

## BAB II

### TINJAUAN TEORI

#### 2.1 Definisi Operasional Judul

Penghawaan alami bangunan erat kaitannya dengan angin beserta cara pengendaliannya di dalam ruangan. Aliran angin menjadi faktor penting penentu kenyamanan termal (Satwiko, 2009). Selain itu, pola pergerakan angin di dalam ruang kelas juga berfungsi untuk menjaga kualitas udara sehingga berpengaruh terhadap kesehatan penghuninya (Boutet, 1987).

Penghawaan alami merupakan proses masuknya angin ke dalam bangunan melalui ventilasi udara, dan terjadi pertukaran udara di dalamnya. Diperlukan parameter-parameter tertentu yang diperoleh dari literatur dan standar bangunan, agar pertukaran udara yang terjadi dapat berjalan secara optimal (SNI 03-6572-2001)

Ruang kelas merupakan tempat dimana proses belajar-mengajar berlangsung (UU Sisdiknas 20, 2003). Objek yang dikaji adalah ruang kelas di SMA Negeri 4 Malang. Sekolah ini memiliki cukup banyak variasi ruang kelas, sehingga perlu untuk dikaji seberapa optimal penghawaan alaminya.

Optimalisasi penghawaan alami di ruang kelas adalah pertukaran udara secara alami yang terjadi di dalam ruang kelas dengan bantuan ventilasi/bukaan pada ruangan yang berdasar pada literatur dan standar-standar bangunan, agar kualitas udara di dalam ruang tetap terjaga. Pada penelitian ini, optimalisasi yang dimaksud adalah untuk mencari persebaran dan kecepatan angin yang paling baik, dengan cara merekayasa bukaan ruangan.

#### 2.2 Tinjauan Pergerakan Udara

Sebagai acuan dalam memberikan rekomendasi ventilasi yang sesuai untuk sebuah ruangan, perlu dilakukan tinjauan mengenai aliran udara/angin. Hal ini ditujukan untuk mengetahui karakteristik, perilaku, dan sifat-sifat angin dalam kondisi dan waktu tertentu.

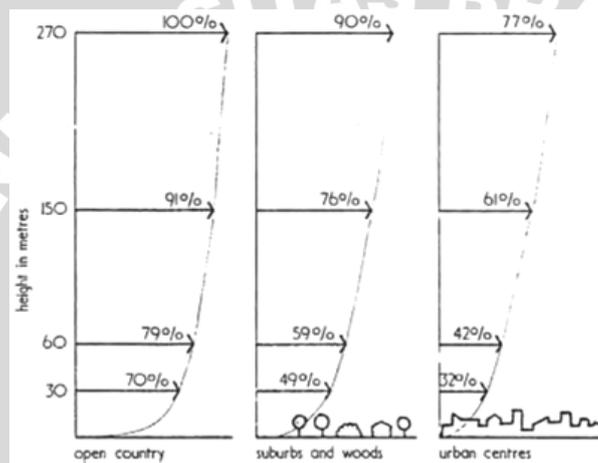
##### 2.2.1. Sifat-sifat Dasar Angin

Angin adalah udara yang bergerak. Pergerakan udara disebabkan adanya perbedaan tekanan udara, dari udara bertekanan tinggi menuju udara yang bertekanan lebih rendah. Kecepatan angin dipengaruhi oleh jauh-tidaknya perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Semakin jauh perbedaannya semakin cepat pula angin yang berhembus (Moore, 1993).

Perbedaan suhu juga bisa mengakibatkan udara bergerak, hal ini disebabkan udara panas memiliki tekanan yang cenderung lebih rendah dibandingkan udara bersuhu dingin (Moore, 1993).

Perbedaan ketinggian dihitung dari atas tanah juga mempengaruhi kecepatan angin. Semakin tinggi dari permukaan tanah semakin tinggi pula kecepatan angin yang berhembus (Evans, 1980)

Menurut M. Evans (1980), kepadatan bangunan mempengaruhi kecepatan angin, semakin padat bangunan, semakin rendah kecepatannya. Sebagai contoh, angin di pedesaan bergerak lebih cepat jika dibandingkan dengan angin di perkotaan. (gambar 2.1)



Gambar 2.1 Grafik hubungan ketinggian dengan kecepatan angin.

(dari kiri : desa, sub-urban, kota)

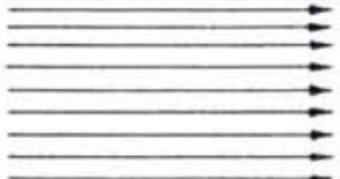
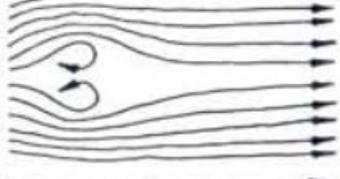
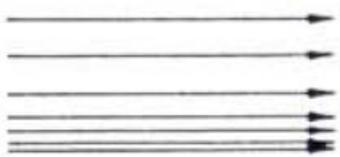
Sumber : Evans (1980)

SMA Negeri 4 Malang berada di wilayah kota, sehingga termasuk dalam kategori urban centre (Gambar 2.1) dimana kecepatan anginnya relatif lebih lambat dibandingkan daerah desa atau sub-urban.

### 2.2.2. Prinsip Pergerakan Angin

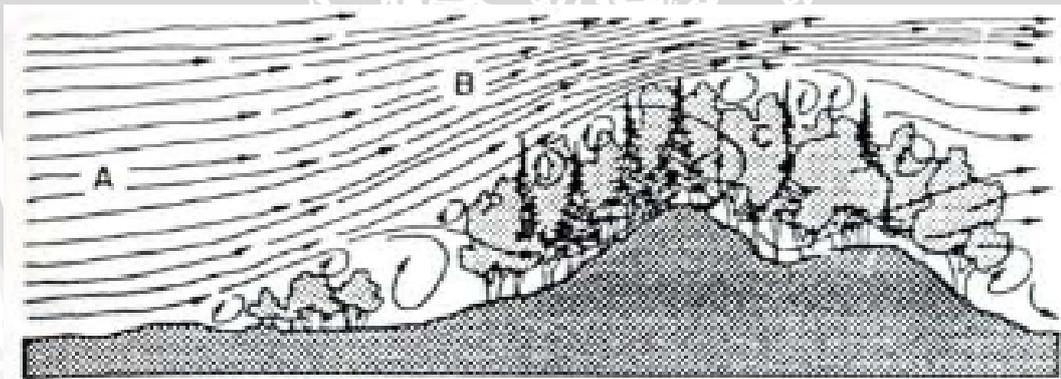
Angin memiliki beberapa sifat pergerakan utama, yang dibagi menjadi 3 (tiga) kategori yaitu laminar, turbulen, dan terpisah. Perbedaan sifat angin ini disebabkan oleh karena perbedaan lokasi dan faktor – faktor eksternal. Lebih lengkapnya dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Kategori Pola Pergerakan Angin

Nama Pola	Ilustrasi	Keterangan
Laminar		Aliran angin relatif sejajar, arah dan kecepatan sama. Minim potensi turbulensi, sehingga pergerakan angin dapat diprediksi
Turbulen		Pola pergerakan angin acak, merupakan pola laminar yang terkena faktor eksternal, sehingga menjadi acak (umumnya memutar)
Terpisah		Pola pergerakan angin teratur, namun kecepatan angin yang berbeda, disebabkan oleh gesekan sehingga kecepatan angin berkurang

Sumber : Boutet (1987:42)

Pergerakan Angin dapat berubah dari satu kategori ke kategori yang lain dalam waktu dan lokasi tertentu. Hal ini disebabkan oleh faktor eksternal, seperti kondisi topografi atau terpengaruh oleh massa padat (Gambar 2.2)

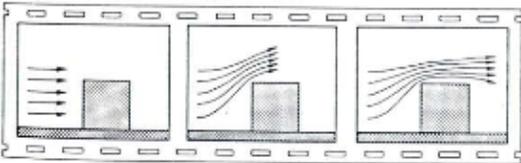
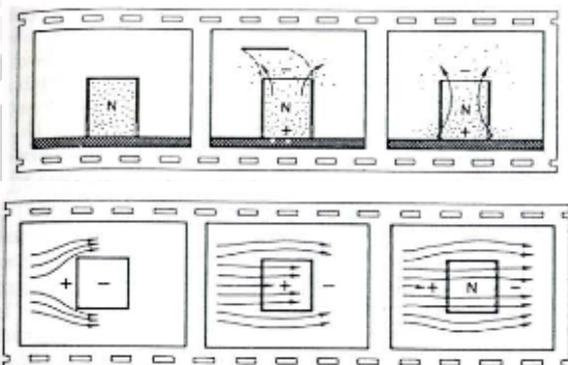


Gambar 2.2 Pola perubahan kategori pergerakan angin laminar (a), terpisah (b), turbulen (c)

Sumber : Boutet (1987 : 43)

Perubahan pergerakan angin disebabkan oleh beberapa faktor, yakni faktor kelembaman, gesekan, dan perbedaan. Lebih jelasnya dapat dilihat pada table 2.2

Tabel 2.2 faktor – faktor yang mempengaruhi pergerakan aliran angin

Nama	Ilustrasi	Keterangan
Kelembaman (inertia)		Angin memiliki kelembaman maksudnya, arah udara tetap sama hingga arahnya diubah atau terpengaruh faktor eksternal
Gesekan (friction)		Angin mengalami gesekan dengan benda yang bersinggungan, sehingga mempengaruhi kecepatan angin
Perbedaan (differential)		Angin bergerak dari udara bertekanan tinggi menuju tekanan yang lebih rendah

Sumber : Boutet (1987 : 45)

Dari penjelasan mengenai prinsip pergerakan angin yang telah dipaparkan sebelumnya, angin laminar dan terpisah dapat dimanfaatkan. Sedangkan angin turbulen perlu dihindari, sebab sirkulasi angin tidak berjalan dengan semestinya, angin berputar di dalam ruangan menyebabkan panas dan zat – zat beracun seperti CO<sub>2</sub> dalam ruangan tidak segera dibuang ke luar ruangan.

Selain itu juga perlu diperhatikan mengenai factor – factor yang mempengaruhi pergerakan aliran angin yakni, kelembaman, gesekan, dan perbedaan. Arah dan kecepatan angin dapat berubah tergantung dengan benda padat yang dilalui. Sehingga dalam analisis angin eksisting perlu memperhatikan aspek – aspek tersebut.

### 2.2.3. Standar Kecepatan Angin

Terdapat berbagai jenis angin jika diklasifikasikan berdasarkan kecepatannya. Beberapa jenis angin tergolong nyaman untuk dimanfaatkan sebagai penghawaan bangunan, ada yang tergolong tidak nyaman, dan ada beberapa yang sifatnya berbahaya. Berikut penjelasan mengenai jenis-jenis angin dibedakan berdasarkan kecepatannya.

### A. Klasifikasi Jenis Angin Berdasarkan Kecepatannya

Terdapat banyak jenis angin yang ada di dunia, berikut standar dan klasifikasi angin yang digunakan *Regional Specialized Meteorological Centers*

Tabel 2.3 Klasifikasi jenis angin berdasarkan kecepatan

Skala Beaufort	m/s	knots	Kondisi umum	Utara Samudra Hindia		
0	<0.5	<1	Calm	Low Pressure Area		
1	0.5 – 1.5	1–3	Light air	Low Pressure Area		
2	2 – 3	4–6	Light breeze	Low Pressure Area		
3	3.5 – 5	7–10	Gentle breeze	Low Pressure Area		
4	5.5 – 8	11–16	Moderate breeze	Low Pressure Area		
5	8.5 – 10.5	17–21	Fresh breeze	Depression		
6	11 – 13.5	22–27	Strong breeze	Depression		
7	14 – 14.5	28–29	Moderate gale	Deep Depression		
7	15 – 16.5	30–33	Moderate gale	Deep Depression		
8	17 – 20	34–40	Fresh gale	Cyclonic Storm		
9	20.5 – 23.5	41–47	Strong gale	Cyclonic Storm		
10	24 – 27.5	48–55	Whole gale	Severe Cyclonic Storm		
11	28 – 31.5	56–63	Storm	Severe Cyclonic Storm		
12	32 – 36	64–72	Hurricane	Very Severe Cyclonic Storm		
13	36.5 – 42.5	73–85	Hurricane	Very Storm	Severe	Cyclonic
14	43 – 44.5	86–89	Hurricane	Very Storm	Severe	Cyclonic
15	45 – 49.5	90–99	Hurricane	Very Storm	Severe	Cyclonic
16	50 – 53	100–106	Hurricane	Very Storm	Severe	Cyclonic
17	53.5 – 57	107–114	Hurricane	Very Storm	Severe	Cyclonic
17	57.5 – 59	115–119	Hurricane	Very Storm	Severe	Cyclonic
17	>60	>120	Hurricane	Super Storm	Severe	Cyclonic

Sumber : Regional Specialized Meteorological Centers(2009)

Adapun sifat angin yang dapat dikategorikan berdasarkan kecepatan dan dampaknya terhadap manusia.

Tabel 2.4 Efek kecepatan angin pada manusia

Deskripsi	Kecepatan Angin	
	m/s	Km/h
Diam	0.0	0.0
Tak terasa	0.1	0.4
Sedikit terasa	0.3	1.0
Sepoi – sepoi tenang	0.5	1.8
Sepoi – sepoi ringan	0.7	2.5
Rambut dan kertas bergerak	1.0	4.0
Angin berhembus agak kencang	1.4	5.0
Berhembus tak nyaman	1.7	6.0
Berhembus mengganggu	2.0+	6.5+

Sumber : <http://squel.org/>

#### B. Standar Kecepatan Udara Dalam Ruang

Standar kecepatan udara yang digunakan ada 3 (tiga) yaitu:

- 1) *Lippsmeir* (1997:38) menyatakan bahwa patokan untuk kecepatan angin adalah sebagai berikut.

Tabel 2.5 Standar Kecepatan Udara di dalam Ruangan

Kecepatan udara	Keterangan
0.25 m/s	Nyaman, tidak terasa gerakan udara
0.25 – 0.5 m/s	Nyaman, gerakan udara terasa
1.0 – 1.5 m/s	Aliran udara ringan sampai tidak nyaman
>1.5 m/s	Tidak nyaman, aliran udara terasa

Sumber : *Lippsmeir* (1997:38)

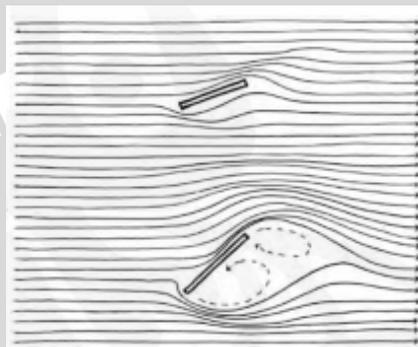
- 2) *Lechner* (2001:70) menyatakan “jangkauan yang nyaman untuk kecepatan angin berkisar antara 20 hingga 60 kaki/menit (fpm) kurang lebih 0.6 mph – 2 mph
- 3) Menurut *MENKES NO.261/MENKES/SK/11/1998*, laju angin yang diperkenankan di dalam ruangan yaitu 0.15 sampai 0.25 m/s

Dari standar-standar kecepatan angin yang dipaparkan sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan bahwa angin yang diperkenankan untuk dimanfaatkan sebagai penghawaan

alami bangunan adalah angin dengan kecepatan tidak kurang dari 0.15 m/s dan tidak lebih dari 0.25 m/s, tergolong jenis angin lemah dengan tekanan rendah (tabel 2.3).

**2.2.4. Perilaku Angin Terhadap Massa Padat**

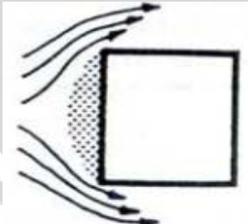
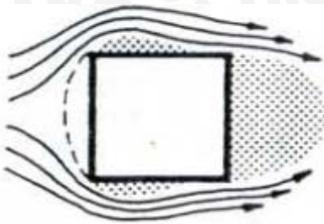
Benda-benda masif di sekitar angin juga bisa mempengaruhi laju kecepatan angin. Angin akan berhembus lebih cepat jika melewati lorong yang lebih sempit (Lechner, 2001). Pada dasarnya angin memiliki massa dan momentum, tetapi sifatnya yang fleksibel membuat angin dapat dibelokkan (Moore, 1993)



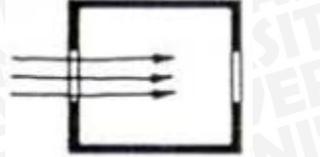
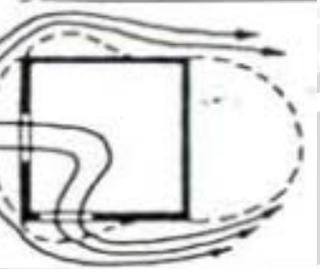
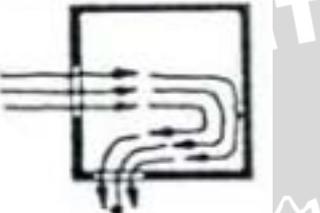
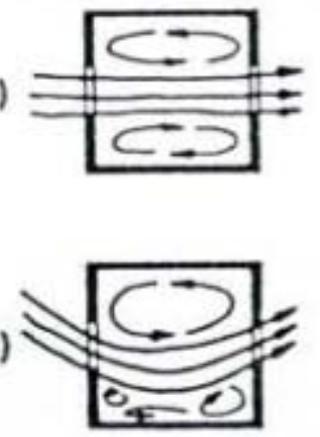
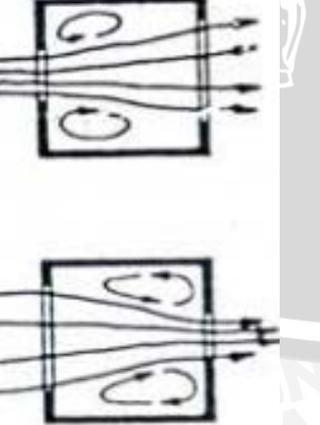
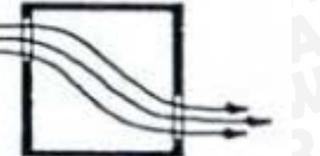
Gambar 2.3 Pembelokan Gerakan Angin  
Sumber : Moore (1993)

Angin yang akan melewati benda padat akan memutar, lalu kembali ke arah pergerakan semula. Selain itu, pembelokan udara yang lebih besar akan mengakibatkan turbulensi (Gambar 2.3 bawah).

Tabel 2.6 Prinsip utama pergerakan angin

Nama	Ilustrasi	Keterangan
Area bertekanan positif		Apabila angin mengenai bidang massa, kecepatan angin akan berkurang sejenak hingga angin menemukan lajur baru untuk dilewati. Area tersebut dinamakan area positif atau area dengan tekanan tinggi. Bidang tersebut dapat dimanfaatkan dengan cara memberikan bukaan sehingga angin dapat masuk ke dalam massa/bangunan.
Area bertekanan negatif		Ketika aliran angin mengelilingi massa/bangunan, area tekanan negatif, atau area bertekanan udara rendah terjadi. Besarnya area negatif bergantung pada ukuran massa. Bidang yang terkena area negatif dapat ditambahkan bukaan outlet agar angin yang berada di dalam massa tertarik ke luar.

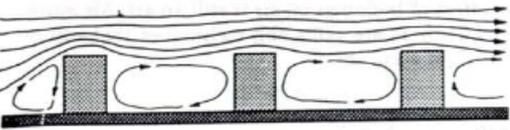
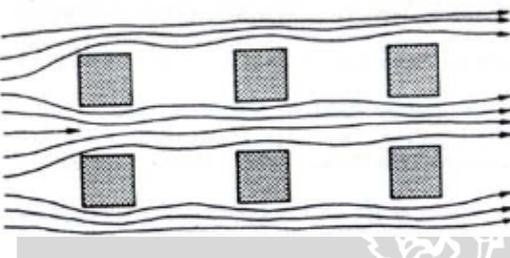
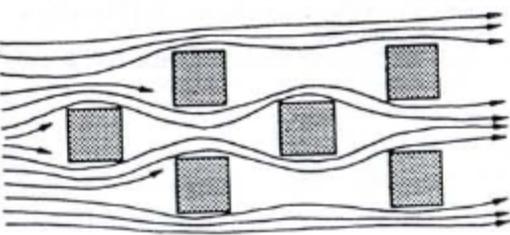


Nama	Ilustrasi	Keterangan
Inersia		<p>Aliran udara luar menembus ke dalam massa, melewati bukaan secara lurus dan tidak berbelok, hingga menabrak bidang/ penghalang lain.</p>
Perbedaan tekanan udara		<p>Perbedaan tekanan udara antara tekanan udara positif dengan negatif dapat digunakan untuk menentukan kecepatan aliran udara di luar massa, lebar inlet dan outlet, dan perubahan arah angin.</p>
Perubahan arah laju angin		<p>Perubahan arah aliran udara memerlukan energi lebih banyak dan kecepatannya menjadi berkurang. Semakin besar kecepatan angin dimana perubahan arah angin juga terjadi, maka semakin besar pula energi dan kecepatan yang hilang.</p>
Aliran udara optimal		<p>Bukaan inlet dan outlet sebaiknya dibuat selebar mungkin untuk mencapai titik optimal. Ketika angin datang secara tegak lurus bidang massa, dan bukaan inlet outletnya saling berhadapan, maka angin akan bergerak secara lurus dan menyempit (a). Akibatnya di beberapa area tidak mengalami pergerakan angin yang signifikan. Menghasilkan kecepatan angin maksimal, tetapi persebaran angin minimal. Sedangkan angin yang tidak tegak lurus bidang akan menghasilkan aliran udara yang optimal, dan area persebaran yang maksimal.</p>
Kecepatan angin maksimal		<p>Kecepatan angin maksimal bisa tercapai ketika outlet lebih lebar daripada inlet. Dalam kondisi tersebut, tekanan positif terbentuk di luar dekat inlet massa/bangunan, dan tekanan negatif terbentuk di dalam bangunan, akibatnya kecepatan angin di dalam ruangan bertambah (a). Begitu pula sebaliknya, jika inlet lebih lebar dari outlet, di luar dekat outlet, kecepatan angin akan mengalami peningkatan.</p>
Lokasi Bukaan		<p>Pola aliran angin dalam massa/bangunan ditentukan berdasarkan penempatan bukaan inlet dan sudut angin datang, serta lokasi area tekanan positif/negatif.</p>

Sumber : Boutet (1987, 171:172)

Selain itu banyaknya massa juga mempengaruhi pola pergerakan angin. Angin yang mengenai bangunan akan mengalami perubahan arah, sehingga bangunan yang berada di belakangnya akan terpengaruh, begitu pula sebaliknya. Tata massa bisa menyebabkan penyempitan, perubahan kecepatan, maupun turbulensi udara, tergantung dari kondisi yang ditemui (Tabel 2.7)

Tabel 2.7 Pengaruh massa banyak terhadap pola pergerakan angin

Ilustrasi	Keterangan
	<p>Massa yang berjajar akan menimbulkan area dengan aliran udara yang lebih tenang</p>
	<p>Massa yang berjajar secara linear, menutup lajur angin. Kemudian angin bergerak melewati celah – celah bangunan dan berjalan beriringan</p>
	<p>Massa yang berjajar namun berseling, akan menimbulkan pergerakan angin yang berbelok mengikuti celah massa.</p>

Sumber : Boutet (1987, 83)

Pergerakan angin akan terpengaruh oleh massa padat. Angin dapat menyempit, berbelok, atau turbulen, tergantung dari tatanan massa padat yang dilewati angin. Inlet yang lebih kecil dapat dimanfaatkan untuk menambah kecepatan angin dalam ruang, dan inlet yang lebih besar dapat dimanfaatkan untuk menyebarkan udara di dalam ruangan. Rekayasa ukuran bukaan inlet – outlet ventilasi ini nantinya dapat digunakan untuk mengondisikan kecepatan dan persebaran angin di dalam ruangan.

### 2.3 Tinjauan Ruang Kelas pada SMA

Seperti yang tercantum pada Peraturan Pemerintah RI No. 19 Tahun 2005 tentang Standar Nasional Pendidikan. Bahwa pelaksanaan pemerataan pendidikan nasional harus menjamin peningkatan mutu pendidikan di tengah arus global, tujuannya membentuk

generasi penerus yang bertakwa pada Tuhan Yang Maha Esa, berakhlak mulia, cerdas, produktif, dan berdaya saing tinggi baik nasional maupun internasional. Agar tujuan tersebut dapat tercapai, perlu adanya fasilitas yang memadai. Fasilitas tersebut harus memenuhi ketentuan minimum yang telah ditetapkan dalam standar dari peraturan pemerintah mengenai sarana – prasarana pendidikan.

Tercantum pada peraturan pemerintah dalam satuan pendidikan, bahwa tiap SMA harus memiliki sarana dan prasarana yang dapat mawadahi minimal 3 rombongan belajar, dan maksimal 27 rombongan belajar. Adapun fasilitas gedung sekolah yakni meliputi lahan dan bangunan, kelengkapan sarana prasarana ruang kelas, dan sebagainya.

### 2.3.1. Lahan dan Bangunan

Standar luas lahan disesuaikan dengan jumlah siswa dan jumlah rombongan belajar. Untuk SMA/MA yang memiliki 15 – 32 siswa per kelas, lahan memenuhi ketentuan rasio minimal luas lahan terhadap siswa seperti pada tabel 2.8

Tabel 2.8 Rasio Minimum Luas Lahan terhadap Siswa

Banyak Kelas	Rasio minimal luas lahan terhadap siswa (m <sup>2</sup> /siswa)		
	Bangunan 1 lantai	Bangunan 2 lantai	Bangunan 3 lantai
3	36.5	19.3	-
4-6	22.8	12.2	8.1
7-9	18.4	9.7	6.5
10-12	16.3	8.7	5.9
13-15	14.9	7.9	5.3
16-18	14.0	7.5	4.9
19-21	13.5	7.2	4.8
22-24	13.2	7.0	4.7
25-27	12.8	6.8	4.6

Sumber : Permen No. 24 Tahun 2007

Luas lahan yang telah dipaparkan pada tabel 2.8 adalah luas lahan yang digunakan secara optimal untuk dibangun prasarana sekolah berupa bangunan, sirkulasi, dan lapangan olahraga.

Selain luas lahan, luas lantai bangunan juga harus memenuhi standar minimal yang telah ditentukan dalam peraturan pemerintah. Untuk SMA/MA yang memiliki

15-32 siswa per kelas, bangunan harus memenuhi ketentuan rasio minimal luas lantai terhadap siswa, seperti tercantum pada tabel 2.9

Tabel 2.9 Rasio Minimum Luas Lantai Bangunan terhadap Siswa

Banyak Kelas	Rasio minimal luas lantai bangunan terhadap siswa (m <sup>2</sup> /siswa)		
	Bangunan 1 lantai	Bangunan 2 lantai	Bangunan 3 lantai
3	10.9	11.6	-
4-6	6.8	7.3	7.3
7-9	5.5	5.8	5.8
10-12	4.9	5.2	5.3
13-15	4.5	4.7	4.8
16-18	4.2	4.5	4.5
19-21	4.1	4.3	4.3
22-24	3.9	4.2	4.2
25-27	3.8	4.1	4.1

Sumber : Permen No. 24 Tahun 2007

Luas lantai bangunan yang dijelaskan pada tabel 2.9 Merupakan luas lantai bangunan optimal yang digunakan untuk ruang kelas, laboratorium, dan kamar mandi.

### 2.3.2. Ruang Kelas

Ruang kelas merupakan fungsi utama pada sekolah dimana kegiatan belajar – mengajar berlangsung. Kegiatan pembelajaran teori maupun praktek yang tidak memerlukan peralatan khusus bisa dilakukan di dalam ruang kelas. Berikut menurut Permen No. 24 Tahun 2007 mengenai persyaratan teknis yang harus dipenuhi pada ruang kelas:

#### A. Ukuran Ruang

Ruang kelas minimal memiliki luas 55 m<sup>2</sup>, dengan ukuran 7 x 8 meter dan plafond minimal 3.50 dari lantai. Terdapat teras dengan lebar antara 1.80 – 2.00.

#### B. Jumlah Minimal

Jumlah ruang kelas sama dengan jumlah kelas dalam satu sekolah. Maksudnya, semua ruang kelas harus bisa mawadahi seluruh siswa dalam satu sekolah.

- C. Rasio Minimal  
Khusus kelas dengan jumlah siswa kurang dari 15 orang, luas minimum ruang kelas adalah  $30 \text{ m}^2$ , dengan lebar minimal 5 meter.
- D. Pintu dan Jendela  
Tiap kelas harus memiliki pintu yang memadai agar penghuni dapat segera keluar ketika terdapat bahaya, dan dapat dikunci dengan baik saat ruang kelas tidak digunakan.
- E. Sarana  
Ruang kelas dilengkapi dengan sarana yang memadai seperti meja, kursi, papan tulis, tempat sampah, dan sebagainya.

### 2.3.3. Jendela dan Ventilasi Ruang Kelas

Agar memenuhi standar kenyamanan pada saat aktivitas belajar – mengajar di dalam ruang kelas, ditetapkan juga beberapa standar mengenai jendela dan ventilasi ruang kelas. Adapun rincian standar menurut Permen No. 24 Tahun 2007 tentang jendela dan ventilasi ruang kelas sebagai berikut :

- A. Bahan untuk jendela dan ventilasi menggunakan kayu minimal kelas awet 2 yang sudah kering
- B. Ketinggian minimal jendela adalah 1.10 meter dari lantai
- C. Jendela untuk pencahayaan menggunakan kaca mati, dan tebal kaca  $\pm 5 \text{ mm}$
- D. Menggunakan sistem cross ventilation (ventilasi silang) untuk memperoleh sirkulasi udara secara optimal.
- E. Ventilasi dapat menggunakan jalusi kayu, kaca silang, kaca tidak penuh, atau daun jendela dengan kaca. Agar cahaya dan sirkulasi udara alami dapat memasuki ruangan dengan baik.

## 2.4 Tinjauan Ventilasi Alami Ruangan

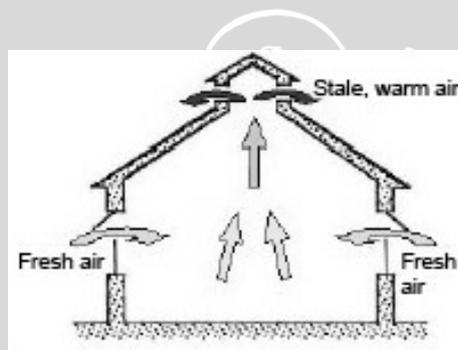
Ventilasi merupakan proses untuk memasukkan udara segar ke dalam bangunan dalam jumlah yang sesuai dengan kebutuhan. Tercantum pada SNI 03-6572-2001 (2:3), bahwa ventilasi digunakan untuk menghilangkan gas-gas buangan yang ditimbulkan oleh keringat,  $\text{CO}_2$ , dan sebagainya. Untuk itu, dalam perancangan ventilasi pada bangunan perlu memperhatikan beberapa aspek, yaitu sistem bukaan dan pemilihan jenis jendela. Selain itu juga harus tetap memperhatikan standar yang telah ditetapkan oleh SNI.

### 2.4.1 Sistem Bukaannya

Terdapat beberapa jenis sistem bukaan yang biasa digunakan pada bangunan. Sistem bukaan dibedakan berdasarkan posisi bukaan, kondisi bangunan, maupun kondisi lingkungan. Berikut penjelasan dari beberapa contoh sistem bukaan.

#### A. Stack Effect

Stack Effect adalah salah satu sistem ventilasi bangunan dengan memanfaatkan perbedaan suhu di dalam dan luar ruangan. Pada dasarnya, udara panas memiliki tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan udara dingin. Menyebabkan udara panas selalu berada di atas udara dingin. Pada bangunan, udara dingin dari luar akan mendorong udara panas di dalam ruangan menuju ke luar melalui lubang yang terdapat di atas bangunan (Gambar 2.4)

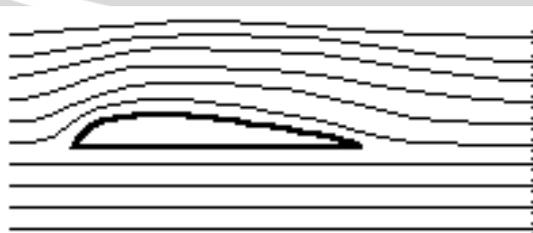


Gambar 2.4 Prinsip Kerja Sistem Ventilasi Stack Effect

Sumber : Frick (2008)

#### B. Efek Bernoulli dan Tabung Venturi

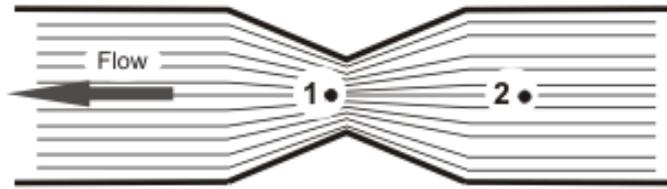
Pada dasarnya efek Bernoulli digunakan untuk mengendalikan kecepatan angin dengan cara membelokkan udara. Angin yang dibelokkan harus melewati jalur yang lebih panjang daripada seharusnya. Hal inilah yang mengakibatkan kecepatan udara di area efek Bernoulli menjadi bertambah (Gambar 2.5)



Gambar 2.5 Efek Bernoulli

Sumber : Frick (2008)

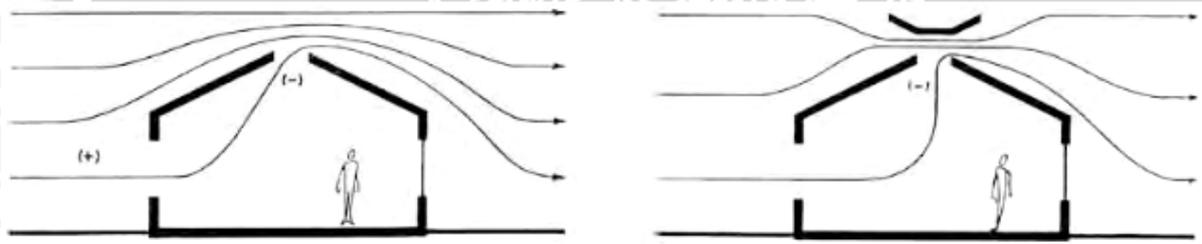
Efek tabung venturi juga memiliki prinsip yang serupa, yakni mengatur kecepatan angin dengan cara membelokkan angin. Bedanya, tabung venturi sifatnya mempersempit jalur angin sehingga kecepatan angin bertambah.



Gambar 2.6 Efek Tabung Venturi

Sumber : Frick (2008)

Prinsipnya, efek Bernoulli dan tabung Venturi memiliki tekanan udara yang rendah, sehingga sifatnya “menghisap” udara yang ada di sekitarnya. Sifat inilah yang dapat dimanfaatkan untuk menambah kecepatan angin pada titik-titik tertentu dalam bangunan.

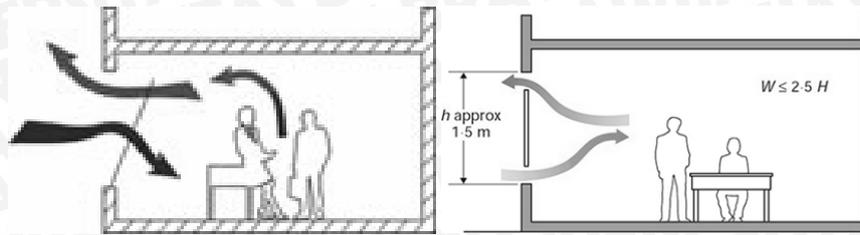


Gambar 2.7 Aplikasi pada Bangunan, Stack Effect (kiri) dan Efek Bernoulli – Tabung Venturi (kanan)

Sumber : Frick (2008)

### C. Ventilasi Satu Sisi

Single-sided ventilation atau ventilasi satu sisi adalah ventilasi yang penempatan bukaannya hanya pada satu sisi ruang. Pertukaran udara tidak tersebar secara merata disebabkan udara mengambil jarak terpendek antara inlet dan outlet-nya. Biasanya sistem ventilasi ini digunakan pada ruang sempit dengan banyak sisi yang tertutup. Sehingga penggunaan sistem ventilasi ini tidak dianjurkan untuk ruangan yang luas.



Gambar 2.8 Ventilasi Satu Sisi : Satu Bukaannya (kiri) dan Dua Bukaannya (kanan)

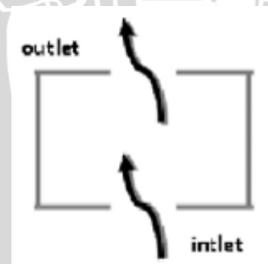
Sumber : Frick (2008)

Penggunaan ventilasi satu sisi pada ruangan harus memperhatikan kebutuhan ruangnya. Udara lebih mudah keluar dan masuk dengan bukaan yang lebih lebar (Gambar 2.11 Kiri). Jika tidak memungkinkan, dianjurkan menggunakan dua lubang ventilasi dengan penempatan ketinggian yang berbeda (Gambar 2.8 Kanan).

#### D. Ventilasi Silang

Sistem ventilasi silang merupakan salah satu sistem penghawaan alami dengan menggunakan dua bukaan pada sisi yang berbeda. Udara segar masuk melalui lubang ventilasi menuju ke dalam ruangan dan mendorong udara kotor keluar melalui lubang yang lain.

Ventilasi silang memiliki dua lubang bukaan, yaitu lubang inlet dan outlet. Lubang inlet adalah bukaan dimana udara masuk, digunakan untuk menangkap angin sehingga bukaan menghadap arah angin datang. Sedangkan lubang outlet merupakan bukaan lain yang fungsinya mengeluarkan udara dari dalam ruangan.



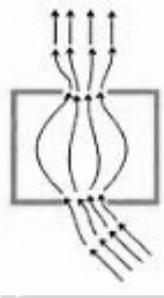
Gambar 2.9 Bukaannya inlet dan outlet

Sumber : Frick (2008)

Penempatan inlet dan outlet harus disesuaikan terhadap kondisi ruangan, agar pertukaran udara dapat berjalan secara optimal. Adapun beberapa alternatif penempatan inlet dan outlet pada ruangan sebagai berikut :

- 1) Sisi berhadapan dengan inlet dan outlet yang berhadapan

Penempatan inlet – outlet saling berhadapan, cukup baik digunakan terhadap angin yang datang secara *oblique* (tidak tegak lurus). Disebabkan angin yang datang akan masuk dan melebar ke sisi ruangan, sehingga sirkulasi udara dapat tersebar secara merata.



Gambar 2.10 Inlet dan outlet berhadapan

Sumber : Frick (2008)

2) Sisi berhadapan dengan inlet dan outlet yang bersilangan

Penempatan inlet – outlet bersilangan seperti pada gambar 2.11 memungkinkan udara melebar ke sudut ruangan sehingga udara tersebar lebih merata. Sesuai apabila digunakan terhadap angin yang datang secara *berpendicular* (tegak lurus).

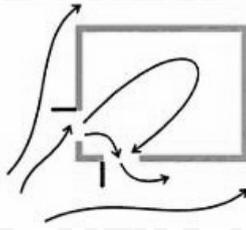


Gambar 2.11 inlet dan outlet bersilangan pada sisi berhadapan

Sumber : Frick (2008)

3) Sisi bersebelahan dengan inlet dan outlet berdekatan

Penempatan inlet – outlet yang berdekatan menyebabkan udara sulit masuk ke dalam ruangan, sehingga perlu ditambahkan sirip di luar ruangan untuk menangkap angin lebih banyak.

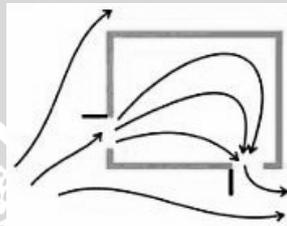


Gambar 2.12 Inlet dan outlet berdekatan pada sisi bersebelahan

Sumber : Frick (2008)

4) Sisi bersebelahan dengan inlet dan outlet berjauhan

Penempatan inlet – outlet yang berjauhan lebih dianjurkan dibandingkan yang berdekatan. Persebaran udara yang masuk menjangkau sudut – sudut ruangan, sehingga lebih merata.



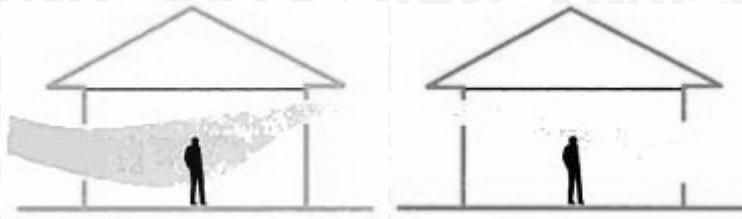
Gambar 2.13 Inlet dan outlet berjauhan pada sisi bersebelahan

Sumber : Frick (2008)

Ketinggian inlet dan outlet juga harus diperhatikan. Penempatan bukaan yang kurang tepat dapat menyebabkan pertukaran udara tidak berjalan dengan optimal. Misal, posisi outlet harus lebih tinggi daripada inlet, tujuannya agar udara segar dapat masuk dengan mudah, dan udara panas dapat keluar ke atas dengan mudah.

Menurut Moore (1993) posisi yang paling baik untuk meletakkan bukaan inlet ventilasi adalah yang sama tingginya dengan aktivitas pengguna ruangan, dan untuk memudahkan udara kotor yang mengandung CO<sub>2</sub> agar segera keluar dari ruangan maka posisi outlet ditempatkan lebih tinggi dari bukaan inlet.

Dalam penelitian ini, objek kajian yakni ruang kelas di sekolah. Sehingga aktivitas duduk lebih banyak dilakukan sekelas. Oleh karena itu, penempatan ketinggian jendela inlet berkisar antara 0.8- 1 meter dari permukaan lantai. Sedangkan bukaan outlet ditempatkan di posisi yang lebih tinggi.



Gambar 2.14 Efek posisi inlet lebih rendah (kiri), posisi inlet lebih tinggi (kanan)

Sumber : Frick (2008)

Dari kedua tipe yang telah dipaparkan sebelumnya, pemilihan dimensi bukaan inlet yang lebih kecil dari bukaan *outlet* atau memakai dimensi yang sama besar namun dengan model yang berbeda (kemampuan alir udara berbeda) lebih direkomendasikan.

#### 2.4.2 Bukaan/Jendela

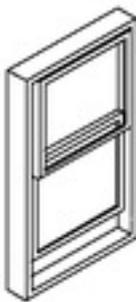
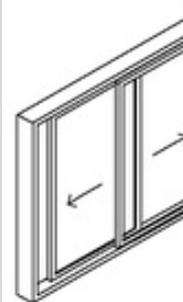
Jendela merupakan bukaan ruangan yang digunakan untuk membantu pencahayaan alami di siang hari sekaligus mengalirkan udara alami ke dalam ruangan. Jendela juga berfungsi untuk mengontrol pergerakan angin yang masuk ke dalam ruangan. Pemilihan jenis jendela yang tepat dapat menghemat penggunaan konsumsi energi bangunan, sedangkan jendela yang pemilihannya tidak tepat, akan menjadi beban energi bangunan (Boutet, 1987 : 93).

Menurut Boutet (1987), terdapat banyak variasi jenis jendela, yang diklasifikasikan menjadi 3 tipe utama, yaitu :

##### 1. Simple window opening

Merupakan tipe bukaan yang pengoperasiannya dengan cara digeser (*slide*). Contoh jendela dengan tipe ini seperti : single hung, double hung, dan sliding. Simple window opening, merupakan bukaan jendela sederhana yang tidak mempengaruhi arah pergerakan udara secara langsung. Hal ini dikarenakan daun jendelanya tidak menyembul ke luar maupun ke dalam ruangan. Tipe double hung memungkinkan dalam penentuan ketinggian bukaan. Sedangkan tipe sliding, memungkinkan penempatan posisi bukaan secara horizontal (Tabel 2.10)

Tabel 2.10 Karakteristik Simple Window Opening

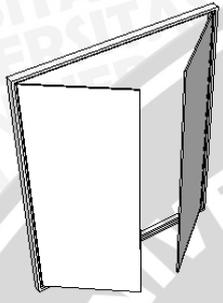
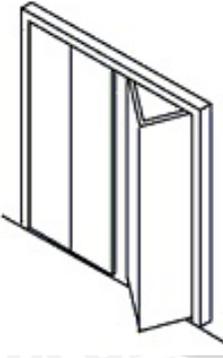
Ilustrasi	Keterangan
 <p data-bbox="343 537 526 571">Single Hung Window</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 50% dari total bukaan</li> <li>- Arah aliran angin yang masuk melalui bukaan akan sama dengan arah angin dari luar</li> <li>- Ketinggian aliran udara akan tetap sama dengan ketinggian bukaan, dengan catatan bukaan outlet diabaikan</li> <li>- Pengaturan daun jendela menentukan banyaknya angin yang masuk ke dalam ruangan</li> </ul>
 <p data-bbox="343 929 526 974">Double Hung Window</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 50% dari total bukaan</li> <li>- Arah aliran angin yang masuk melalui bukaan akan sama dengan arah angin dari luar</li> <li>- Melalui pengaturan daun jendela, ketinggian aliran udara yang masuk dapat bervariasi</li> <li>- Ketinggian aliran udara akan tetap sama dengan ketinggian bukaan, dengan catatan bukaan outlet diabaikan</li> <li>- Ketika kedua sisi daun jendela dibuka secara maksimal, kedua bukaan akan mengalirkan udara lebih merata dan berkelanjutan</li> </ul>
 <p data-bbox="375 1332 526 1377">Sliding Window</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 50% dari total bukaan</li> <li>- Sudut aliran angin yang masuk akan tetap sama dengan angin di luar</li> <li>- Ketinggian aliran udara akan tetap sama dengan ketinggian bukaan, dengan catatan bukaan outlet diabaikan</li> <li>- Melalui pengaturan daun jendela, posisi aliran udara yang masuk dapat bervariasi</li> <li>- Ketika kedua sisi daun jendela dibuka secara maksimal, kedua bukaan akan mengalirkan udara lebih merata dan berkelanjutan</li> </ul>

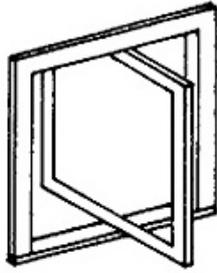
Sumber : Boutet (1987, 94:95)

## 2. Vertical vane opening

Merupakan tipe bukaan yang menggunakan poros vertikal sebagai sumbu daun jendela. Contoh jendela dengan tipe ini yaitu : side hinged casement, folding casement, dan vertical pivot. Tipe ini mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap arah pergerakan angin di dalam ruangan. Tiap derajat bukaan memiliki perbedaan efek terhadap arah dan banyaknya udara yang masuk dalam ruangan.

Tabel 2.11 Karakteristik Vertical Vane Opening

Ilustrasi	Keterangan
 <p data-bbox="303 918 598 1019">Side Hinged Casement Window</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan</li> <li>- Ketika salah satu atau kedua jendela terbuka penuh, angin yang masuk sama banyak dengan lebar bukaan, dan arah tetap</li> <li>- Ketika salah satu jendela terbuka penuh dan yang lainnya membentuk sudut, maka arah angin tetap lurus</li> <li>- Ketika salah satu jendela tertutup, dan jendela lainnya membentuk sudut kurang dari 90 derajat, angin yang masuk arahnya akan mengikuti jendela yang membentuk sudut</li> <li>- Ketika salah satu jendela terbuka dan membentuk sudut, dan angin tidak tegak lurus, maka arah pergerakan angin tidak berubah</li> <li>- Ketika angin datang membentuk sudut, dan salah satu jendela terbuka mengikuti sudut angin, maka angin akan langsung masuk mengikuti arah sudut bukaan jendela</li> </ul>
 <p data-bbox="327 1724 574 1814">Folding Casement Window</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan</li> <li>- Aliran angin kebanyakan masuk melewati bagian atas dan bawah celah segitiga di antara kedua daun jendela (lampiran)</li> <li>- Ketika kedua jendela dibuka secara maksimal atau minimal, angin melewati tepi jendela secara berkelanjutan</li> </ul>



Vertical Pivot Window

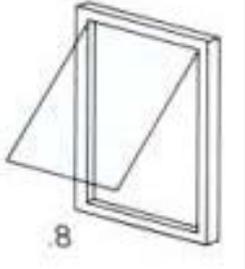
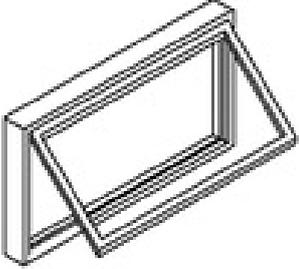
- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan
- Pergerakan udara mengikuti ketinggian tempat dimana posisi bukaan berada
- Aliran angin luar yang masuk akan mengikuti sudut yang dibentuk oleh daun jendela

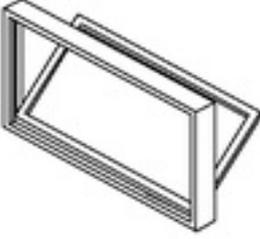
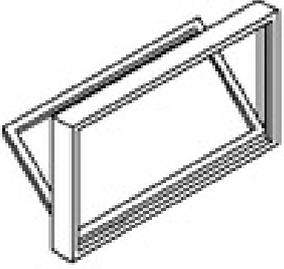
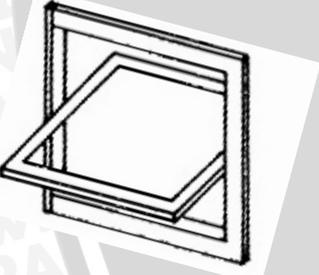
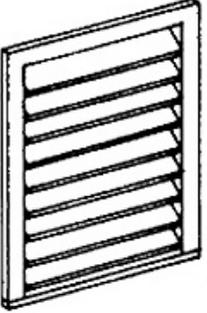
Sumber : Boutet (1987, 101:102)

### 3. Horizontal vane opening

Merupakan tipe bukaan yang menggunakan poros horizontal sebagai sumbu daun jendela. Contoh jendela dengan tipe ini seperti : projected sash, awning, basement, hopper, horizontal pivot, dan jalousie. Tipe ini mempengaruhi kecepatan dan pergerakan angin, khususnya secara vertikal. Umumnya, tipe – tipe jendela ini cenderung mengubah arah angin ke atas. Kecuali tipe hopper, horizontal center pivot, dan jalousie (Tabel 2.12)

Tabel 2.12 Karakteristik Horizontal Vane Opening

Ilustrasi	Keterangan
 <p data-bbox="322 1509 515 1543">Projected Sash</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan</li> <li>- Angin masuk sejajar dengan bukaan hanya ketika jendela terbuka penuh</li> <li>- Aliran angin cenderung ke atas apabila daun jendela hanya terbuka sebagian</li> </ul>
 <p data-bbox="365 1861 472 1895">Awning</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan</li> <li>- Angin masuk sejajar dengan bukaan hanya ketika jendela terbuka penuh</li> <li>- Aliran angin cenderung ke atas apabila daun jendela hanya terbuka sebagian</li> </ul>

Ilustrasi	Keterangan
 <p data-bbox="316 533 448 566">Basement</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan</li> <li>- Aliran angin cenderung ke atas, sudut perubahan angin mengikuti sudut daun jendela</li> </ul>
 <p data-bbox="331 965 432 999">Hopper</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan</li> <li>- Aliran angin cenderung menuju ke arah bawah, mengikuti arah daun jendela</li> <li>- Biasanya hopper ditempatkan di bawah, sehingga pergerakan angin langsung menuju ke lantai.</li> <li>- Untuk penghawaan alami ruangan disarankan untuk ditempatkan di area yang lebih tinggi agar sudut angin dapat menuju aktivitas pengguna</li> </ul>
 <p data-bbox="272 1391 491 1424">Horizontal Pivot</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan</li> <li>- Angin masuk sejajar dengan bukaan hanya ketika jendela terbuka penuh</li> <li>- Angin yang masuk ke dalam ruangan berubah mengikuti sudut kemiringan jendela</li> </ul>
 <p data-bbox="331 1794 443 1827">Jalousie</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jendela ini dapat memasukkan angin hingga maksimal 100% dari total bukaan</li> <li>- Kisi – kisi jendela membentuk kondisi angin menjadi laminar, sehingga persebaran anginnya merata</li> <li>- Arah aliran angin yang masuk mengikuti sudut kemiringan kisi – kisi</li> </ul>

Sumber : Boutet (1987, 110:111)

Banyaknya variasi desain jendela yang telah dipaparkan sebelumnya mengindikasikan bahwa tidak ada standar baku mengenai jendela mana yang paling optimal untuk mengatur

pergerakan angin. Setiap ruangan memiliki luas dan bentuk yang berbeda – beda, sehingga kebutuhan penghawaannya berbeda pula. Dengan mengetahui karakteristik tipe jendela, pengaplikasian jendela yang tepat dapat memenuhi kebutuhan penghawaan di dalam suatu ruangan.

### 2.4.3 Perancangan Ventilasi Alami

Ventilasi sebagai penghawaan alami hanya bisa dilakukan di daerah beriklim tropis lembab. Hal ini disebabkan kadar air dalam udara cukup tinggi sehingga suhu lebih rendah daripada kulit, oleh sebab itu tubuh akan merasakan pendinginan.

Berikut persyaratan untuk penerapan ventilasi silang yang baik menurut SNI 03-6572-2001, yaitu :

- A. Penataan letak bangunan yang tepat dapat mengoptimalkan penghawaan alami. Sisi panjang bangunan sejajar terhadap sudut angin datang
- B. Udara di sisi luar dinding harus bersih dan segar terhindar dari debu dan polusi
- C. Aliran udara diarahkan pada aktivitas manusia dalam ruangan
- D. Posisi inlet dan outlet pada ventilasi silang tidak boleh berada pada sisi yang sama
- E. Sekolah merupakan bangunan kategori 5, sehingga jumlah bukaan ventilasi tidak boleh kurang dari 10% luas lantai ruangan.
- F. Jarak antara inlet dan outlet tidak boleh lebih dari 12 meter
- G. Batas ambang bawah lubang jendela minimal 80 cm dari lantai, dan batas ambang atas lubang jendela minimal 30 cm dari langit-langit

Setelah mengetahui persyaratan – persyaratan dalam penerapan ventilasi alami, dilakukan tahap perancangan. Berikut tata cara perancangan ventilasi alami menurut SNI 03-6572-2001 :

1. Tentukan kebutuhan ventilasi udara yang diperlukan sesuai fungsi ruangan
2. Ketahui kecepatan rata – rata angin
3. Ketahui arah angin yang kuat
4. Pertimbangkan hambatan angin setempat, seperti bangunan yang berdekatan, bukit, pohon, atau semak belukar
5. Tentukan bukaan inlet, sebaiknya langsung menghadap angin yang kuat
6. Tentukan posisi bukaan outlet, sebaiknya berlawanan dengan sisi inlet