat 6° Lintang Selatan



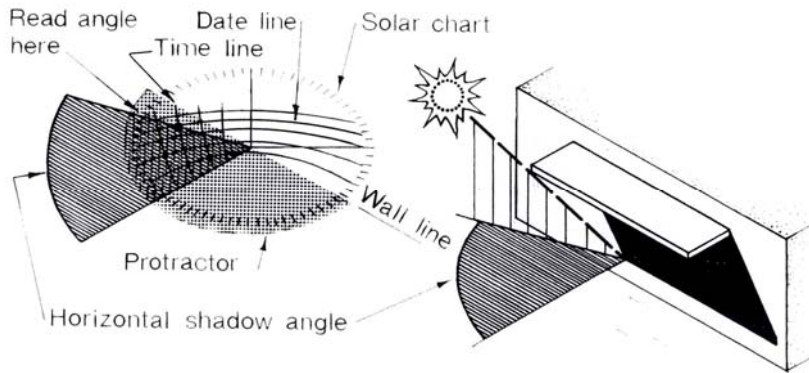
Gambar II.2 Penentuan letak matahari

Selain itu terdapat beberapa istilah yang seringkali digunakan pada perancangan pencahayaan alami pada bangunan. Oleh sebab itu perlu dijabarkan beberapa istilah berikut:

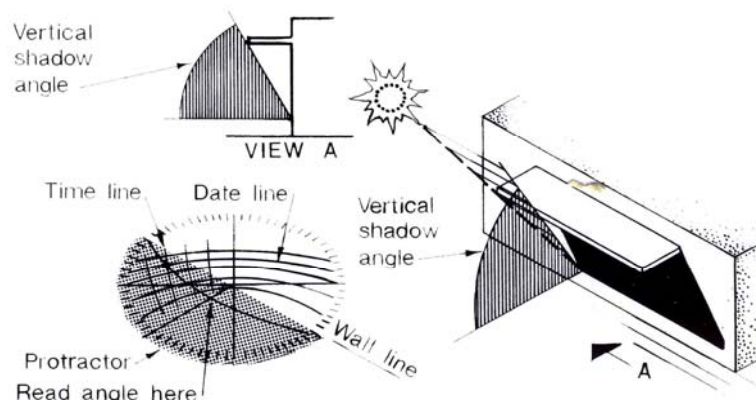
1. Azimut adalah deklinasi matahari dari Utara, diukur dengan derajat dari Utara ke Timur, Selatan, Barat dan kembali ke Utara (menurut arah jarum jam).
2. Tinggi matahari / *Altitude* adalah sudut antara horison dan matahari.
3. Garis tanggal digambarkan dalam arah Timur - Barat dan merupakan representasi jalan matahari dari matahari terbit sampai matahari terbenam pada hari yang bersangkutan. Dari posisi pengamat, yang selalu berada di pusat lingkaran, matahari terlihat bergerak pergi dan kembali sekali setahun antara garis-garis tanggal untuk 22,6 dan 22,12.
4. Garis jam adalah garis yang terletak vertikal terhadap garis tanggal, masing-masing dalam jarak satu jam. Garis yang bersamaan dengan sumbu Utara - Selatan menunjukkan waktu tengah hari setempat yang sebenarnya, artinya waktu dimana tinggi matahari terbesar dari azimut tepat 180° atau 360° (tergantung pada tempat dan musim).
5. HSA atau *Horizontal Shadow Angle* adalah sudut pada denah antara arah cahaya matahari dengan garis normal terhadap dinding.
6. VSA atau *Vertical Shadow Angle* adalah sudut pada potongan atau tampak antara arah cahaya matahari dengan bidang horisontal.



Gambar II.3 Posisi azimuth, altitude, HSA dan VSA



Gambar II.4 Horizontal Shadow Angle



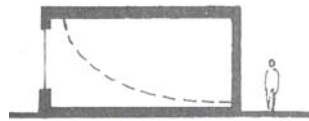
Gambar II.5 Vertical Shadow Angle

Cahaya tersebut masuk ke dalam ruangan melalui lubang-lubang atau bidang-bidang batas ruangan dengan lingkungan luar bangunan yang tembus cahaya yang disebut lubang cahaya. Pemanfaatan pencahayaan alami siang hari secara umum dilakukan dengan pemasangan jendela pada ruangan. Tetapi terkadang pemanfaatan tersebut tidak maksimal baik dalam hal kuantitas maupun kualitas. Hal ini disebabkan antara lain:

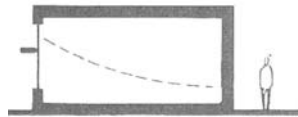
1. Persyaratan visual dalam ruang yang harus dipenuhi.
2. Terdapat penghalang luar yang tinggi dan besar sehingga menghalangi bangunan dari cahaya matahari langsung.
3. Ruangan terlalu dalam sehingga tidak memberikan pencahayaan yang cukup.
4. Pengaruh geometri ruangan yang mengakibatkan suatu jendela atau rooflight dapat memberikan daerah terang yang tidak merata. Misal pada atap gigi gergaji, lubang pada atap akan memberikan daerah yang lebih terang dari daerah lainnya.

Tujuan dari desain pencahayaan alami:

- (1) Mendapatkan cahaya yang masuk lebih dalam ke dalam bangunan dengan meningkatkan tingkat iluminasi dan menurunkan gradient iluminasi yang melewati ruang. Cahaya dari jendela menimbulkan gradien iluminasi yang berlebihan, di area dekat dinding belakang terlalu gelap dibanding area yang dekat jendela. Lihat Gambar II.1



Gambar II.6 Perbedaan gradien iluminasi antara area yang dekat jendela dengan area yang jauh dari jendela

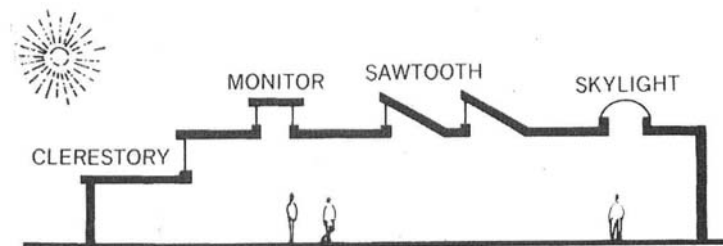


Gambar II.7 Penurunan gradien iluminasi dengan desain pencahayaan alami

- (2) Mengurangi atau mencegah silau langsung yang kurang baik dari jendela tak terlindungi dan *skylight*.
- (3) Mencegah kelebihan rasio tingkat terang terutama yang disebabkan oleh cahaya matahari langsung.
- (4) Mencegah atau meminimalkan selubung pemantul khususnya dari *skylight* dan jendela *clerestory*.
- (5) Menyebarkan cahaya dengan melipatgandakan pantulan dari plafon dan dinding
- (6) Menggunakan potensi estetis pencahayaan alami dan cahaya matahari.

Terdapat beberapa strategi pencahayaan alami yang dapat dikategorikan dalam 3 kelompok dasar:

- (1) Strategi bukaan pada atap berupa *clerestory*, *monitor*, *sawtooth*, *skylight*.



Gambar II.8 Berbagai macam bukaan pada atap untuk pencahayaan alami

- (2) Strategi bukaan dengan jendela termasuk jendela dengan *light shelves*.
- (3) Strategi pencahayaan alami khusus yang terdiri dari: lubang atau cerobong cahaya, *tubular skylight*, penyaluran cahaya alami, serat optik dan pipa cahaya, sistem prismatic dan rantai kaca.

Usaha optimalisasi penerangan alami siang hari telah banyak dicoba. Usaha tersebut banyak menghasilkan sistem pencahayaan alami antara lain penyalur cahaya, *louvre* statis maupun dinamis, sistem panel prismatic, sistem difraksi holografi, dan rak cahaya (*light shelf*). Sistem pencahayaan alami tersebut memiliki karakteristik tersendiri dan digunakan untuk suatu kondisi ruangan yang tertentu, hal ini akan dijelaskan lebih rinci pada bagian II.3.

Sistem penyalur pencahayaan alami dapat digunakan pada ruangan yang tidak memiliki lubang cahaya dan ruangan yang terlalu dalam dari bukaan jendela. Hal ini disebabkan penggunaan jendela konvensional pada ruangan terlalu dalam tidak memberikan pencahayaan alami yang merata. Saat ini banyak pengembangan cara-cara untuk memasukkan cahaya alami, termasuk cahaya matahari langsung, yang bisa memiliki penetrasi cahaya yang dalam namun tidak berdampak negatif seperti menyebabkan penyilauan dan pemanasan ruang.

II.2 Prinsip Perjalanan Cahaya

Bila cahaya melalui batas dua media maka terdapat tiga peristiwa yang dapat terjadi yaitu:

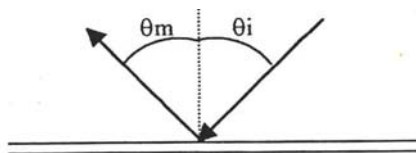
II.2.1. Refleksi

Refleksi adalah peristiwa terpantulnya cahaya bila mengenai suatu permukaan. Jumlah cahaya yang direfleksikan permukaan ditunjukkan dengan besaran faktor refleksi (ρ) yaitu perbandingan fluks cahaya yang dipantulkan dibandingkan dengan fluks cahaya yang diterima permukaan.

Terdapat berbagai macam refleksi yang tergantung pada sifat permukaan yaitu:

1. Refleksi spekular

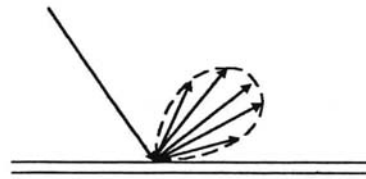
Refleksi spekular merupakan peristiwa khusus refleksi. Refleksi ini mengikuti hukum Snellius yaitu sudut datang cahaya θ_i sama dengan sudut pantul θ_m . Peristiwa ini terjadi pada permukaan rata dan datar misalnya pada permukaan cermin. Peristiwa refleksi spekular dapat dilihat pada Gambar II.9.



Gambar II.9 Refleksi spekular

2. Refleksi menyebar

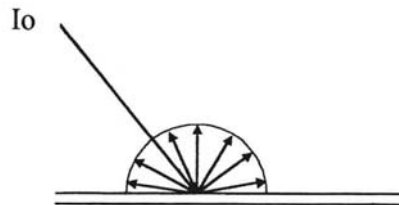
Refleksi menyebar merupakan peristiwa refleksi yang biasa terjadi. Cahaya yang datang pada suatu permukaan akan dipantulkan secara menyebar tetapi masih di sekitar sudut pantul bila terpantul secara spekular. Peristiwa refleksi menyebar dapat dilihat pada Gambar II.10.



Gambar II.10 Refleksi menyebar

3. Refleksi difus

Peristiwa refleksi ini terjadi pada permukaan yang kasar atau acak dan dapat dilihat pada Gambar II.11. Distribusi intensitas tidak harus sama ke segala arah. Intensitas yang sama ke segala arah dapat terjadi bila permukaan pada cahaya datang sangat acak.



Gambar II.11 Refleksi difus

II.2.2. Absorpsi

Peristiwa absorpsi merupakan peristiwa terserapnya cahaya oleh suatu bahan. Harga absorptansi tergantung karakteristik bahan. Penyerapan cahaya oleh bahan dapat dilihat pada faktor absorpsi (α) bahan yaitu perbandingan fluks cahaya yang diserap dengan fluks cahaya yang datang.

II.2.3. Transmisi

Transmisi adalah peristiwa penjalaran cahaya melewati suatu medium ke medium lain. Cahaya akan mengalami pembiasan bila melewati medium yang mempunyai indeks bias yang berbeda. Cahaya akan dibiaskan mendekati garis normal bila memasuki medium dengan indeks bias lebih tinggi dan akan menjauhi garis normal bila memasuki medium dengan indeks bias lebih rendah. Pada peristiwa transmisi diperoleh faktor transmisi (τ) yaitu fluks cahaya yang ditransmisikan dibanding dengan fluks cahaya yang datang pada bahan tersebut.

Macam transmisi:

1. Transmisi spekular

Transmisi spekular mengikuti hukum Snellius yaitu:

$$n_1 \sin \Theta_i = n_2 \sin \Theta_m$$

dengan

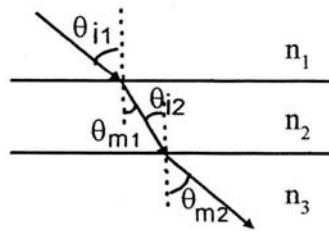
n_1 = indeks bias medium 1

n_2 = indeks bias medium 2

Θ_i = sudut datang cahaya

Θ_m = sudut bias cahaya

Transmisi spekular dapat dilihat pada Gambar II.12

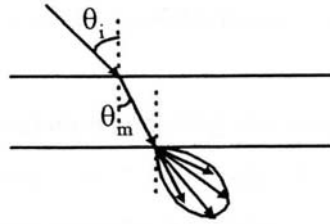


Gambar II.12 Transmisi spekular

Bila cahaya datang dengan sudut Θ_i akan dibiaskan mendekati garis normal. Hal ini terjadi karena $n_2 > n_1$. Kemudian cahaya diteruskan dan memasuki medium yang mempunyai indeks bias n_3 . Pada medium ini cahaya dibiaskan menjauhi garis normal karena $n_3 < n_2$. Jika $n_1 = n_3$ maka $\Theta_{m2} = \Theta_i$. Transmisi spekular akan menghasilkan cahaya transmisi pada satu arah tertentu tanpa mengalami penyebaran cahaya.

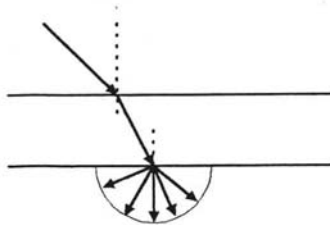
2. Transmisi menyebar

Cahaya transmisi yang terjadi tidak hanya pada satu arah tetapi penyebarannya masih pada arah tertentu. Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar II.13



Gambar II.13 Transmisi menyebar

3. Transmisi difus



Gambar II.14 Transmisi difus

Transmisi difus dapat dilihat pada Gambar II.14. Cahaya transmisi mempunyai arah sebaran ke segala arah. Transmisi difus terjadi bila melewati batas permukaan medium yang sangat acak.


II.3 Sistem Pencahayaan Alami Siang Hari


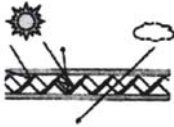



Kischkoweit (2002) membagi sistem daylighting menjadi matriks sebagai berikut:

II.3.1 *Shading system primary using diffuse skylight*

Sistem ini memblokir cahaya matahari langsung tetapi transparan untuk terang langit.

Tabel II.1 Macam-macam *shading system primary using diffuse skylight*

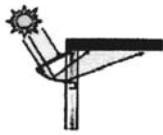
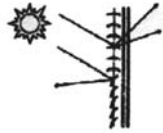
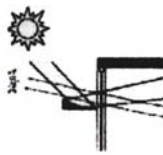
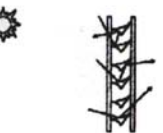
Sistem	Gambar	Iklim	Aplikasi	Kriteria
<i>Prismatic panels</i>		Semua iklim	Jendela vertikal, skylight	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • View ke luar • Potensi penghematan • Perlu tracking


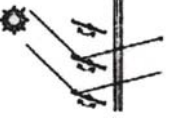
<i>Prisms and venetian blinds</i>		<i>Temperate climate</i>	Jendela vertikal	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Sun protecting mirror elements</i>		<i>Temperate climate</i>	<i>Skylight, glazed roofs</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Anidolic zenithal opening</i>		<i>Temperate climate</i>	Skylight	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Directional selective shading system with concentrating HOE</i>		Semua Iklim	Jendela vertikal, skylight, glazed roofs	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • View ke luar • Potensi penghematan • Perlu tracking
<i>Transparent Vertical shading system with HOE based on total reflection</i>		<i>Temperate climate</i>	Jendela vertikal, skylight, glazed roofs	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • View ke luar • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan • Perlu tracking

II.3.2 Shading systems primary using direct sunlight

Menyebarkan cahaya matahari langsung atau memantulkan cahaya matahari langsung ke langit-langit atau di atas ketinggian mata.



Tabel II.2 Macam-macam *shading systems primary using direct sunlight*

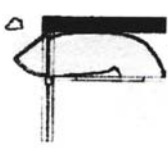
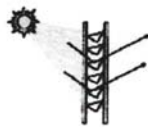

Sistem	Gambar	Iklm	Aplikasi	Kriteria
<i>Light guiding shade</i>		Iklm panas, langit cerah	Jendela vertikal di atas ketinggian mata	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Louvers and blinds</i>		Semua iklim	Jendela vertikal	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Perlu <i>tracking</i>
<i>Lightshelf for redirection of sunlight</i>		Semua iklim	Jendela vertikal	<ul style="list-style-type: none"> • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Glazing with reflecting profiles (Okasolar)</i>		<i>Temperate climates</i>	Jendela vertikal, skylight	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Koefisien variable perolehan panas matahari

<i>Skylight with Skylights Laser Cut Panels</i>		Iklim panas, langit cerah, low latitudes	<i>Skylight</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Turnable lamellas</i>		<i>Temperate climates</i>	Jendela vertikal, <i>skylight</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan • Perlu <i>tracking</i>

II.3.3 Diffuse light guiding systems

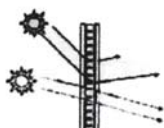
Tabel II.3 Macam-macam *diffuse light guiding systems*

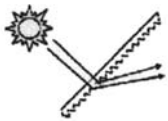

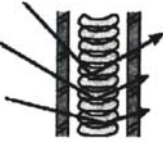
Sistem	Gambar	Iklim	Aplikasi	Kriteria
<i>Lightshelf</i>		<i>Temperate climate, langit berawan</i>	Jendela vertikal	<ul style="list-style-type: none"> • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Anidolic Integrated System</i>		<i>Temperate climate</i>	Jendela vertikal	<ul style="list-style-type: none"> • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan

<i>Anidolic ceiling</i>		Temperate climate, langit berawan	Fasad vertikal di atas jendela	<ul style="list-style-type: none"> • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Fish System</i>		<i>Temperate climate</i>	Jendela vertikal	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Zenith light guiding elements with Holographic Optical Elements</i>		<i>Temperate climate, langit berawan</i>	Jendela vertikal (terutama pada <i>court yard</i>), <i>skylight</i>	<ul style="list-style-type: none"> • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan

II.3.4 Direct light guiding systems

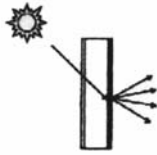
Tabel II.4 Macam-macam *direct light guiding systems*

Sistem		Iklm	Aplikasi	Kriteria
<i>Laser Cut Panel (LCP)</i>		Semua Iklim	Jendela vertikal, <i>skylight</i>	<ul style="list-style-type: none"> • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan

<i>Prismatic panels</i>		Semua Iklim	Jendela vertikal, <i>skylight</i>	<ul style="list-style-type: none"> • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Potensi penghematan
<i>Holographic Optical Element In the skylight</i>			<i>Skylight</i>	<ul style="list-style-type: none"> • View ke luar • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Light guiding glass</i>			Jendela vertikal, skylights	<ul style="list-style-type: none"> • Mencegah silau • View ke luar • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan

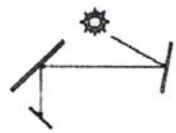
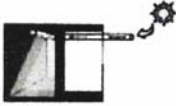

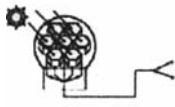

II.3.5 Scattering system

Tabel II.5 Macam-macam *scattering system*

Sistem		Iklim	Aplikasi	Kriteria
<i>Scattering system (light diffusing glass, capillary glass, frosted glass)</i>		Semua iklim	Jendela vertikal, skylight	<ul style="list-style-type: none"> • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan

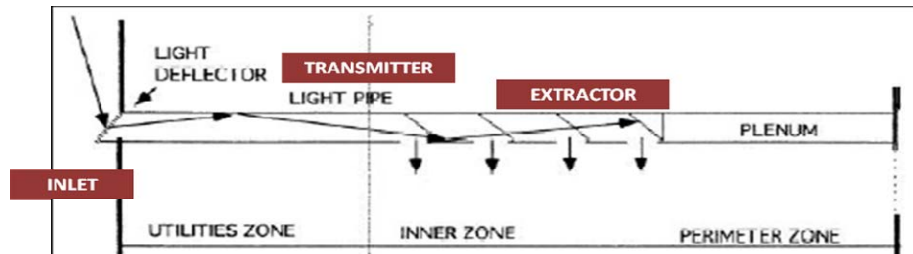
II.3.6 Light Transport / Penyalur cahaya

Tabel II.6 Macam-macam *Light Transport / Penyalur cahaya*

Sistem		Iklm	Aplikasi	Kriteria
<i>Heliostat</i>		Semua iklim, Langit cerah	Atap	<ul style="list-style-type: none"> • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Potensi penghematan • Perlu tracking
<i>Light Pipe</i>		Semua iklim, Langit cerah		<ul style="list-style-type: none"> • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan
<i>Solar Tube</i>		Semua iklim, Langit cerah		<ul style="list-style-type: none"> • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Potensi penghematan
<i>Fibres</i>		Semua iklim, Langit cerah		<ul style="list-style-type: none"> • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Perlu <i>tracking</i> • Potensi penghematan
<i>Light guiding ceiling</i>		<i>Temperate climates</i> , Langit cerah		<ul style="list-style-type: none"> • Menghantarkan cahaya ke ruang yang dalam • Tingkat pencahayaan yang homogen • Potensi penghematan

II.4 Sistem penyalur cahaya

Penelitian ini membahas rancangan bukaan pencahayaan pada sistem penyalur cahaya. Berikut ini adalah gambaran dari sistem penyalur cahaya secara umum.



Gambar II.15 Contoh desain pipa cahaya horizontal pada potongan bangunan

Sistem penyalur cahaya umumnya terdiri dari tiga komponen yaitu bagian paling luar sebagai penangkap cahaya (*inlet*), penyalur cahaya (*transmitter*), dan emitter (*extractor*) untuk mendistribusikan cahaya ke dalam ruangan.

1. Penangkap cahaya (*inlet*)

Penangkap cahaya merupakan peralatan untuk menangkap cahaya dan mengarahkannya pada penyalur cahaya. Penangkap berada di luar bangunan, biasanya letak di atap. Penangkap bisa berupa sistem yang dinamis seperti *tracking heliostat*, *rooftop active-tracking* maupun sistem statis seperti *prismatic glazing*, *reflecting louvers*, *light shelves*.

Penangkap dinamis adalah penangkap yang dapat bergerak mengikuti arah datang cahaya. Sistem ini bekerja dengan melakukan penjejakan kemudian mengumpulkan dan mengarahkan cahaya ke dalam penyalur. Sistem dinamis lebih mahal biaya pembuatannya dan membutuhkan kontrol serta pemeliharaan yang kompleks. Ukuran sistem dinamis relatif besar. Dengan melihat cara kerjanya sistem ini hanya efektif untuk cahaya matahari langsung. Pada saat penangkap menangkap dan mengkonsentrasikan cahaya, energi panas pun akan terkonsentrasi. Panas ini dapat mengakibatkan kerusakan (melelehkan/meretakkan) penyalur. Sebagai konsekuensinya harus dipasang filter (*spectral selective glass*) pada lubang masukan penyalur.

Penangkap statis memiliki desain yang lebih sederhana sehingga biaya konstruksi dan pemeliharaan lebih murah. Tetapi penangkap ini tidak seefektif penangkap dinamis karena hanya berfungsi untuk mengubah arah cahaya datang. Sehingga penangkap harus didesain dengan memperhatikan arah datang cahaya matahari yang dominan. Pada penelitian ini, penangkap cahaya dibuat statis dengan memanfaatkan kaidah refraksi (pembiasan) dan refleksi (pemantulan) dari prisma yang terbuat dari akrilik.

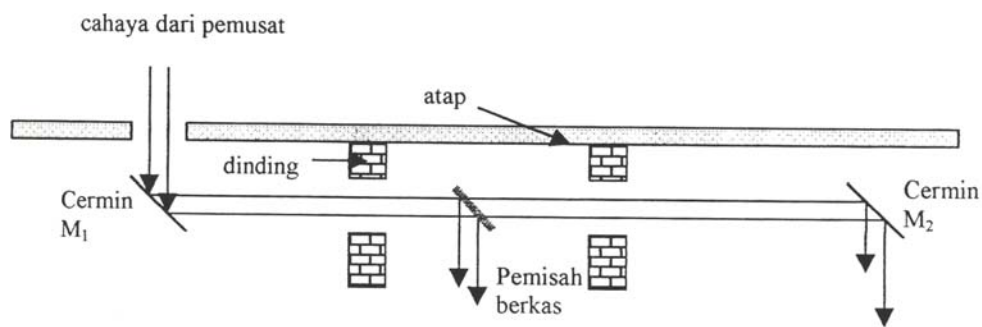
2. Penyalur (*transmitter*)

Penyalur merupakan alat untuk menyalurkan cahaya pada ruang setelah cahaya tersebut ditangkap. Bentuk paling dasar penyalur adalah saluran kosong. Adapun bentuk-bentuk lain seperti yang telah diuraikan pada teknik penyaluran cahaya.

Fenomena penyaluran cahaya pertama kali diperkenalkan oleh John Tyndall pada tahun 1870. Tyndall mengarahkan cahaya pada sebuah bejana air dan bila air dialirkan melalui lubang pada sisi bejana cahaya akan dihantarkan sepanjang aliran air. Studi khusus tentang penyalur cahaya semakin lama semakin berkembang, dimana telah dilakukan beberapa percobaan mengenai teknik penyaluran cahaya. Teknik tersebut antara lain:

1. Penyalur cahaya dengan cermin datar

Sistem ini menggunakan beberapa cermin datar untuk menyalurkan cahaya sampai pada tempat yang hendak diterangi. Penyaluran ini dapat digambarkan sebagai berikut:

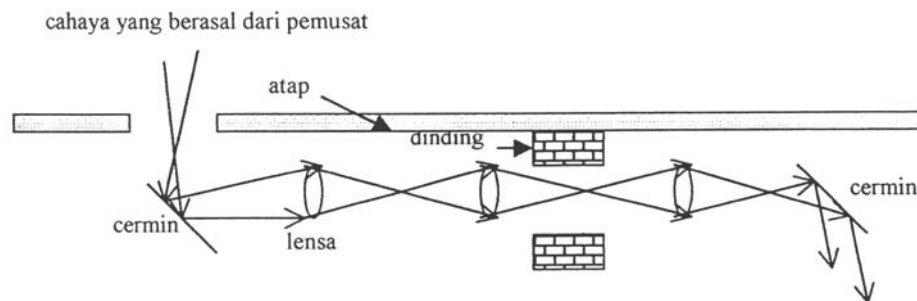


Gambar II.16 Teknik penyaluran menggunakan cermin

Dari Gambar II.16 terlihat bahwa berkas cahaya yang lurus yang berasal dari sumber cahaya mengenai cermin datar M_1 akan dipantulkan ke arah cermin datar M_2 . Sementara itu sebagian berkas cahaya diarahkan ke bagian lain (suatu ruangan) oleh pemisah berkas yang berada diantara cermin M_1 dan M_2 . Kekurangsempurnaan sistem ini terletak pada banyaknya cahaya yang tidak tertransmisikan sampai pada ujung keluaran sistem dan penyusunan cermin bila dibutuhkan penyalur yang panjang.

2. Penyaluran cahaya menggunakan lensa

Lensa merupakan komponen optik yang dibatasi oleh dua buah permukaan umumnya terbuat dari bahan gelas atau bahan transparan lain. Sistem penyaluran cahaya ini menggunakan lensa positif. Hal ini didasarkan pada sifat lensa positif yang dapat memfokuskan cahaya datang. Pada Gambar II.17 diperlihatkan sistem penyalur cahaya dengan deretan lensa. Cahaya dari luar (bangunan) diarahkan pada lensa dengan perantaraan cermin.



Gambar II.17 Teknik penyaluran menggunakan deretan lensa

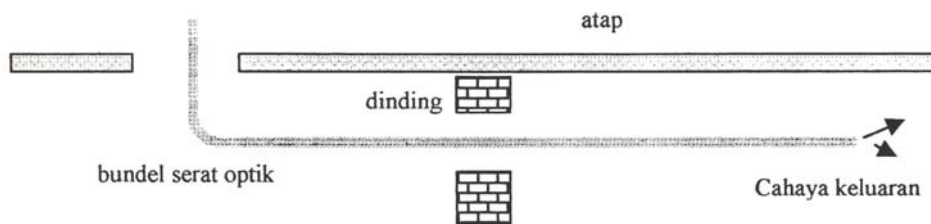
Sistem penyalur cahaya dengan deretan lensa akan dapat digunakan secara maksimal bila dipenuhi syarat jarak antar lensa, lebar permukaan keluaran pemusat dan jarak keluaran pemusat terhadap penyalur. Hal yang perlu diperhatikan adalah pembuatan selubung penyalur yang kokoh agar dapat melindungi lensa terutama dari guncangan.

3. Penyaluran cahaya yang memanfaatkan sifat pemantulan dalam

a. Penyaluran cahaya menggunakan serat optik

Serat optik merupakan suatu pemandu gelombang cahaya yang terdiri atas inti yang mempunyai indeks bias n_1 dan selubung dengan indeks bias n_2 . Kedua bahan pembentuk serat ini terbuat dari bahan transparan dengan n_1 lebih besar daripada n_2 . Prinsip kerja penyaluran cahaya dalam serat optik adalah peristiwa pemantulan dalam total. Jika cahaya datang pada bidang batas antara inti dengan selubung serat optik dengan sudut datang lebih besar dari sudut kritisnya maka cahaya tersebut akan dipantulkan menurut pemantulan dalam total. Cahaya tersebut seolah-olah terperangkap dalam serat optik dan dikeluarkan melalui ujung lainnya.

Dari hasil penelitian terhadap transmisi penyalur cahaya dengan serat optik diperoleh bahwa transmisi cahaya matahari langsung yang dihasilkan oleh sistem ini dengan serat optik tunggal maupun bundel sangat kecil. Hal ini diakibatkan kecilnya faktor transmisi serat optik untuk cahaya dan diameter pemusat jauh lebih besar dari diameter serat optik sehingga menimbulkan kesulitan dalam memasukkan cahaya matahari ke dalam serat. *Nippon Telephone and Telegraph* (NTT) mengembangkan serat optik untuk menyalurkan cahaya dimana serat ini mempunyai rugi-rugi < 50% pada panjang < 15m. Pada Gambar II.18 diperlihatkan sistem penyalur cahaya dengan serat optik.



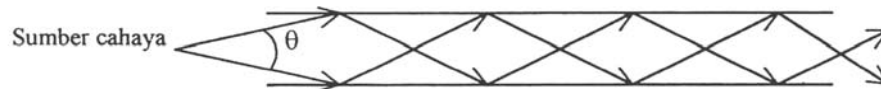
Gambar II.18 Teknik penyaluran menggunakan serat optik

b. Penyaluran cahaya melalui pipa gelas

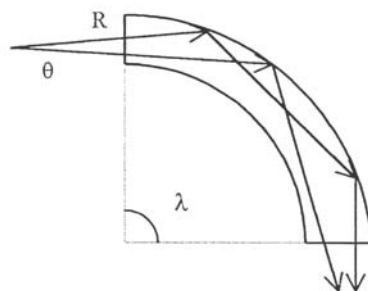
Penyaluran cahaya melalui pipa gelas menggunakan prinsip penjalaran berkas cahaya. Pertama-tama yang harus diketahui adalah sifat-sifat pemantulan gelas

sebagai bahan dielektrik yang diatur oleh hukum Fresnel. Dengan dasar ini perhitungan faktor transmisi pipa gelas dapat dicari. Faktor transmisi merupakan parameter penting karena dapat menunjukkan seberapa efektif media ini menyalurkan cahaya.

Penyaluran cahaya dapat dilakukan pada pipa gelas lurus (Gambar II.19) maupun pipa gelas melengkung (Gambar II.20). Usaha untuk memperbesar transmisi cahaya melalui pipa gelas dapat dilakukan dengan cara melapisi permukaan dalam pipa dengan lapisan yang lebih memantulkan cahaya misal lapisan perak atau film. Pelapisan dengan perak dapat memperbesar faktor transmisi menjadi sekitar 65% untuk pipa lurus dan 45% untuk pipa melengkung dengan panjang 20cm dan 40cm. Kemampuan pipa gelas dalam menyalurkan cahaya baik yang dilapisi perak maupun tidak akan bertambah bila diameter pipa membesar dan bila sudut sebaran cahaya datang mengecil. Keuntungan penggunaan pipa gelas sebagai penyalur cahaya adalah kapasitas penyaluran dapat diatur, yaitu dengan variasi diameter pipa dan karakteristik penyearahan cahaya. Hal ini dapat dilakukan karena pipa gelas mudah dibentuk. Hal yang harus diperhatikan dalam sistem ini adalah kerapuhan gelas terhadap getaran maupun guncangan maupun cara pelapisan permukaan dalam gelas.



Gambar II.19 Transmisi cahaya melalui pipa gelas lurus



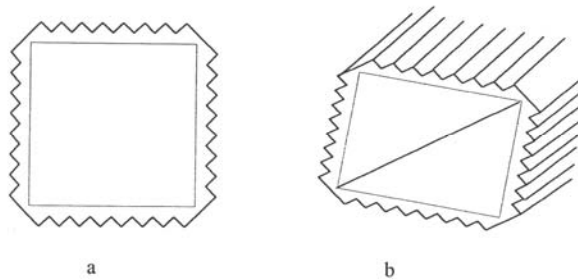
dimana:

- θ = sudut sebaran sinar datang
- λ = sudut busur pipa melengkung
- R = jari-jari kelengkungan pipa

Gambar II.20 Transmisi cahaya melalui pipa gelas melengkung

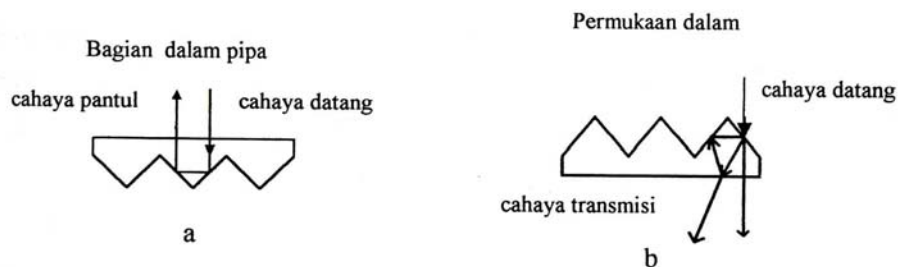
c. Penyaluran cahaya melalui pipa prismatik

Penyalur merupakan pipa transparan yang dinding luarnya berbentuk prisma seperti terlihat pada Gambar II.21. Bila cahaya masuk ke dalam pipa dan mengenai permukaan dalam pipa maka cahaya akan mengalami pemantulan total pada prisma dan akan dipantulkan kembali ke dalam pipa. Karena bentuk permukaan luar pipa berupa prisma maka rugi-rugi cahaya menjadi lebih kecil dan pemantulan cahaya lebih optimal tanpa harus melapisi permukaan dalam dengan lapisan yang lebih merefleksikan cahaya.



Gambar II.21 a. Pandangan depan pipa prismatik
b. Potongan pipa prismatik

Bentuk prisma tersebut dapat digunakan sebagai penyalur maupun sebagai difuser. Hal ini dapat dilakukan dengan membalik permukaan prisma seperti yang terlihat pada Gambar II.22.

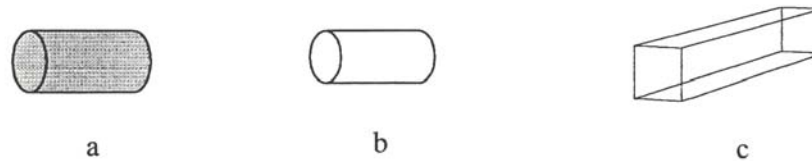


Gambar II.22 a. Perletakan sebagai penyalur
b. Perletakan sebagai pendistribusi

Dengan semakin majunya perkembangan lapisan tipis maka dapat dibuat lapisan tipis dengan bentuk seperti permukaan luar pipa ini

d. Penyaluran cahaya melalui pipa yang bagian dalamnya dibuat lebih merefleksikan cahaya.

Sistem ini dapat diperoleh dengan cara *mempolish* atau dilapis, baik dengan lapisan biasa maupun lapisan tipis yang merefleksikan cahaya. Penyalur bisa berupa pipa berpenampang lingkaran baik pejal maupun berlubang, kotak maupun trapesoid seperti terlihat pada Gambar II.23.



Gambar II.23 a. Pipa pejal misal batang akrilik
b. Pipa berlubang misal pipa logam
c. Pipa kotak misal pipa dari aluminium

4. Penyaluran cahaya dalam pipa berpenampang kotak

Penyaluran cahaya dalam pipa berpenampang kotak memanfaatkan sifat reflektansi permukaan dalam penyalur. Penyaluran cahaya tersebut dapat dilihat pada gambar II.24.

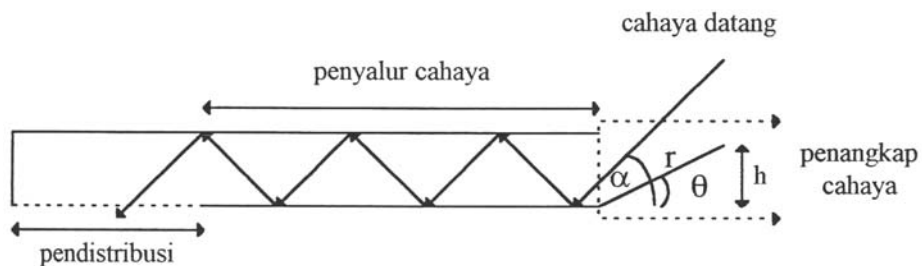
Keterangan:

r = panjang pemantul

h = ketinggian pemantul

θ = sudut kemiringan pemantul

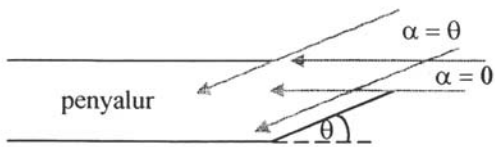
α = sudut datang cahaya terhadap horisontal



Gambar II.24 Bagan penyalur penampang kotak

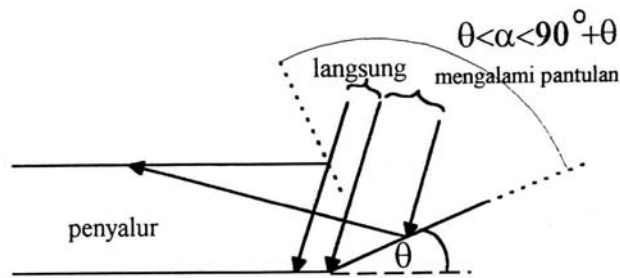
Perjalanan cahaya dalam memasuki penyalur ada dua kemungkinan yaitu:

1. Cahaya dengan sudut datang $0 \leq \alpha \leq \theta$ akan langsung masuk ke dalam penyalur seperti terlihat pada Gambar 2.25.



Gambar II.25 Cahaya dengan sudut datang $0 \leq \alpha \leq \theta$

2. Cahaya dengan sudut datang $\theta \leq \alpha \leq 90^\circ + \theta$ akan masuk ke dalam penyalur dengan dua cara yaitu secara langsung dan terpantul oleh penangkap.

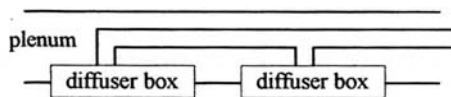


Gambar II.26 Cahaya dengan sudut datang $\theta \leq \alpha \leq 90^\circ + \theta$

Variabel r , h , dan θ sangat berpengaruh pada jumlah fluks cahaya yang masuk ke dalam penyalur. Variabel ini saling terkait satu sama lain. Perubahan harga salah satu label akan mengubah harga variabel lainnya.

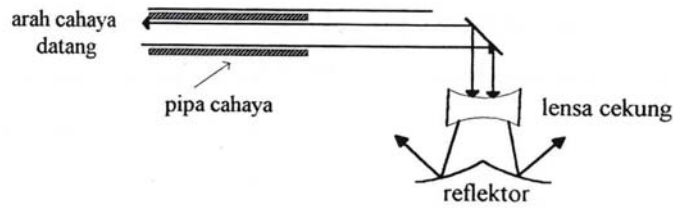
3. Pendistribusi cahaya (*outlet*)

Cahaya yang keluar dari penyalur harus didistribusikan ke dalam ruangan. Hasil cahaya yang didistribusikan diharapkan mempunyai kualitas yang sama dengan cahaya yang didapat dari armatur. Sehingga perlu diusahakan suatu pendistribusi yang dapat memenuhi syarat diatas. Contoh pendistribusi cahaya adalah *diffuser box* dan *solar uplighter*.



Gambar II.27 Distribusi cahaya dengan difusser box

Cahaya yang keluar dari penyalur masuk ke *diffuser box*. Pada alat ini cahaya didistribusikan secara difus ke ruangan.



Gambar II.28 Distribusi cahaya dengan *solar uplighter*

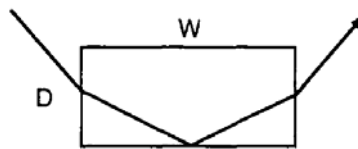
Cahaya yang keluar dari penyalur diarahkan oleh cermin ke lensa cekung kemudian oleh lensa cahaya disebar. Cahaya sebaran diarahkan ke langit-langit oleh reflektor sehingga cahaya yang tiba di bidang kerja adalah cahaya tidak langsung.

Pencahayaan alami siang hari yang dihasilkan oleh pipa cahaya horisontal menurun drastis dengan sudut datang cahaya matahari yang tinggi (Swift, 1995) Pemantulan terus berkurang seiring perjalanan cahaya di dalam pipa walaupun menggunakan material yang sangat reflektif seperti *aluminium anodized* atau *coated plastics films* dengan tingkat reflektansi lebih besar dari 95%. (Shao, 1988) Pencahayaan yang dihasilkan pipa cahaya horisontal tetap terbatas pada saat cahaya matahari datang dengan sudut yang tinggi. Ini adalah masalah umum penggunaan pipa cahaya horisontal di lingkungan yang padat di mana hanya tersedia cahaya dengan sudut datang yang tinggi karena halangan di daerah yang padat.

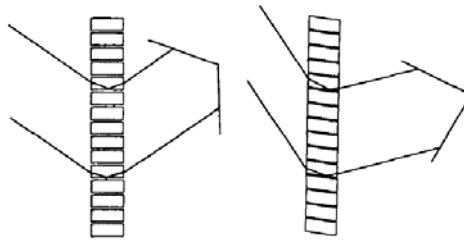
Semakin banyak pemantulan yang terjadi di dalam pipa akan mempengaruhi cahaya yang dihasilkan. Semakin sejajar cahaya yang masuk dengan aksis pipa semakin baik karena pemantulan dapat mengurangi tingkat pencahayaan yang dihasilkan. Semakin besar pembelokan cahaya dari aksis pipa semakin banyak pemantulan yang diperlukan sebelum sinar matahari keluar dari pipa.

II.5 Penelitian sebelumnya

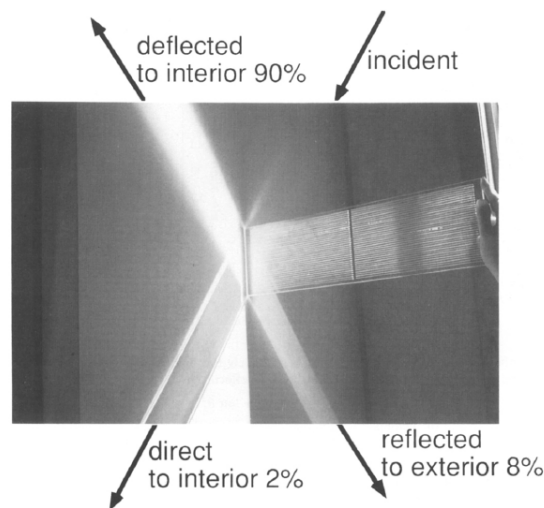
Edmonds (1993) mengembangkan teknologi material yang mengkombinasikan kemampuan membelokkan cahaya dengan transparansi material sehingga masih memungkinkan melihat view ke luar. Material tersebut diperoleh dengan memotong dengan laser lapisan tipis pada lembar akrilik menjadi susunan blok persegi panjang dengan permukaan yang reflektif diantara blok tersebut. Tujuan utama penggunaan *laser cut deflecting panel* pada inlet pipa cahaya horisontal adalah untuk membuat cahaya matahari yang datang dibelokkan lebih langsung sehingga sejajar dengan aksis pipa.



Gambar II.29 Pembelokkan cahaya pada prisma transparan



Gambar II.30 Susunan elemen prisma pada *light deflecting panel*



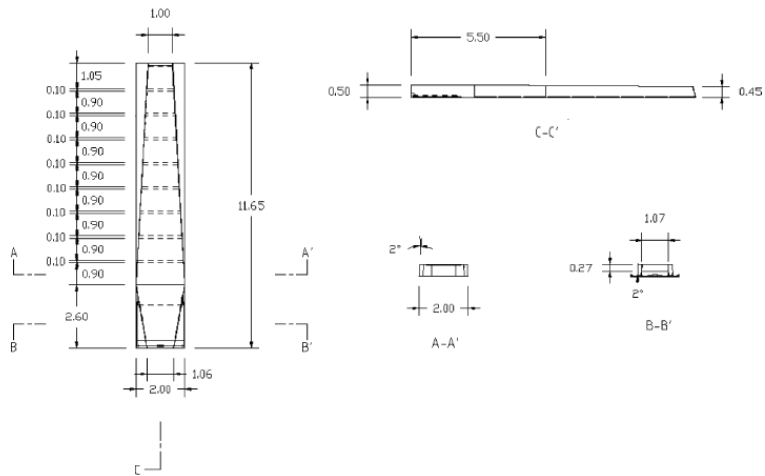
Gambar II.31 Foto *light deflecting panel* saat mendapat cahaya matahari langsung

Edmonds (1995) meneliti efektivitas penggabungan *light pipe* dan *deflecting panel* dalam pencahayaan pada beberapa lantai bangunan berdasarkan teori dan eksperimen. Hasil penelitiannya mendemonstrasikan bahwa *laser cut panel* dapat ditambahkan pada inlet dari pipa cahaya horisontal untuk meningkatkan tingkat pencahayaan untuk semua sudut datang sinar matahari dibawah 60°.

Beltran (1997) menstudi kinerja kombinasi *light shelves* dan *light pipe* untuk meningkatkan tingkat iluminasi pencahayaan alami dengan minimum perolehan panas dari matahari. Temuannya menunjukkan bahwa kombinasi paling baik adalah *light shelves* lengkung dengan plafond lengkung.

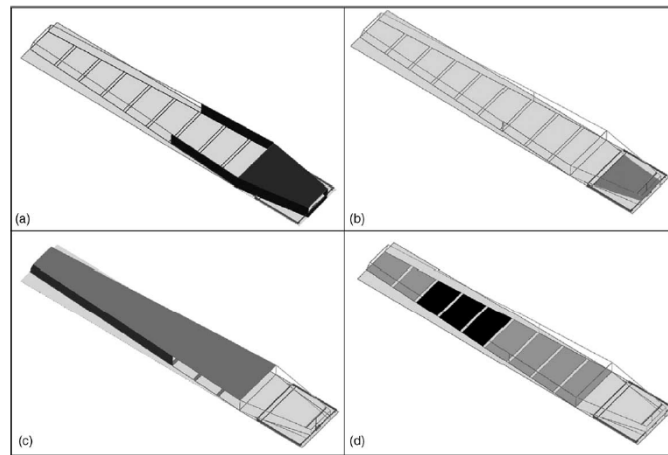
Penelitian Nurkasanah (1998) menyimpulkan bahwa pemanfaatan cahaya langit dalam ruangan dapat dioptimalkan dengan menggunakan sistem penyalur cahaya. Untuk mendapatkan hasil distribusi illuminansi pada ruangan yang merata dibutuhkan pemasangan penyalur lebih dari satu. Bentuk penangkap cahaya yang paling efisien adalah penangkap yang mempunyai kemiringan dua sudut yang berbeda. Distribusi illuminansi pada ruang dipengaruhi oleh sudut penangkap dan panjang bukaan sedangkan harga illuminansi tergantung pada bukaan penangkap dengan memperhatikan panjang bukaan. Pengaturan bidang pemantul dan lubang distribusi penting untuk penyaluran cahaya pada ruangan tak berlubang cahaya.

Penelitian Soelami (2000) menunjukkan bahwa penangkap cahaya statis pada penggunaan pipa cahaya horisontal tidak efektif untuk menangkap cahaya matahari global. Canziani (2004) mengembangkan model *light pipe system* yang dapat diintegrasikan pada tampak bangunan. Pipa cahaya biasanya bekerja dengan peralatan yang diletakkan di luar yang bertujuan untuk mengumpulkan, memantulkan, dan dalam beberapa kasus mengkonsentrasikan atau mengatur sudut datang cahaya dan peralatan yang diletakkan di dalam yang dapat mentransmisikan cahaya matahari ke dalam bangunan dan mendistribusikannya ke dalam area yang dalam untuk mendapatkan distribusi tingkat pencahayaan yang lebih baik.



Gambar II.32 Denah dan potongan pipa cahaya yang diusulkan

Penelitian ini mengusulkan suatu pipa cahaya yang dilengkapi dengan sistem penangkap datar yang cocok diintegrasikan dalam fasad bangunan tanpa tonjolan pada selubung bangunan.



Gambar II.33 Komponen pipa cahaya: (a) *reflecting chamber*; (b) *reflector*; (c) *diffusing chamber* dan (d) *glazing openings*

Sistem ini terdiri dari element planar tertutup, pengumpul dan pembelok cahaya matahari yang mengoptimasikan cahaya matahari yang datang karena variasi posisi matahari, dukting persegi dengan peralatan optik yang cocok untuk

mengantarkan cahaya matahari dan mengantarkannya ke ruang yang perlu diterangi.

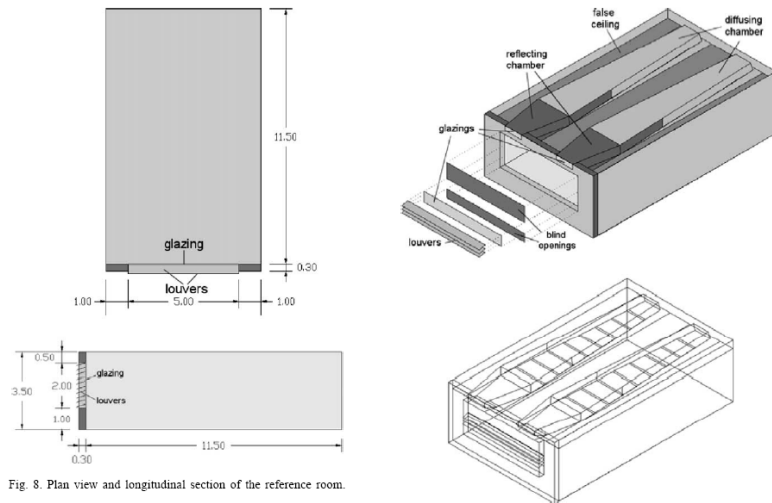


Fig. 8. Plan view and longitudinal section of the reference room.

Gambar II.34 Denah, tampak dan isometri ruang yang akan diteliti

Tabel II.7 Hasil percobaan yang menunjukkan tingkat pencahayaan rata-rata di daerah yang berjarak dari jendela ($E_{i,p}$) dan di daerah yang dekat jendela ($E_{i,a}$)

Month	$E_{i,p}$ (lx)		Percentage difference	$E_{i,a}$ (lx)		Percentage difference
	Test room	Reference room		Test room	Reference room	
January	370	178	+108	400	668	-40
February	392	190	+104	445	652	-32
March	354	187	+86	436	590	-26
April	286	179	+58	408	522	-22
May	222	171	+27	365	479	-24
June	192	169	+12	352	461	-24
July	222	171	+27	365	479	-24
August	286	179	+58	408	522	-22
September	354	187	+86	436	590	-26
October	392	190	+104	445	652	-32
November	370	178	+108	400	668	-40
December	352	172	+101	377	650	-42
Average	310	178	+74	398	574	-31

Chirattananon (2008) meneliti penggunaan reflektor statis dan dinamis untuk meningkatkan penangkapan dan penyaluran cahaya matahari langsung melalui pipa cahaya. Hasil percobaan dan pengukurannya menunjukkan bahwa pencahayaan alami melalui pipa cahaya dapat menyediakan tingkat pencahayaan yang memadai untuk ruang yang dalam hampir sepanjang hari dalam kondisi langit cerah dan sedikit berawan. Penelitiannya juga menunjukkan bahwa penggunaan pipa cahaya dan sistem reflektor yang melengkapi memanfaatkan

pencahayaannya alami dari cahaya matahari langsung yang dapat meneruskan cahaya matahari ke dalam ruangan yang lebih dalam.

Rosemann (2008) mengembangkan *core daylighting system* dengan teknologi yang aplikatif karena keterbatasan *daylighting* hanya pada perimeter area. Penelitiannya membuat model fisik *light pipe* dengan *outlet* berupa armatur lampu yang sekaligus berfungsi sebagai *extractor* cahaya alami maupun cahaya buatan dengan *inlet* berupa sistem *solar canopy*. *Solar canopy* mengumpulkan dan memantulkan cahaya matahari langsung melalui armatur yang dapat mendistribusikan pencahayaan alami sekaligus pencahayaan buatan. Hasil temuannya menyimpulkan bahwa sistem ini dapat menghasilkan pencahayaan memadai dengan bantuan kontrol dengan sistem DALI.



Gambar II.35 Pemasangan armatur cahaya pada plafond (a), Kondisi ruang dengan armatur cahaya sebagai outlet (b)



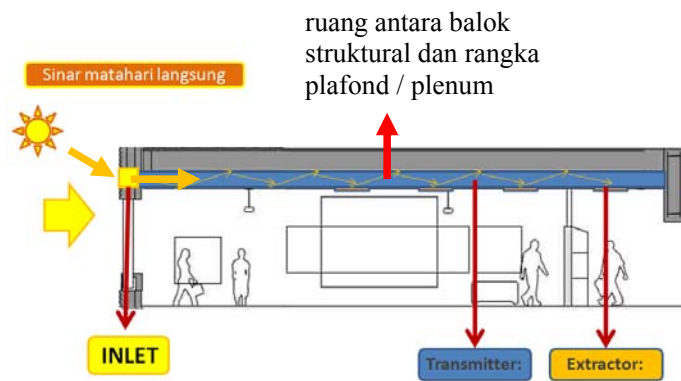
Gambar II.36 Pemasangan sistem *canopy* sebagai inlet pada ruang simulasi

Kwok, CM., et al., (2008) menunjukkan bahwa pipa cahaya horisontal dapat membantu untuk meningkatkan pencahayaan alami dan memperbaiki keseragaman distribusi cahaya dari pencahayaan alami siang hari sekalipun menggunakan peralatan pembayangan sinar matahari karena pipa cahaya horisontal mengambil cahaya dari fasad bangunan. Cahaya matahari langsung dan cahaya langit dapat berjalan melalui pipa cahaya horisontal ke ruang yang jauh dari jendela dimana sangat sedikit pencahayaan alami dari jendela yang dapat mencapainya. Pipa cahaya horisontal yang didesain dengan baik dapat mengurangi ketergantungan terhadap pencahayaan buatan yang secara tidak langsung juga turut menghemat energi.

Bab III Metodologi Penelitian

III.1 Pendahuluan

Penelitian ini mengkaji salah satu strategi pencahayaan alami pasif pada bangunan tebal bertingkat banyak dengan mengembangkan desain *inlet* pada pemanfaatan pipa cahaya horisontal. *Inlet* tersebut diletakkan pada fasad bangunan sedangkan pipa cahaya horisontal diletakkan dengan memanfaatkan ruang antara balok struktural dan rangka plafond atau ruang plenum.



Gambar III.1. Perletakan *inlet* dan pipa cahaya horisontal pada potongan gedung tebal

Penelitian ini mengkaji peristiwa pemantulan (*reflection*) dan pembiasan (*refraction*) cahaya matahari langsung pada prisma akrilik sebagai bukaan atau *inlet* pipa cahaya horisontal yang dipasang pada fasad bangunan. Objek studi dalam penelitian ini adalah sebuah ruang simulasi dengan orientasi bukaan menghadap Utara.

Penelitian ini merupakan penelitian dengan pendekatan kuantitatif. Metode yang digunakan adalah dengan menggabungkan hasil pengukuran di lapangan dengan simulasi numerik pada ruang simulasi.

III.2 Batasan Penelitian

Penelitian ini merupakan bagian awal dari serangkaian penelitian besar yang memerlukan beberapa tahapan dan proses yang panjang. Karena keterbatasan

waktu penelitian maka untuk penelitian kali ini ditentukan beberapa kondisi sebagai batasan penelitian. Beberapa kondisi tersebut adalah sebagai berikut:

1. Sumber cahaya matahari langsung yang digunakan adalah dari arah Timur
2. Sumber cahaya matahari langsung yang digunakan adalah cahaya matahari pada pukul 08.00 WIB, 09.00 WIB, 10.00 WIB dan 11.00 WIB. Matahari terbit pukul 06.00 WIB dan terbenam pukul 18.00 WIB sehingga sudut datang harian vertikal cahaya matahari langsung bergeser sebesar 15° pada setiap jamnya. Dengan kata lain sudut datang cahaya matahari langsung pada pukul 08.00 WIB = 30° , pukul 09.00 WIB = 45° , pukul 10.00 WIB = 60° , dan pukul 11.00 WIB = 75° .
3. Sudut datang cahaya matahari langsung dikondisikan tegak lurus dengan bidang lubang cahaya. Rancangan bukaan pencahayaan dengan prisma pembias dan pemantul ini berlaku dengan asumsi HSA (Horizontal Shadow Angel) sama dengan nol dengan kata lain belum mengakomodasi pergerakan cahaya matahari secara horisontal.
4. Pengaruh termal dari cahaya matahari langsung tidak termasuk dalam pembahasan kajian ini.
5. Bukaan pencahayaan pada bangunan tidak terbayangi oleh objek lain dengan kondisi langit cerah.
6. Pipa cahaya yang digunakan belum menggunakan material reflektif.

III.3 Langkah Penelitian

III.3.1 Tahap Pendahuluan

Pada tahap pendahuluan dilakukan kajian teoritik untuk memberikan gambaran perkembangan penelitian dan keilmuan di bidang pencahayaan alami pasif khususnya yang berkaitan dengan sistem *light transport* melalui pipa cahaya horisontal. Kemudian studi model dikembangkan berdasarkan kerangka teori dan hipotesis yang telah dibangun sebelumnya. Dengan memanfaatkan perbedaan indeks bias dari material akrilik maka dikembangkan studi model untuk setiap sudut datang cahaya matahari langsung yang telah ditentukan. Terdapat empat

model prisma akrilik dalam sebuah desain lubang bukaan yang mewakili empat waktu yaitu pukul 08.00 WIB, 09.00 WIB, 10.00 WIB dan 11.00 WIB.

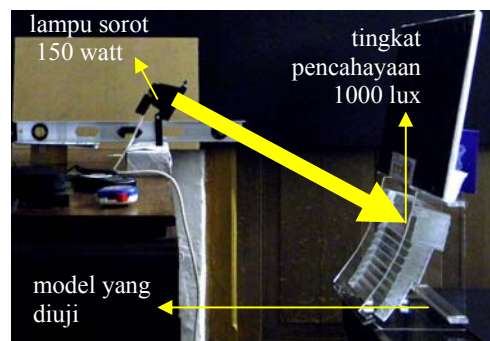
III.3.2 Tahap Perancangan Inlet Pipa Cahaya Horisontal

- **Perancangan dimensi model**

Model yang dibuat adalah model dengan skala penuh. Ketinggian model lubang bukaan pada fasad bangunan disesuaikan dengan rencana perletakan pipa cahaya horisontal dalam bangunan tebal bertingkat banyak. Pipa cahaya horisontal diletakkan dengan memanfaatkan ruang antara balok struktural dengan rangka plafon (ruang plenum). Pada bangunan tebal bertingkat banyak terdapat ruang antara balok struktural dengan rangka plafon yang umumnya digunakan sebagai ruang untuk meletakkan berbagai peralatan utilitas bangunan seperti *duckting AC*, pipa, kabel listrik dan lain sebagainya. Oleh sebab itu, tinggi model ditetapkan tidak lebih dari 30 cm. Penentuan lebar model dilakukan dengan pertimbangan efisiensi material, waktu dan biaya pengerjaan. Untuk kemudahan operasional pengukuran di lapangan maka lebar model ditentukan 30 cm.

III.3.3 Tahap Pengujian Laboratorium

Model diuji pada percobaan laboratorium dengan menggunakan lampu sebagai pengganti cahaya matahari langsung. Pada pengukuran laboratorium ini digunakan lampu sorot 150 watt. Seting pengukuran laboratorium ini mengambil kondisi ideal dimana perubahan sudut datang harian tegak lurus dengan bidang bukaan. Perubahan sudut datang harian dikondisikan mulai dari 30°, 45°, 60° sampai dengan 75°.



Gambar III.2 Pengukuran laboratorium dengan lampu sorot

Pada saat pengukuran, dilakukan penyesuaian posisi prisma karena kualitas cahaya lampu sorot tidak seperti cahaya datang matahari yang memiliki berkas cahaya sejajar. Lampu sorot memiliki keterbatasan sudut penyinaran maka ketika pengukuran dilakukan, tingkat pencahayaan lampu sorot yang diukur adalah pada bagian yang mengenai bidang prisma yang akan diujikan. Untuk setiap prisma yang diukur ditetapkan tingkat pencahayaan lampu sorot ± 1000 lux.

Pengukuran tingkat pencahayaan dilakukan di setiap jarak dengan kelipatan 0,6 meter sampai mencapai 12 meter. Modul kelipatan 0,6 meter ini diperoleh dari hasil studi modul titik pencahayaan pada ruang simulasi yang ditetapkan berdasarkan modul bahan dari penutup plafond.

III.3.4 Tahap Pengujian Lapangan

Survei lokasi pengukuran lapangan dilakukan dengan mempertimbangkan kemudahan operasional pengukuran di lapangan. Beberapa hal pertimbangan pemilihan lokasi:

1. Lokasi cukup lapang dan datar untuk memudahkan penempatan model prisma akrilik maupun model pipa cahaya horisontal.
2. Ketersediaan cahaya matahari sepanjang waktu pengukuran (pukul 08.00-11.00 WIB) yang bebas dari pohon atau bayangan bangunan lain.

Setelah survei dilakukan, ditetapkan bahwa lokasi pengukuran lapangan dilakukan pada lantai atap dak beton dari sebuah bangunan 3 lantai. Pengukuran dilakukan pada tanggal 23 Juli 2011.

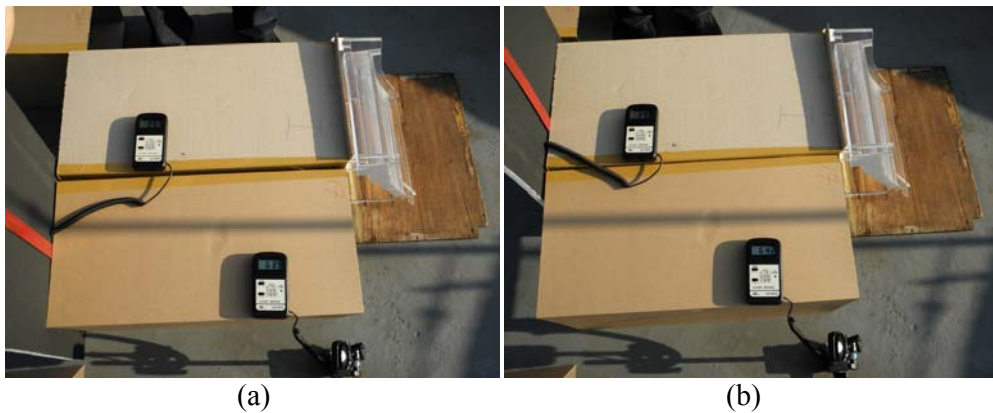
Pengukuran dilakukan sebanyak 4 kali. Pada setiap pengukuran dilakukan setting sudut untuk menentukan arah perletakkan model dan model pipa cahaya horisontal yang terbuat dari kardus berukuran 30 x 30 x 60 cm. Setting arah model pipa cahaya horisontal dilakukan dengan penarikan benang untuk memastikan agar arah pipa tidak bergeser.



Gambar III.3. Penempatan model sesuai dengan arah sudut datang cahaya matahari



Gambar III.4. Penempatan pipa cahaya horisontal sesuai dengan arah sudut datang cahaya matahari



Gambar III.13. Pengukuran pada pipa cahaya horisontal tanpa model prisma akrilik (a); Pengukuran pada pipa cahaya horisontal tanpa model prisma akrilik (b)

Pengukuran menggunakan 2 buah light meter digital untuk mengukur tingkat pencahayaan di dalam model pipa cahaya horisontal dan tingkat pencahayaan dari cahaya matahari langsung. Kedua alat ini harus dicek dan dikalibrasi dengan cara mengukur bersamaan dan menukar posisi sensor dan membandingkan hasilnya. Hasil dari pengecekan alat menunjukkan bahwa kedua alat ini memiliki hasil yang cukup akurat.



Gambar III.5 Kalibrasi *light meter digital*



Gambar III.6 Penempatan model yang sudah disesuaikan dengan arah sudut datang cahaya matahari pk.08.00WIB

Sebelum pengukuran dilakukan pengecekan posisi model dengan menggunakan water pas supaya prisma model dapat bekerja dengan baik sesuai dengan pengujian sudut pada laboratorium.



Gambar III.7 Kondisi di dalam model pipa cahaya horisontal dengan model pk.08.00 WIB di kedalaman 7,8 meter



Gambar III.8 Kondisi di dalam model pipa cahaya horisontal dengan model pk.11.00 WIB di kedalaman 7,8 meter



Gambar III.19 Penempatan model yang sudah disesuaikan dengan arah sudut datang cahaya matahari pk.09.00WIB



Gambar III.10 Penempatan model yang sudah disesuaikan dengan arah sudut datang cahaya matahari pk.10.00WIB

III.3.4 Tahap Data Hasil Pengukuran dan Analisis

Analisis dilakukan baik pada uji sudut menggunakan cahaya laser, uji refleksi dan refraksi menggunakan cahaya lampu maupun uji refleksi dan refraksi menggunakan cahaya matahari langsung

III.3.5 Tahap Pembahasan

Bab pembahasan akan mengintrepetasi hasil analisis dan implementasi sistem pencahayaan dengan prisma pembias dan pemantul ini pada ruang simulasi yang berkarakter tebal.

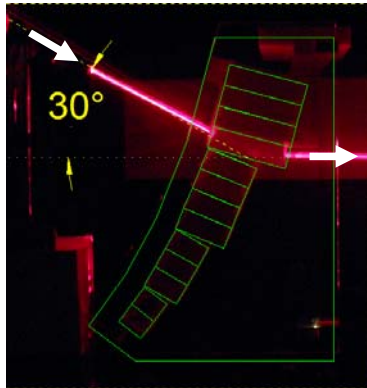
III.3.6 Tahap Kesimpulan dan Saran

Bab kesimpulan berisi hasil pembahasan yang menunjukkan model usulan terbaik dan saran bagi pengembangan penelitian lebih lanjut.

Bab IV Hasil Analisis Kinerja Prisma Pembias dan Pemantul

IV.1 Analisis uji refleksi dan refraksi dengan cahaya laser

Hasil pengujian dengan cahaya laser pada konfigurasi model prisma pembias dan pemantul menunjukkan bahwa terjadi pembelokkan cahaya laser pada prisma pembias dan pemantul sehingga dihasilkan cahaya laser yang dapat mencapai posisi horisontal. Pengujian ini dilakukan pada setiap prisma.



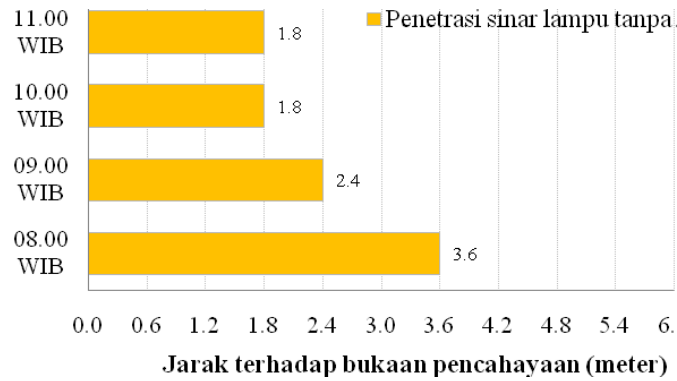
Gambar IV.1. Contoh hasil pengujian pada prisma akrilik pukul 08.00 WIB

Hasil dari pengujian ini memvalidasi bahwa model ini bisa digunakan dalam percobaan laboratorium maupun percobaan lapangan.

IV.2 Uji refleksi dan refraksi prisma pembias dan pemantul di laboratorium dengan menggunakan cahaya dari lampu sorot.

Tingkat pencahayaan pada pipa cahaya horisontal tanpa penggunaan prisma cahaya matahari langsung hanya dapat mencapai kedalaman rata-rata 1,8 meter dari bukaan pencahayaan atau 6 kali dari tinggi bukaan pencahayaan. Semakin siang, penetrasi cahaya matahari langsung ke dalam pipa cahaya horisontal semakin dekat dengan bukaan pencahayaan. Hal ini membuktikan bahwa cahaya matahari langsung pada pipa cahaya horisontal tanpa penggunaan prisma pembias dan pemantul sangat tergantung pada besar sudut datang cahaya matahari.

Semakin tinggi sudut datangnya maka semakin pendek kedalaman penetrasi cahaya matahari langsung dari bukaan pencahayaan.



Gambar IV.2 Grafik perbandingan jarak penetrasi cahaya lampu dalam pipa cahaya horisontal tanpa penggunaan model prisma pembias dan pemantul

Dari keseluruhan analisis dapat disimpulkan secara umum bahwa semakin tinggi sudut datang sumber pencahayaan maka semakin kecil tingkat pencahayaan yang dapat diteruskan. Hal ini dapat disebabkan karena semakin tinggi sudut datang cahaya, semakin kecil pengaruh penetrasi cahaya sumber pencahayaan sehingga tingkat pencahayaan di dalam pipa cahaya horisontal adalah cahaya hasil pembelokkan dari prisma.

Pengukuran tingkat pencahayaan di dalam pipa cahaya horisontal dengan penggunaan model menunjukkan bahwa kinerja prisma pukul 08.00 WIB dapat menghasilkan tingkat pencahayaan yang paling tinggi dibanding ketiga varian prisma yang lainnya. Prisma ini juga dapat meneruskan cahaya lampu ± 1000 lux sampai kedalaman 12 meter dari bukaan pencahayaan dengan tingkat pencahayaan sebesar 1,5 lux.

Hasil analisa pengukuran di laboratorium menunjukkan bahwa kinerja prisma untuk pukul 11.00 WIB pada model hanya dapat meneruskan cahaya sampai kedalaman 7,8 meter dari bukaan pencahayaan. Sedangkan kinerja prisma pukul 11.00 WIB pada model sudut datang utama siang dapat meneruskan cahaya sampai kedalaman 12 meter dari bukaan pencahayaan.

IV.2.1 Analisis keseragaman tingkat pencahayaan (*Illuminance uniformity*)

Hasil pengukuran pukul 08.00-11.00 WIB menunjukkan bahwa nilai *illuminance uniformity* model adalah 0,26 sampai kedalaman 12 meter dari bukaan pencahayaan. Nilai *illuminance uniformity* yang rendah ini disebabkan karena kinerja model pada pukul 11.00 WIB tidak maksimal.

Tabel IV.1 Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan pada pukul 08.00-11.00 WIB (s/d kedalaman 7,8 meter dari bukaan pencahayaan)

Model	Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan
Prisma pembias dan pemantul	0,40

IV.2.2 Analisis laju penurunan tingkat pencahayaan

Hasil analisis laju penurunan pada penggunaan model sudut datang utama pagi dan siang menunjukkan bahwa grafik laju penurunan yang landai berada pada kedalaman optimum 1,8 - 4,2 meter dari bukaan pencahayaan.

Tabel IV.2 Rata-rata laju penurunan tingkat pencahayaan pada pukul 08.00-11.00 WIB pada kedalaman 1,8 - 4,2 meter dari bukaan pencahayaan

Model prisma pembias dan pemantul		Keseragaman tingkat pencahayaan
		1,8 - 4,2 meter
		0,56
Rata-rata laju penurunan tingkat pencahayaan per 0,6 meter (lux/m')	08.00 WIB	27,1
	09.00 WIB	22,1
	10.00 WIB	24,8
	11.00 WIB	14,2

Dari segi keseragaman tingkat pencahayaan, model memiliki keseragaman tingkat pencahayaan yang baik sampai pada kedalaman 4,2 meter dari bukaan pencahayaan namun setiap prisma memiliki rata-rata laju penurunan tingkat

pencahayaan yang tinggi dengan nilai berkisar 53-81 lux/m'. Sedangkan pada kedalaman 4,8-12 meter dari bukaan pencahayaan keseragaman tingkat pencahayaan memburuk namun setiap prisma memiliki rata-rata laju penurunan tingkat pencahayaan yang rendah dengan nilai berkisar 1-1,4 lux/m'. Hal ini disebabkan karena semakin dekat dengan bukaan pencahayaan, tingkat pencahayaan semakin besar sehingga nilai laju yang dihasilkan juga besar.

Tabel IV.3 Rata-rata laju penurunan tingkat pencahayaan per 0,6 meter sampai kedalaman 12 meter dari bukaan pencahayaan

Model	Rata-rata laju penurunan tingkat pencahayaan per 0,6 meter (lux/m')
Prisma pembias dan pemantul	22,1

IV.2.3 Hasil analisis efisiensi tingkat pencahayaan

Penggunaan model prisma pembias dan pemantul menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi terjadi pada prisma pukul 08.00 WIB sedangkan efisiensi terendah terjadi pada prisma pukul 11.00 WIB. Hal ini terjadi karena semakin rendah sudut datang sinar matahari maka pengaruh penetrasi cahaya lampu ke dalam pipa cahaya horisontal semakin besar sehingga dapat meningkatkan tingkat pencahayaan di dalam pipa. Sedangkan semakin tinggi sudut datang sumber cahaya maka semakin pendek pengaruh penetrasi cahaya lampu ke dalam pipa cahaya. Dengan demikian dapat disimpulkan untuk tingkat sumber pencahayaan yang kurang lebih sama maka jumlah prisma pukul 11.00 WIB harus diperbanyak supaya kinerja prisma dapat ditingkatkan.

Tabel IV.4 Rata-rata efisiensi tingkat pencahayaan setelah melalui prisma pembias dan pemantul

Model	Rata-rata efisiensi tingkat pencahayaan (%)
Prisma pembias dan pemantul	24,2

Tabel IV.5 Rekapitulasi kinerja model sudut datang utama pagi dan siang

	Model prisma pembias dan pemantul
Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan (sampai kedalaman 12m dari bukaan pencahayaan)	0,26
Rata-rata laju penurunan tingkat pencahayaan (sampai kedalaman 12m dari bukaan pencahayaan)	22,1 lux/m'
Rata-rata efisiensi tingkat pencahayaan	24,2 %

IV.3 Uji refleksi dan refraksi prisma pembias dan pemantul di lapangan dengan menggunakan cahaya matahari langsung.

IV.3.1 Analisis keseragaman tingkat pencahayaan pada penggunaan model sudut datang utama pagi

Penetrasi cahaya matahari langsung ke dalam pipa cahaya horisontal tanpa penggunaan model prisma pembias dan pemantul secara gradual menurun sesuai dengan pergerakan waktu. Hasil kinerja model di lapangan ini sama dengan hasil pada pengukuran di laboratorium.

Tabel IV.6 Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan pada pukul 08.00-10.00 WIB sampai kedalaman 12 meter dari bukaan pencahayaan

Model	Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan
Prisma pembias dan pemantul	0,49

IV.3.2 Analisis laju penurunan tingkat pencahayaan

Tabel IV.7 Rata-rata laju penurunan tingkat pencahayaan per 0,6 meter sampai kedalaman 12 meter dari bukaan pencahayaan

Model	Rata-rata laju penurunan tingkat pencahayaan per 0,6 meter (lux/m')
Prisma pembias dan pemantul	7.871

IV.3.3 Analisis efisiensi tingkat pencahayaan

Model sudut datang utama pagi memiliki nilai efisiensi tingkat pencahayaan yang lebih baik dari model sudut datang utama siang.

Tabel IV.8 Rata-rata efisiensi tingkat pencahayaan

Model	Rata-rata efisiensi tingkat pencahayaan (%)
Prisma pembias dan pemantul	40,6

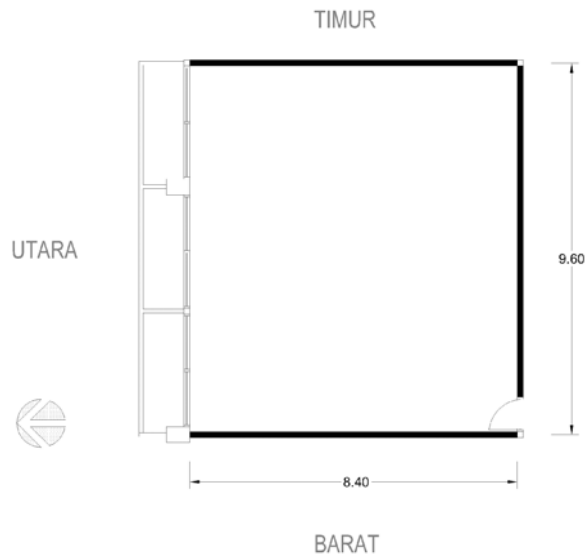
Tabel IV.9 Rekapitulasi kinerja model prisma pembias dan pemantul

	Model prisma pembias dan pemantul
Rata-rata <i>uniformity</i> tingkat pencahayaan (sampai kedalaman 12m dari bukaan pencahayaan)	0,49
Rata-rata efisiensi tingkat pencahayaan (sampai kedalaman 12m dari bukaan pencahayaan)	7.871 lux/m'
Rata-rata efisiensi tingkat pencahayaan	40,6 %

Bab V Simulasi Penggunaan Pipa Cahaya Horisontal

V.1 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada ruangan simulasi

Penggunaan prisma pembias dan pemantul sebagai bukaan pencahayaan pada pipa cahaya horisontal dapat diterapkan untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas pencahayaan pada sebuah ruang. Pada bab pembahasan ini, prisma pembias dan pemantul sebagai bukaan pencahayaan pada pipa cahaya horisontal diuji coba pada sebuah ruang simulasi. Ruang simulasi berukuran 8,4 x 9,6 meter dan memiliki bukaan pencahayaan samping melalui jendela dengan arah orientasi bukaan ke Utara.



Gambar V.1 Denah ruang simulasi



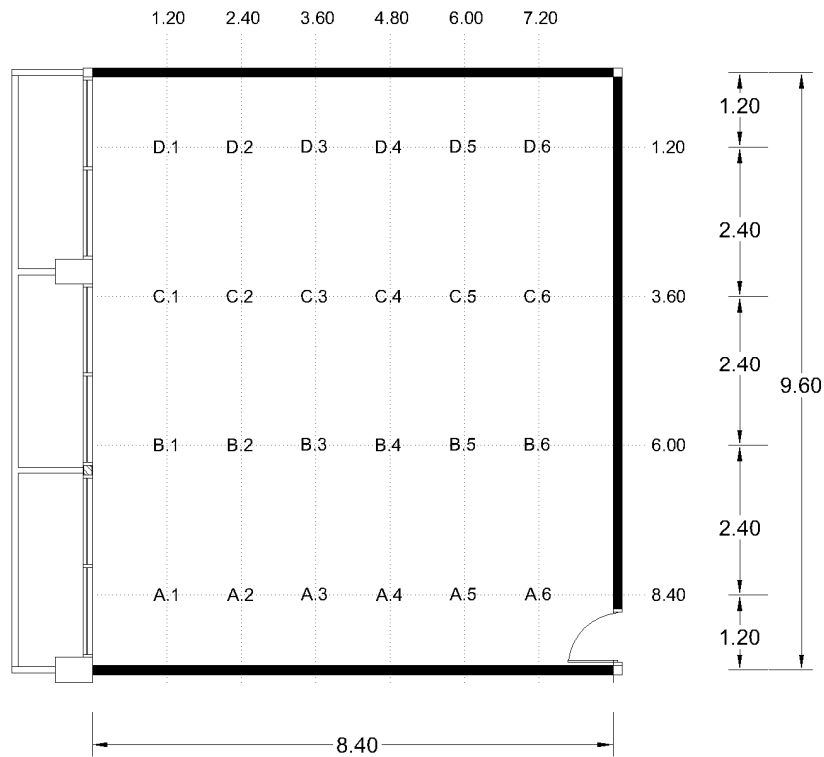
Gambar V.2 Foto ruang simulasi

Karena kesulitan teknis operasional di lapangan, maka pengukuran pengaruh penggunaan prisma pembias dan pemantul sebagai bukaan pipa cahaya horisontal pada orientasi Timur pada ruang simulasi dilakukan melalui simulasi numerik. Simulasi numerik ini dapat memberi gambaran secara global pengaruh penambahan sistem pencahayaan melalui pipa cahaya horisontal pada ruang simulasi.

Pengukuran pada ruang simulasi dalam kondisi pencahayaan dengan jendela eksisting dilakukan secara langsung di lapangan dengan menggunakan bantuan alat ukur *light meter digital* pada ketinggian bidang kerja (=75 cm dari lantai). Sedangkan data pengukuran tingkat pencahayaan di dalam pipa cahaya horisontal dengan penangkap prisma pembias dan pemantul menggunakan hasil pengukuran lapangan.

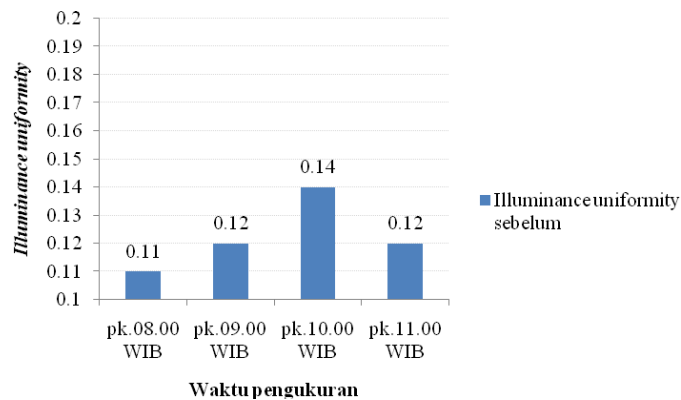
Oleh karena hasil pengukuran lapangan adalah tingkat pencahayaan di dalam pipa cahaya horisontal maka diperlukan asumsi efisiensi tingkat pencahayaan. Efisiensi tingkat pencahayaan ini menunjukkan perbandingan tingkat pencahayaan di dalam pipa cahaya horisontal dengan tingkat pencahayaan yang sampai ke bidang kerja. Pada penelitian ini efisiensi tingkat pencahayaan maksimal dibatasi 60%. Untuk nilai efisiensi tingkat pencahayaan yang lebih akurat, diperlukan penelitian lebih lanjut yang berkaitan dengan pembahasan material pipa cahaya horisontal dan outlet dari pipa cahaya.

Simulasi ini membandingkan kualitas tingkat pencahayaan sebuah ruang simulasi sebelum dan setelah penggunaan pipa cahaya horisontal. Pengukuran dilakukan dengan posisi titik pengukuran seperti terlihat pada Gambar VI.3. Pengukuran dilakukan pukul 08.00, 09.00, 10.00 dan 11.00 WIB pada tanggal 23 Agustus 2011.

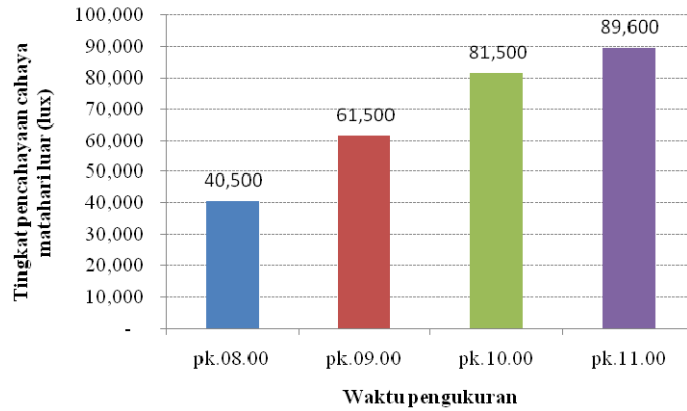


Gambar V.3 Posisi titik pengukuran pada ruang simulasi

Untuk mengetahui keseragaman tingkat pencahayaan pada ruang simulasi maka dilakukan analisis keseragaman tingkat pencahayaan. Analisis keseragaman tingkat pencahayaan ini dilakukan pada setiap waktu pengukuran dengan membandingkan nilai tingkat pencahayaan terkecil dengan nilai tingkat pencahayaan terbesar. Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan dalam ruang simulasi selama pengukuran pada pukul 08.00-11.00 WIB adalah 0,12.

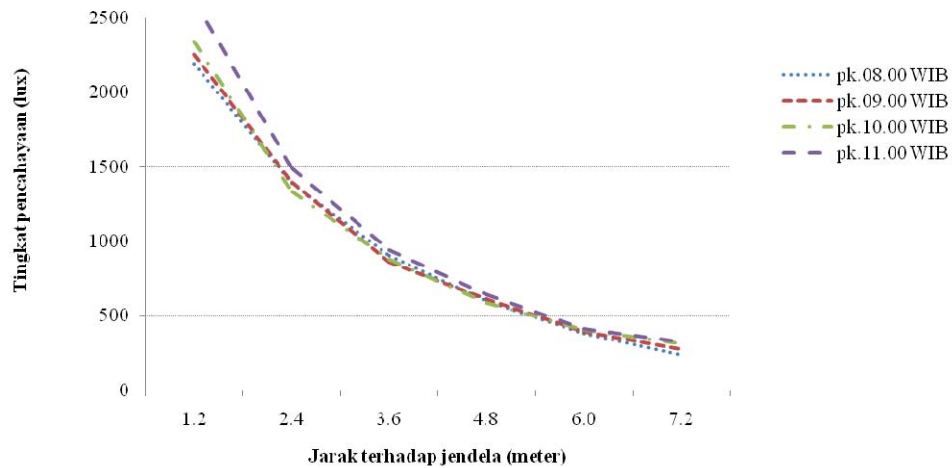


Gambar V.4 Keseragaman tingkat pencahayaan pada ruang simulasi



Gambar V.5 Tingkat pencahayaan cahaya matahari global pada saat pengukuran (23 Agustus 2011)

Rata-rata tingkat pencahayaan cahaya matahari global adalah 68.275 lux dengan simpangan baku sebesar 32,2%. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi tingkat pencahayaan cahaya matahari di luar ruang yang cukup fluktuatif tidak terlalu mempengaruhi tingkat pencahayaan di dalam ruang karena pencahayaan alami melalui jendela samping yang berorientasi ke utara memanfaatkan cahaya langit yang relatif lebih stabil.



Gambar V.6 Rata-rata tingkat pencahayaan pada ruang simulasi

Tabel V.1 Laju penurunan rata-rata tingkat pencahayaan pada ruang simulasi

	Laju penurunan tingkat pencahayaan (lux/m')
08.00	325
09.00	330
10.00	338
11.00	383

Upaya perbaikan kualitas pencahayaan alami pada ruang simulasi dilakukan dengan cara memanfaatkan cahaya matahari langsung dengan orientasi Timur. Cahaya matahari langsung ini ditangkap dan dibelokkan oleh prisma pembias dan pemantul dan kemudian disalurkan ke dalam ruang melalui pipa cahaya horisontal. Pipa cahaya horisontal terdiri dari tiga komponen utama yaitu inlet yang berfungsi sebagai penangkap cahaya matahari langsung berupa bukaan pencahayaan pada fasad bangunan, transmitter yang berfungsi menyalurkan cahaya berupa pipa cahaya dan outlet sebagai pendistribusi cahaya ke dalam ruang. Pada simulasi ini digunakan pipa cahaya horisontal dengan 7 outlet sebagai *emitter* cahaya ke dalam ruangan masing-masing berjarak 1,2 meter dari fasad dinding Timur.

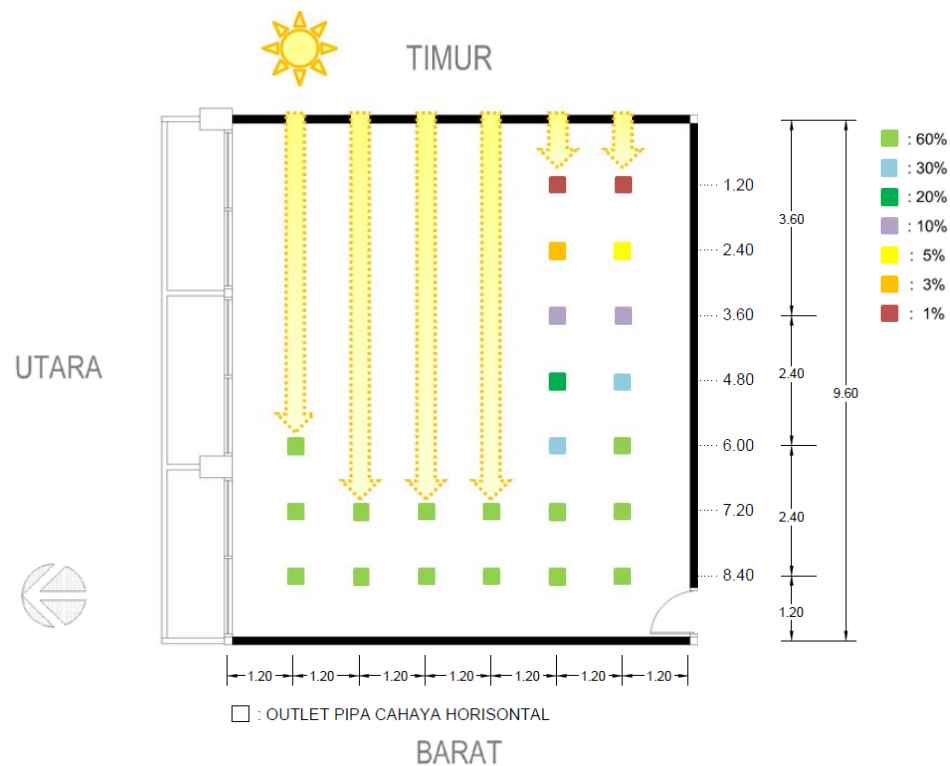
Untuk melakukan simulasi numerik perlu beberapa asumsi yang ditetapkan antara lain adalah sebagai berikut:

1. Transmitter dan outlet diasumsikan tetap dengan efisiensi tingkat pencahayaan terbesar 60% pada bidang kerja setinggi 75 cm.
2. Jendela pada ruang simulasi menghadap orientasi Utara.
3. Model prisma yang digunakan adalah model sudut datang utama pagi dengan kondisi pipa cahaya horisontal menggunakan material kardus yang tidak reflektif.

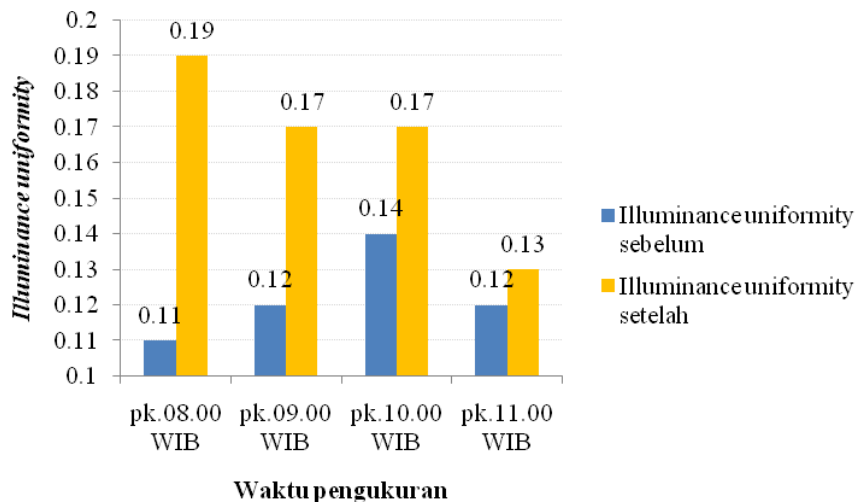
Analisis kualitas pencahayaan alami pada ruang kelas meliputi:

1. Analisis kesergamaan tingkat pencahayaan dalam ruang simulasi pada setiap waktu pengukuran
2. Analisis keseragaman tingkat pencahayaan sepanjang waktu pengukuran (pukul 08.00-11.00)
3. Analisis laju penurunan tingkat pencahayaan

Pada tahap awal simulasi dilakukan simulasi penambahan outlet pipa cahaya horizontal setiap waktu pengukuran pukul 08.00, 09.00, 10.00 dan 11.00 WIB dengan kondisi ideal pada setiap waktu yang bersangkutan. Setelah kondisi ideal setiap jam diperoleh, dilakukan analisa untuk mencari penambahan outlet pipa cahaya yang paling optimum untuk sepanjang waktu pengukuram pukul 08.00-11.00 WIB. Gambar VI.7 menunjukkan posisi penambahan outlet yang paling optimum pada ruang simulasi. Penambahan outlet harus disesuaikan dengan jumlah tingkat pencahayaan yang diperlukan sehingga tingkat efisiensi outlet diatur agar tingkat pencahayaan di dalam ruang simulasi lebih merata.



Gambar V.7 Posisi penambahan outlet pipa cahaya horizontal pada ruang simulasi untuk kondisi optimum pukul 08.00-11.00 WIB



Gambar V.8 Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan pada ruang simulasi sebelum dan sesudah penggunaan prisma pembias dan pemantul

Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan pada kondisi eksisting sebesar 0,12 sedangkan rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan sesudah penggunaan prisma pembias dan pemantul meningkat sebesar menjadi 0,17.

Tabel V.2 Rekapitulasi kualitas pencahayaan pada ruang simulasi sebelum dan setelah penggunaan prima pembias dan pemantul

Waktu pengukuran pada ruang simulasi	Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan		Laju penurunan tingkat pencahayaan (lux/m')	
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
pk.08.00	0.11	0.19	325	285
pk.09.00	0.12	0.17	330	306
pk.10.00	0.14	0.17	338	319
pk.11.00	0.12	0.13	383	378
Rata-rata	0.12	0.17	331	303

Perbaikan tingkat pencahayaan pada ruang simulasi dengan penambahan pipa cahaya horisontal dapat berkontribusi dalam hal peningkatan keseragaman tingkat pencahayaan dalam ruang dan pengurangan laju penurunan tingkat pencahayaan.

Rata-rata keseragaman tingkat pencahayaan sepanjang waktu pengukuran pukul 08.00-11.00 WIB menunjukkan perbaikan keseragaman tingkat pencahayaan yang

cukup berarti. Namun keseragaman tingkat pencahayaan dalam ruangan masih tetap rendah setelah penambahan pipa cahaya horisontal. Karakter tingkat pencahayaan alami yang begitu besar di daerah dekat jendela dan kemudian menurun drastis di daerah yang jauh dari jendela menyulitkan upaya pemerataan keseragaman tingkat pencahayaan dalam ruang.

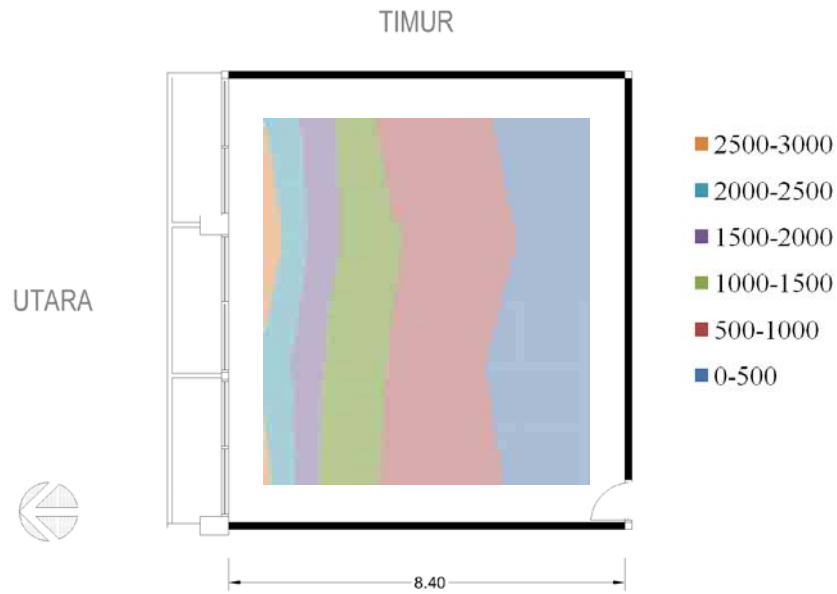
Oleh sebab itu, pemanfaatan pencahayaan alami dengan menggunakan jendela samping perlu ditinjau kembali karena menghasilkan keseragaman tingkat pencahayaan yang buruk dalam sebuah ruang. Untuk mengkaji ulang desain jendela samping, perlu meninjau aspek fungsi dari sebuah jendela. Jendela memiliki beberapa fungsi seperti:

1. Fungsi penerangan melalui pencahayaan alami
2. Fungsi ventilasi dengan penerapan bukaan pada jendela
3. Fungsi aksesibilitas, misalnya sebagai jalur untuk pemeliharaan bangunan.
4. Memberikan view ke luar sehingga hubungan dengan alam luar tidak terputus.
5. Fungsi estetika

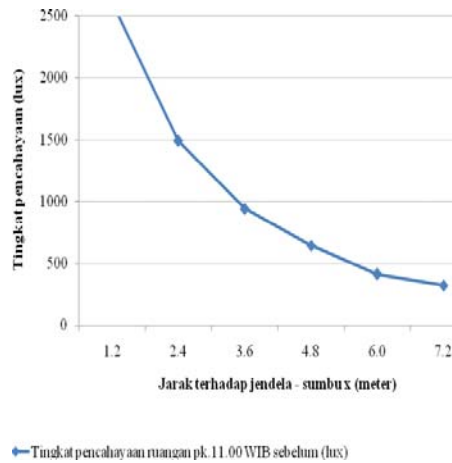
Upaya perbaikan desain jendela sebaiknya tidak menghilangkan salah satu fungsi di atas. Sebagai contoh kasus adalah desain jendela pada ruang simulasi. Tinggi ruangan 3,5 meter dengan tinggi jendela 2,1 meter. sebuah modul jendela memiliki panjang 2,8 meter. Jenis jendela adalah jendela nako dengan material kaca transparan.



Gambar V.9 Tampak dan foto jendela samping pada ruang simulasi



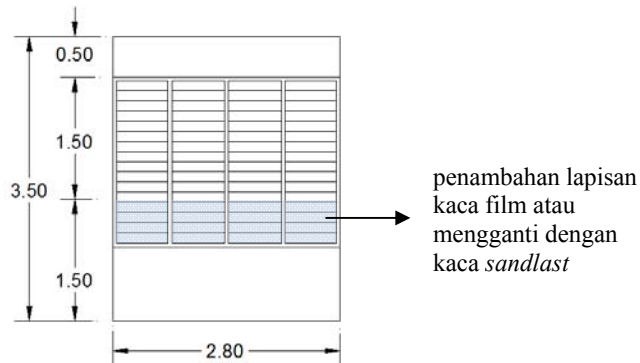
Gambar V.10 Gradasi tingkat pencahayaan pada ruang simulasi (lux)



Gambar V.11 Grafik tingkat pencahayaan pada ruang simulasi (lux)

Upaya perbaikan desain jendela harus tetap memperhatikan aspek fungsi jendela yang lain selain fungsi penerangan. Salah satu upaya adalah dengan mengurangi tingkat pencahayaan dari jendela dengan melapisi kaca nako transparan dengan kaca film atau mengganti kaca dengan kaca *sandblast* yang dapat meningkatkan nilai *shading coefficient* dari jendela tersebut dan sekaligus mereduksi tingkat pencahayaan yang masuk. Penggantian kaca dilakukan sampai pada ketinggian

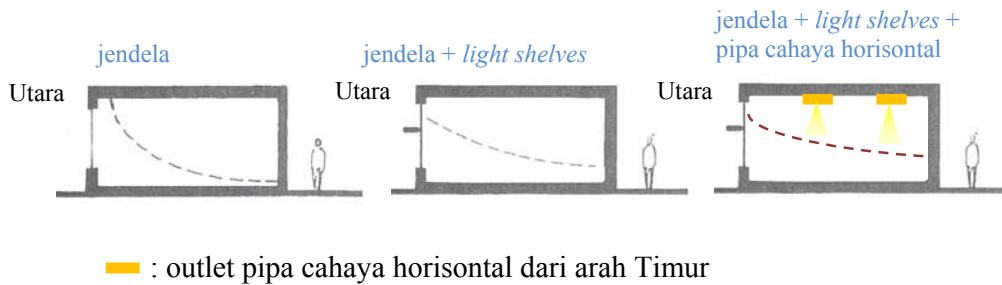
1,5 meter dari lantai atau sama dengan ketinggian mata orang saat berdiri agar tidak mengganggu aspek fungsi jendela yang dapat memberikan view ke luar.



Gambar V.12 Upaya perbaikan desain jendela kaca nako

Seandainya desain jendela diperbaiki maka diharapkan dapat menghasilkan gradien tingkat pencahayaan yang lebih baik dan keseragaman tingkat pencahayaan pada ruang bisa diperbaiki menjadi lebih merata.

Upaya lain adalah dengan mengkombinasikan penggunaan jendela kaca samping dengan *light shelves*.

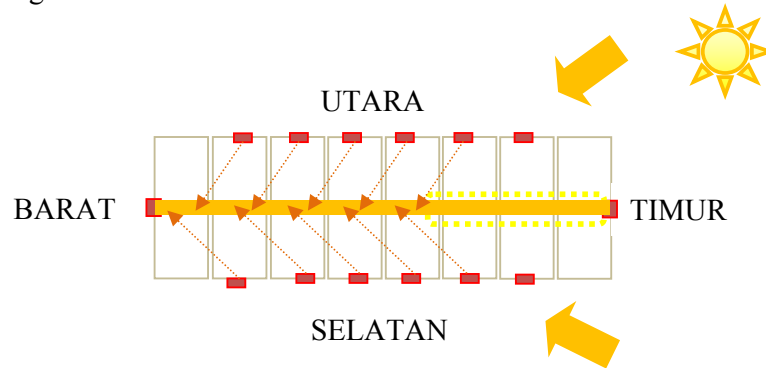


Gambar V.13 Upaya perbaikan dengan penggunaan *light shelves* dan pipa cahaya horisontal

Kajian berbagai macam potensi desain jendela samping yang dapat mengurangi kecuraman laju penurunan dari grafik tingkat pencahayaan berpotensi untuk dikembangkan pada penelitian selanjutnya.

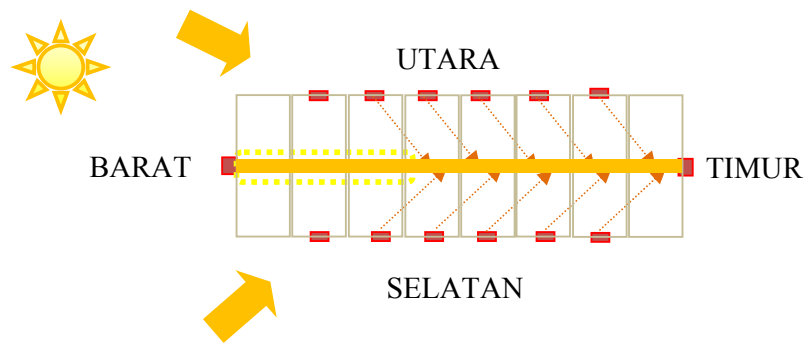
V.2 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada berbagai tipe bangunan tebal

Pada kasus tipe bangunan deret, penggunaan pipa cahaya dapat digunakan untuk meningkatkan keseragaman tingkat pencahayaan khususnya untuk daerah koridor, ruang-ruang yang dalam.



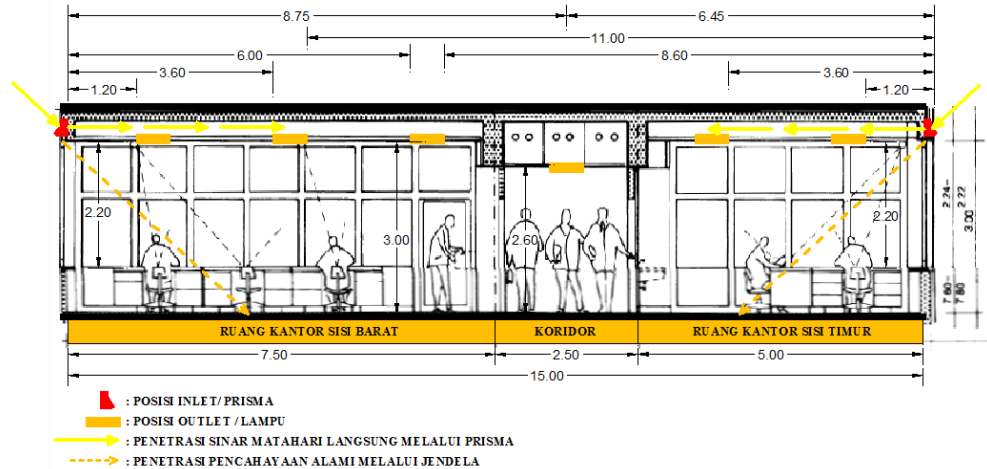
■ : inlet pipa cahaya horisontal

Gambar V.14 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada tipe bangunan deret (pukul 08.00-11.00 WIB)



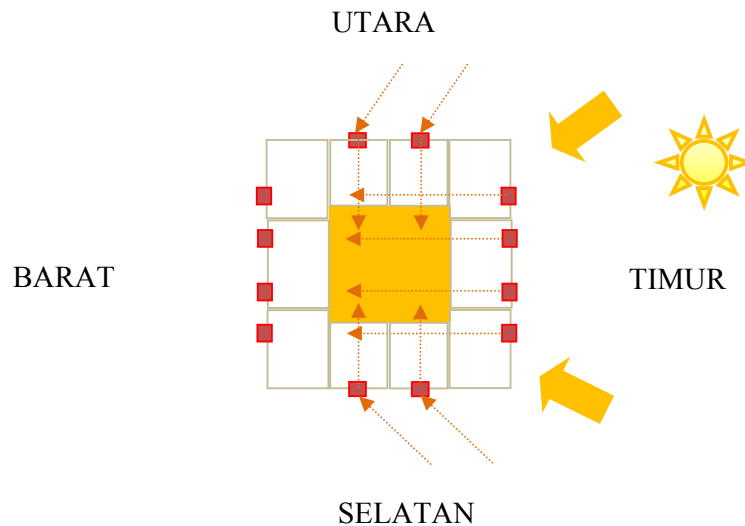
■ : inlet pipa cahaya horisontal

Gambar V.15 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada tipe bangunan deret (pukul 13.00-16.00 WIB)



Gambar V.16 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada tipe bangunan deret

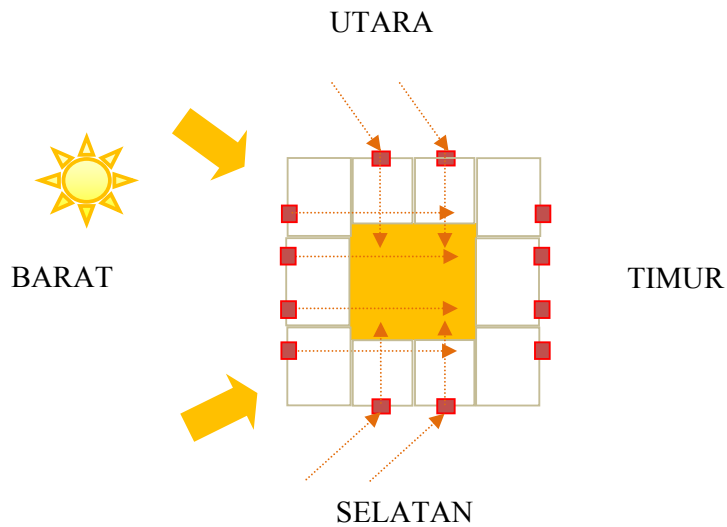
Pada kasus tipe bangunan tower, penggunaan pipa cahaya dapat digunakan untuk memperbaiki keseragaman tingkat pencahayaan khususnya untuk daerah ruang-ruang yang dalam.



■ : inlet pipa cahaya horisontal

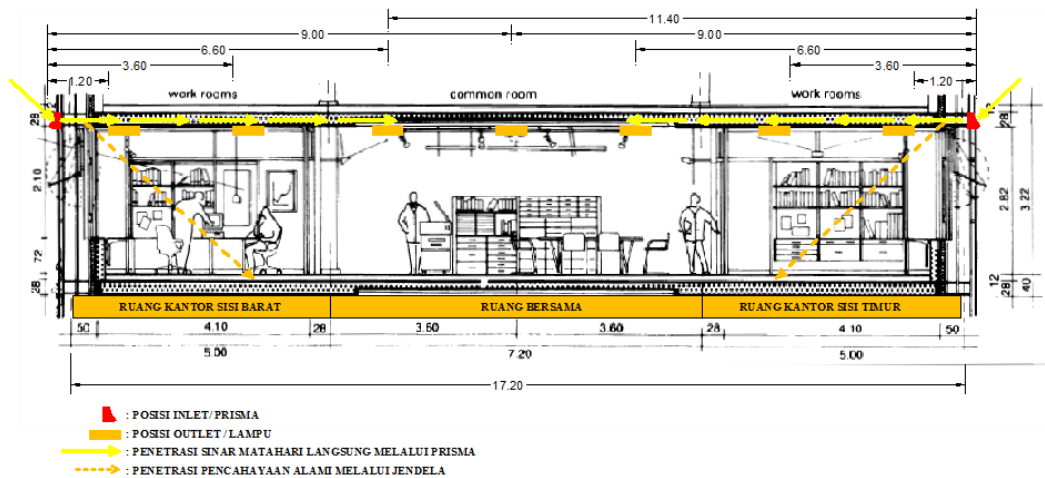
Gambar V.17 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada tipe bangunan tower (pukul 08.00-11.00 WIB)

Keseragaman tingkat pencahayaan pada ruang dengan penggunaan pipa cahaya horisontal dapat diperbaiki dengan mengkaji ulang desain dari jendela samping seperti pada pembahasan desain jendela pada ruang simulasi.



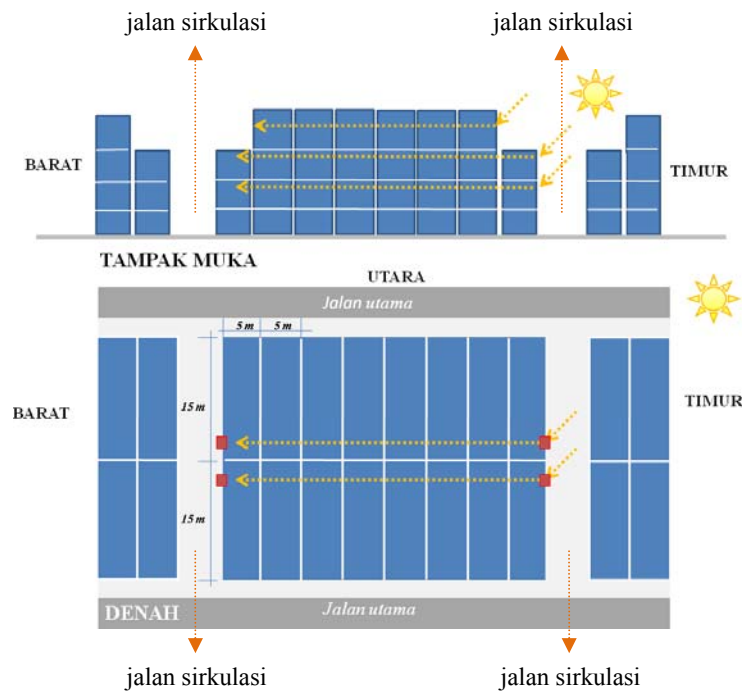
■ : inlet pipa cahaya horisontal

Gambar V.18 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada tipe bangunan tower (pukul 13.00-16.00 WIB)



Gambar V.19 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada tipe bangunan tower

Pada kasus bangunan ruko, seringkali bentuk bangunan memanjang dengan lebar bangunan menghadap arah jalan utama. Tipe bangunan seperti ini mengakibatkan adanya daerah gelap yang tidak mendapatkan tingkat pencahayaan yang cukup, apalagi bila ruang di dalam bangunan bersekat.



Gambar V.20 Potensi penggunaan pipa cahaya horisontal pada tipe bangunan ruko

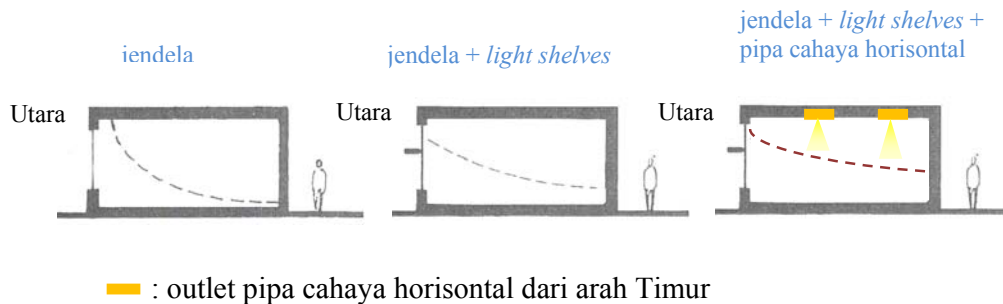
Kemampuan dari kinerja pipa cahaya horisontal dapat menentukan jumlah deretan ruko yang dimungkinkan sebelum diberi jalan sirkulasi baik untuk keperluan penghawaan, pencahayaan maupun pengamanan terhadap bahaya kebakaran. Konfigurasi ketinggian dari bangunan ruko juga perlu diperhatikan supaya celah selebar jalan sirkulasi dapat dioptimumkan untuk memasukkan cahaya dari orientasi Timur dan Barat.

Bab VI Kesimpulan dan Saran

VI.I Kesimpulan

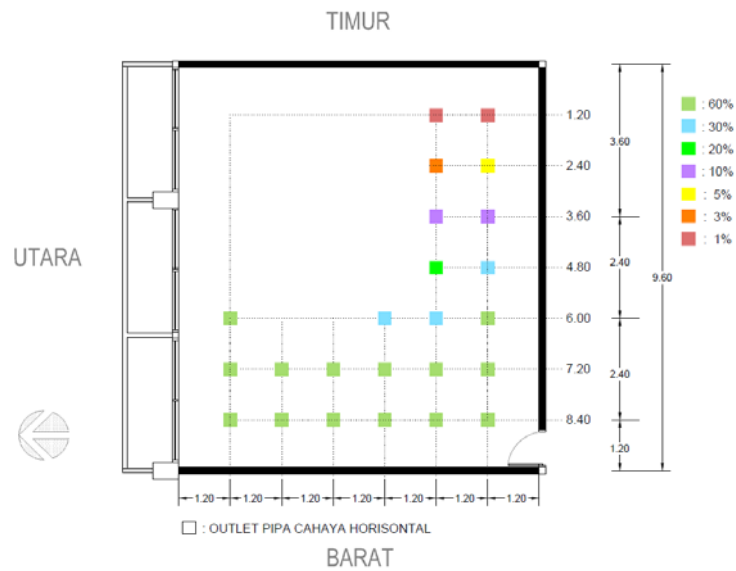
Berdasarkan rangkaian penelitian yang telah dikaji pada bab sebelumnya, maka kesimpulan utama dari penelitian ini adalah:

1. Pergerakan vertikal cahaya matahari langsung dapat ditangkap dan dibelokkan mencapai garis horisontal dengan penggunaan prisma pembias dan pemantul sehingga cahaya matahari langsung dapat diteruskan ke tengah gedung.
2. Semakin tinggi sudut datang cahaya matahari diperlukan jumlah prisma pembias dan pemantul yang lebih banyak untuk sudut yang bersangkutan.
3. Pencahayaan alami melalui jendela samping menimbulkan gradien iluminasi yang berlebihan, sangat terang di area yang dekat jendela dan terlalu gelap di area dekat dinding belakang. Untuk memperbaiki gradien iluminasi yang berlebihan ini perlu perbaikan pada desain jendela agar upaya perbaikan distribusi tingkat pencahayaan menggunakan pipa cahaya horisontal dapat memberikan hasil yang optimum.



Gambar VI.3 Perbaikan gradien iluminasi dengan penggunaan *light shelves* dan pipa cahaya horisontal

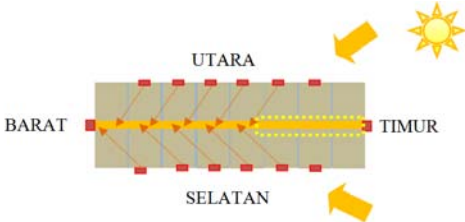
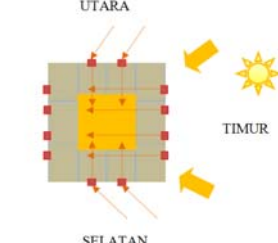
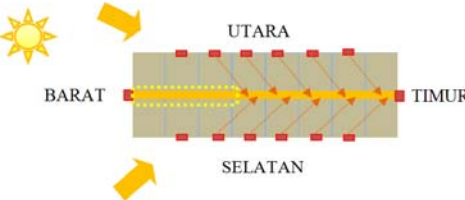
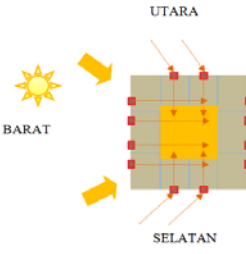
4. Kedalaman optimum pada penggunaan prisma pembias dan pemantul di laboratorium adalah 1,8-4,2 meter dari bukaan pencahayaan. Sedangkan kedalaman optimum pada penggunaan prisma pembias dan pemantul di lapangan adalah 2,4-4,8 meter.
5. Keseragaman tingkat pencahayaan pada ruang simulasi yang menggunakan pipa cahaya lebih dipengaruhi oleh desain perletakan dan efisiensi dari outlet pipa cahaya.



Gambar VI.4 Perletakan outlet pipa cahaya horisontal pada ruang simulasi

6. Penggunaan pipa cahaya horisontal pada bangunan tinggi tipe deret dan tipe tower memiliki potensi yang besar namun perlu disertai dengan kajian desain bukaan pencahayaan yang dapat mengakomodir pergerakan horisontal dari cahaya matahari langsung.

Tabel VI.1 Aplikasi pipa cahaya horisontal pada tipe bangunan deret-*tower*

Waktu	Bangunan tipe deret	Bangunan tipe <i>tower</i>
Pukul 08.00- 11.00 WIB		
Pukul 13.00- 16.00 WIB		 <p>■ : inlet pipa cahaya horisontal</p>

VI.II Saran

1. Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian besar dari sistem pencahayaan alami dengan penggunaan pipa cahaya. Untuk memperoleh suatu rancangan sistem yang utuh dan optimum perlu penelitian yang mengkaji desain pipa penyalur dan outlet dari pipa cahaya tersebut.
2. Pada penelitian ini pipa cahaya horisontal menggunakan material kardus yang banyak menyerap cahaya. Potensi peningkatan tingkat pencahayaan di dalam pipa cahaya horisontal dengan material reflektif seperti aluminium foil dapat dikembangkan dalam penelitian selanjutnya.
3. Perlu penelitian lanjutan untuk mengakomodir pergerakan sudut datang horisontal cahaya matahari langsung.
4. Untuk akurasi rancangan prisma pembias dan pemantul yang lebih baik perlu dilanjutkan oleh penelitian berikutnya sehingga diperoleh kajian mengenai efektifitas dari luas prisma terhadap tingkat pencahayaan yang dihasilkan.
5. Perlu penelitian lanjutan untuk mengkaji pengaruh aspek termal dari radiasi matahari pada ruangan yang menggunakan pipa cahaya horisontal.

DAFTAR PUSTAKA

- Beltran LO. (1997) : Advanced optical daylighting systems: light shelves and light pipes, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 26 (2), 91–104.
- Canziani R. (2004) : Daylight and energy performance of a new type of light pipe. *Energy and Buildings*, 35, 1163–1176.
- Chirarattananon, S. (2008) : An experimental study of a facade mounted light pipe, *Lighting Research and Technology*, 41, 123-142.
- Edmonds, I.R. (1993) : Performance of laser cut light deflecting panels in daylighting applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 29, 1-26.
- Jenkins, D., Newborough, M. (2007) : An approach for estimating the carbon emissions associated with office lighting with a daylight contribution, *Applied Energy*, 84, 608–622.
- Kischkoweit, M. (2002) : An Overview of Daylighting Systems, *Solar Energy*, 2, 77-82
- Kwok, CM. (2008) : Computer simulation study of a horizontal light pipe integrated with laser cut panels in a dense urban environment, *Lighting Research and Technology*, 40, 287-305.
- Lechner, N. (2001) : *Heating, Cooling, Lighting-Design Method for Architect*, Willey, New York.
- Li, D.H.W., Lam, T.N.T., Wong, S.L. (2006) : Lighting and energy performance for an office using high frequency dimming controls, *Energy Conversion and Management*, 47, 1133–1145.
- Lippsmeier, G. (1997) : *Bangunan Tropis*, Erlangga, Jakarta, 22
- Nurkasanah, S. (1998) : *Studi Sistem Pencahayaan Alami MenggunakanPenyalur Cahaya pada Suatu Model Bangunan*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung.
- Philips, R.O. (1987) : Sunshine and Shade in Australia, *National Building Technology Centre*, 8, 29-30.
- Rosemann, A. (2008) : Cost-effective controlled illumination using daylighting and electric lighting in a dual-function prism light guide, *Lighting Research and Technology*, 40, 77-88.

- Shao, L. (1988) : Measurement and modeling of light pipe for energy efficient lighting, *CIBSE National Lighting Conference*, 410-419.
- Soelami, N. (2000) : *Studi Penggunaan Sistem Penyalur Cahaya Alami dalam Rangka Konservasi Energi dalam Bangunan*, Fakultas Teknologi Industri Institute Teknologi Bandung.
- Swift, PD. (1995) : Cylindrical mirror light pipes, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36, 159-168.
- Syamsuddin, S. (1983) : *Penyalur Cahaya dengan Deretan Lensa*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung.
- Tanny, H. (1984) : *Penyalur Cahaya dengan Pipa Gelas*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung.
- Veitch, J. (2006) : Lighting for high-quality work-places. In: Clements-Croome, Derek (Ed.), *Creating the Productive Workplace*, second ed. Taylor & Francis, London, pp. 206–222.
- Wah Tong To, D., Sing, L.K., Chung, T.M., Leung, C.S. (2002) : Potential energy saving for a side-lit room using daylight-linked fluorescent lamp installations, *Lighting Research and Technology*, 34, 121–133.