

Jendela dan Dampaknya terhadap Konsentrasi CO₂ di dalam Ruang Kelas, Kajian Literatur

Basaria Talarosha

Laboratorium Teknologi Bangunan, Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara.

Abstrak

Kualitas udara di dalam ruang kelas sekolah ditentukan oleh keberadaan pencemar udara, salah satunya yaitu karbon dioksida (CO₂) yang bersumber dari proses metabolisme tubuh manusia. Hasil studi menggunakan metoda numerik atau eksperimental membuktikan CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang kelas dapat mencapai lebih dari 1000 ppm yang berdampak pada terganggunya kesehatan serta performa belajar siswa. Mempertahankan konsentrasi CO₂ udara di dalam ruangan tidak melebihi ambang batas yang diijinkan untuk kesehatan secara prinsip hanya dapat dilakukan dengan cara pengenceran yaitu memasok udara segar ke dalam ruang melalui ventilasi (alami, mekanis, atau kombinasi keduanya). Menggunakan ventilasi alami untuk memasok udara lebih menguntungkan sebab hemat energi. Jendela adalah salah satu elemen bangunan yang dapat berfungsi sebagai ventilasi untuk memasok udara segar ke dalam ruang yang tidak dilengkapi dengan ventilasi mekanis. Efektivitas jendela memasok udara segar untuk mempertahankan konsentrasi CO₂ di bawah ambang batas yang diijinkan akan berbeda-beda tergantung pada beberapa faktor seperti luas, tipe, dan posisi/letak jendela pada selubung bangunan. Tulisan ini memuat kajian literatur tentang tingkat konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang kelas yang memanfaatkan jendela sebagai ventilasi. Literatur primer diperoleh dari berbagai publikasi jurnal acuan, ditambah sumber bacaan lain berupa buku dan standar yang terkait dengan topik.

Kata-kunci : jendela, karbon dioksida, kualitas udara, ruang kelas

Window and Its Impact on the CO₂ Concentration in the Classroom, A Literature Review

Abstract

Indoor air pollutant such as carbon dioxide (CO₂), which is produced by building occupants metabolism will affect the classroom indoor air quality. Results studies using numerical and experimental methods proved that the indoor air CO₂ level in the school classroom could reach more than 1000 ppm, which affects on health and learning performance of the students. Supplying adequate fresh air through ventilation (natural, mechanical, or hybrid system) can dilute the indoor air CO₂ concentration thus a healthy indoor environment could be achieved. Using natural ventilation is undoubtedly more beneficial compared to mechanical ventilation because it does not consume energy. A window is part of the building element that uses to ventilate the building. The effectiveness of windows to decrease the indoor air CO₂ concentration in the classroom will vary depending on several factors such as window size, type, and position of the window in the school building. This paper describes a literature review of airborne CO₂ levels in a classroom that using windows as ventilation. Primary literature derived from article published in the refereed journal, and other sources such as books and standards that are related to the topic.

Keywords : carbon dioxide, indoor air quality, school classroom, window

Kontak Penulis

Basaria Talarosha

Lab. Teknologi Bangunan, Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara

Jl. Perpustakaan Gedung J., Kampus USU Padang Bulan, Medan Kode pos 20155. Tel : +62-61-8211237 Fax : +62-61-8211237

E-mail : basaria@usu.ac.id

Informasi Artikel

Diterima editor tanggal 20 September 2016. Disetujui untuk diterbitkan tanggal 23 Desember 2017

ISSN 2301-9247 | E-ISSN 2622-0954 | https://jlbi.iplbi.or.id/ | © Ikatan Peneliti Lingkungan Binaan Indonesia (IPLBI)

Pengantar

Dalam kondisi normal komposisi zat kimia yang terkandung di udara adalah nitrogen (78%), oksigen (20,95%), argon (0,93%), karbon dioksida (0,038%), dan sisanya gas-gas lain dengan komposisi yang lebih sedikit (Vural, 2011, p. 61). ASHRAE (1999) menetapkan kandungan CO₂ udara di dalam ruang sebagai indikator kualitas udara dan kecukupan ventilasi di dalam ruang. Konsentrasi CO₂ yang dapat ditolerir dikandung udara di dalam ruang kurang dari 1000 ppm sedangkan udara luar 300 – 500 ppm.

Konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di dalam ruang kelas dapat mencapai lebih dari 1000 ppm atau lebih tinggi dari CO₂ udara luar jika ventilasi tidak mencukupi (Turanjanin, Vučićević, Jovanović, Mirkov, & Lazović, 2014). Karbon dioksida tersebut merupakan akumulasi dari CO₂ yang dikandung udara luar yang masuk ke dalam ruang ditambah CO₂ yang bersumber dari proses pernafasan manusia penghuni ruangan. Setiap kali manusia bernafas menghasilkan 4,4% volume CO₂ sehingga keberadaannya di dalam ruang tidak mungkin dihindarkan.

Mengurangi konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang hanya dapat dilakukan dengan proses pengenceran yaitu menambah udara segar ke dalam ruangan melalui ventilasi alami (Razali et al., 2015), ventilasi mekanis (Moon, Ryu, & Kim, 2015), atau gabungan keduanya (Gao, Wargocki, & Wang, 2014). Walaupun membuka jendela ruang kelas yang menggunakan ventilasi alami ataupun ventilasi mekanis sama-sama menurunkan kandungan CO₂ udara yang tinggi di dalam ruang kelas, namun berdampak terhadap meningkatnya konsumsi energi listrik pada ruangan yang menggunakan sistem ventilasi mekanis (Silva, 2011a). Beberapa penelitian membuktikan potensi ventilasi alami yang lebih baik dalam mempertahankan kualitas udara dibandingkan dengan menggunakan ventilasi mekanis tipe tertentu. Penelitian Al-Rashidi, Loveday, dan Al-Mutawa (2012) pada 10 ruang kelas di Kuwait menunjukkan rata-rata kandungan CO₂ udara di dalam ruang kelas pada saat menggunakan ventilasi alami lebih rendah (708 ppm) dari pada saat menggunakan ventilasi mekanis jenis *wall-mounted split units* (1596 ppm). Sribanurekha, S.N. Wijerathne, Wijepala, dan C. Jayasinghe (-) juga membuktikan bahwa kandungan CO₂ udara di dalam ruang yang menggunakan ventilasi mekanis (*split system* dan *cold water system*) lebih tinggi dari kandungan CO₂ udara di dalam ruang yang menggunakan ventilasi alami.

Keberadaan jendela sebagai ventilasi sangat penting untuk mempertahankan kualitas udara di dalam ruang kelas yang tidak menggunakan sistem ventilasi mekanis. Oleh sebab itu studi bertujuan merangkum literatur hasil penelitian terdahulu terkait kadar konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang kelas yang menggunakan

jendela sebagai ventilasi sekaligus peranannya sebagai pengendali konsentrasi CO₂ di dalam ruang.

Metode

Penelusuran sumber bacaan untuk bahan studi dilakukan menggunakan mesin pencari data pada jaringan internet yaitu Google Scholar, ResearchGate, dan Academia.edu yang memuat berbagai artikel yang dipublikasikan di dalam jurnal ilmiah, karya tulis dari prosiding seminar, berbagai standar dan kebijakan, serta laporan penelitian dari berbagai bidang keilmuan atau profesi yang terkait dengan topik pembahasan. Penelusuran dilakukan menggunakan kombinasi beberapa kata kunci berbahasa Inggris antara lain yaitu: *carbondioxide, classroom, school, window types, ventilation, indoor air quality, IAQ, student health, CO₂ standard, performance, sick building syndrome*. Penelusuran sumber bacaan dengan menggunakan kata kunci berbahasa Indonesia juga dilakukan, namun belum ditemukan sumber bacaan terkait topik pembahasan.

Sumber bacaan utama yang dipilih sebagai bahan studi adalah artikel terkait topik pembahasan yang telah dipublikasikan pada jurnal acuan antara lain *Indoor Air, Building and Environment, Energy and Buildings*, dan lain-lain. Judul dan abstrak artikel yang diperoleh dibaca terlebih dahulu sebelum ditetapkan sebagai bahan studi. Standar, peraturan dan kebijakan yang berhubungan dengan topik pembahasan juga merupakan sumber bacaan utama yang menjadi materi studi. Buku dan artikel prosiding seminar digunakan sebagai bahan kajian jika topik terkait tidak diperoleh dari jurnal acuan. Tabel dan gambar digunakan untuk menyederhanakan dan memudahkan proses kajian dan analisa.

Hasil dan Pembahasan

a) Jendela Ruang Kelas

Bukaan adalah bagian dari selubung bangunan (*envelope*) yaitu bidang dinding atau atap bangunan yang dibuka untuk tujuan tertentu, yaitu: memasukkan cahaya untuk penerangan alami pada siang hari; memasukkan udara segar untuk kebutuhan oksigen, kenyamanan termal dan kualitas udara; sebagai sarana keluar-masuk manusia; serta memberikan pemandangan (*view*) ke luar ruangan.

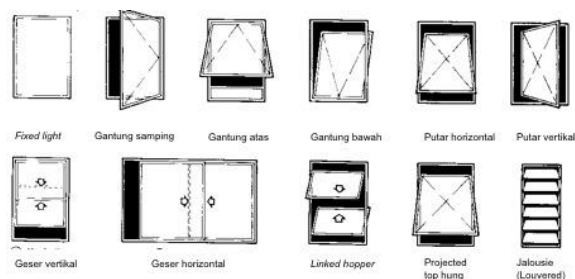
Secara umum bukaan dapat diklasifikasikan atas bukaan yang direncanakan yaitu berupa pintu, jendela, ventilasi dan yang tidak direncanakan yaitu berupa celah/lubang akibat konstruksi yang tidak rapat atau retak yang terjadi pada dinding, atap, pintu, dan jendela. Berdasarkan ukurannya, bukaan diklasifikasikan atas bukaan ukuran kecil, besar, dan sangat besar sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1 (Etheridge, 2012).

Tabel 1. Tipe Bukaannya pada Selubung Bangunan Berdasarkan Rasio Luas Bukaannya/Luas Dinding.

Ukuran dan Tipe	A/Aw (%)	Contoh
Kecil (tidak direncanakan)	< 0,1	Retak atau celah pada kusen pintu dan jendela.
Kecil (direncanakan)	< 2	Ventilasi dan jendela kecil.
Besar (direncanakan)	< 20	Jendela besar yang dapat dibuka, pintu dalam.
Sangat Besar (direncanakan)	> 50	Jendela besar yang dapat dibuka dan pintu luar.

Ket: A = luas bukaan Aw = luas dinding

Berdasarkan cara membukanya, jendela dapat dibedakan atas beberapa tipe yaitu: jendela yang tidak dapat dibuka (fix light); jendela gantung (hung): gantung atas, gantung samping, dan gantung bawah; jendela putar (pivoted): putar vertikal, putar horisontal; jendela sorong/geser: vertikal, horisontal; serta tipe jalousie (louver) sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.

**Gambar 1.** Tipe Jendela Berdasarkan Cara Membuka.

Sebagaimana fungsi jendela umumnya, jendela di ruang kelas juga digunakan untuk tujuan memperoleh pencahayaan alami pada siang hari, memenuhi kebutuhan udara segar, serta kenyamanan termal dan kualitas udara khususnya di dalam ruang kelas yang tidak dilengkapi dengan sistem ventilasi mekanis.

Poirazis (2004, p. 30) membandingkan efektifitas tipe jendela sebagai ventilasi terhadap cahaya (Tabel 2). Jendela tipe gantung samping, putar vertikal dan horisontal paling ideal memasukkan cahaya dan sebagai ventilasi.

Tabel 2. Efektifitas Jendela sebagai Ventilasi Dibandingkan terhadap Pencahayaan.

No.	Tipe bukaan	Efektifitas bukaan sebagai ventilasi, relatif terhadap pencahayaan
1	Gantung bawah	s/d 25 %
2	Geser horisontal	s/d 70 %
3	Lipat ke bawah, gantung atas	s/d 80 %
4	Geser vertikal	s/d 90 %
5	Gantung samping	s/d 100 %
6	Putar vertikal	s/d 100 %
7	Putar horisontal	s/d 100 %

b) CO₂ sebagai Parameter Kualitas Udara di Dalam Ruang Kelas

Kualitas udara di dalam ruang kelas memengaruhi kesehatan dan performa belajar siswa. Pencemar udara yang terdapat di dalam ruang kelas antara lain adalah *volatile organic compounds* atau VOCs (Gennaro, Farella, Marzocca, Mazzone, & Tutino, 2013); partikel berbahaya: PM_{2.5} dan PM₁₀ (Xu et al., 2015); ozon (Park et al., 2002); nitrogen dioksida (NO₂) dan formaldehide (Mi, Norbäck, Tao, Mi, & Ferm, 2006); jamur dan mikroorganisma (Baxi et al., 2013); serta karbon dioksida atau CO₂ (Luther & Horan, 2014; Razali et al., 2015). Masing-masing pencemar menimbulkan resiko yang berbeda terhadap kesehatan tergantung pada kadar yang dapat diterima tubuh serta latar belakang biologis dan medis manusianya.

Perhatian terhadap kualitas udara di dalam ruang kelas diawali oleh terjadinya krisis energi di A.S pada tahun 1973 (Baker, 2012) yang diikuti dengan munculnya gerakan konservasi energi di segala aspek. Untuk menghemat konsumsi energi, dilakukan evaluasi terkait standar pasokan udara segar yang harus diproduksi oleh mesin pengkondisian udara untuk dimasukkan ke dalam ruangan. Selain itu, luas bukaan jendela dikurangi dan konstruksinya dibuat rapat/kepad udara untuk menghindarkan terjadinya proses infiltrasi (udara panas/dingin dari luar masuk ke dalam ruang) dan sebaliknya yaitu proses eksfiltrasi (udara panas/dingin keluar dari dalam ruangan). Hal tersebut berdampak pada meningkatnya konsentrasi CO₂ di dalam ruang, lebih tinggi dari konsentrasi CO₂ udara luar (Mi et al., 2006) yang menyebabkan terganggunya kesehatan siswa, ditandai dengan munculnya keluhan antara lain sakit kepala, batuk, iritasi mata, gangguan saluran pernafasan, dan kelelahan yang oleh WHO disebut sebagai gejala-gejala *sick building syndrome* (Norbäck & Nordström, 2008; Simoni et al., 2010).

Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa konsentrasi CO₂ lebih dari 1000 ppm memengaruhi konsentrasi belajar siswa dan guru dalam mengajar (Twardella et al., 2012), performa belajar siswa (Hreha, 2007; Myhrvold, Olsen, & Lauridsen, 1996), dan berhubungan dengan ketidakhadiran siswa di sekolah (Shendell et al., 2004), serta kambuhnya penyakit asma pada siswa (Mi et al., 2006). Penelitian lain membuktikan anak sekolah yang dalam masa pertumbuhan lebih rentan terhadap keberadaan polutan di udara karena sistem kekebalan tubuhnya yang belum sempurna, bernafas lebih cepat dibandingkan orang dewasa, dan untuk proses pertumbuhannya membutuhkan oksigen lebih banyak dari orang dewasa dibandingkan dengan berat tubuhnya. Oleh sebab itu CO₂ yang terkandung udara di dalam ruang kelas sering digunakan sebagai indikator kecukupan ventilasi untuk mempertahankan kualitas udara di dalam ruang

dengan catatan tidak ada pencemar udara lain yang lebih berbahaya.

WHO (UNICEF & WHO, 2002) dan beberapa negara antara lain seperti Canada (Charles, Magee, Won, & Luszyk, 2005), US (ASHRAE, 1999; EPA, January 2005), German (Commission, 2008), Hong Kong (Kong, 2003), Malaysia (DOSH, 2010), Singapura (NEA), dan NIOSH menetapkan konsentrasi CO₂ udara rata-rata di dalam ruangan yaitu kurang dari 1000 ppm sebagai salah satu parameter kualitas udara di dalam ruang publik termasuk ruang kelas sekolah. Inggris (U.K, 2006) dan negara-negara Eropa umumnya menetapkan rata-rata konsentrasi CO₂ kurang dari 1500 ppm sebagai acuan untuk mempertahankan kualitas udara di dalam ruang (Tabel 3).

Tabel 3. Standar Konsentrasi CO₂ yang Dikandung oleh Udara di Dalam Ruang Kelas.

No	Standar	Konsentrasi CO ₂
1	ASHRAE 62-2001 (ASHRAE, 2001)	• Maks 700 di atas ambien udara luar • ± 1100 (ruang berpenghuni)
2	ASHRAE 62.1-2004 (ASHRAE, 2004)	1000
3	NIOSH, 1992 (U.S. National Institute for Occupational Safety and Health)	1000
4	Building Bulletin 101-2006 (U.K, 2006)	Rata-rata < 1500 selama belajar: 9.00-15.30
5	National Swedish Board of Occupational Safety and Health 19930	1000
6	Eropa (REHVA, 2010)	1500 selama belajar: 9.00-15.30
7	Finland (NBC-D2, 2010)	1000
8	Portugal (RSECE, 2006)	1200
9	Netherlands (Knottnerus, 2010)	1200, perbedaan luar-dalam 800, asumsi 400 di luar
10	Malaysia (DOSH, 2010)	1000

c) Jendela dan Konsentrasi CO₂ di Ruang Kelas

Konsentrasi CO₂ di dalam ruang kelas dipengaruhi oleh densitas ruang (Mysen, Berntsen, Nafstad, & Schild, 2005), jumlah siswa (Ito & Nishi, 2012), aktivitas siswa (Pacurar & Cernazanu, 2013; Ribéron, O'Kelly, Maupetit, & Robine, 2002), lama orang di dalam ruang (Mainka & Zajusz-Zubek, 2015), serta nilai pertukaran udara atau ventilasi (Pickenpaugh, 2013; Turanjanin et al., 2014).

Pada awalnya penelitian terkait kualitas udara yang berhubungan dengan konsentrasi CO₂ di sekolah dilakukan menanggapi adanya keluhan gangguan kesehatan siswa pada ruang kelas yang menggunakan ventilasi mekanis saja. Gangguan kesehatan terjadi sebagai dampak pengurangan pasokan udara segar oleh

sistem ventilasi mekanis dan konstruksi jendela ruang kelas yang kedap udara untuk menghemat konsumsi energi bangunan. Penelitian berlanjut pada ruang kelas yang memanfaatkan jendela sebagai ventilasi. Penelitian di Jerman dan Perancis pada sekolah yang menggunakan sistem ventilasi alami menunjukkan konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang lebih tinggi (> 1000 ppm) pada saat musim dingin dari pada musim panas. Hal ini disebabkan pada musim dingin jendela dan pintu ruangan tertutup rapat untuk menghindari masuknya udara dingin ke dalam ruang sehingga konsentrasi CO₂ udara di dalam ruang kelas meningkat, sebaliknya jendela ruangan dibuka pada musim panas sehingga intervensi udara luar mengencerkan CO₂ di dalam ruang (Ribéron et al., 2002). Penelitian Sribanurekha et al. (-) pada 2 ruang kelas yang menggunakan jendela yang dapat dibuka tutup juga membuktikan CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang kelas pada saat jendela terbuka penuh lebih rendah dari pada saat jendela setengah terbuka dan paling tinggi saat jendela tertutup seluruhnya. Studi lapangan tentang peranan jendela dalam menurunkan konsentrasi CO₂ udara di ruang kelas yang menggunakan ventilasi alami dilakukan juga di wilayah beriklim tropis Malaysia. Studi yang dilakukan pada 14 ruang kelas dari 3 sekolah yang (Razali et al., 2015), dan 9 ruang kelas dari 3 sekolah (Ismail, Sofian, & Abdullah, 2010) membuktikan rata-rata konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang kelas kurang dari 1000 ppm atau di bawah ambang batas yang direkomendasikan oleh DOSH (Department of Safety and Health, Malaysia) dan ASHRAE.

Beberapa studi tentang perilaku siswa dan guru terhadap jendela ruang kelas menunjukkan bahwa siswa dan guru lebih sering membuka jendela untuk kenyamanan termal dari pada kenyamanan kualitas udara atau menurunkan konsentrasi CO₂ sehingga merekomendasikan untuk menggunakan jendela otomatis atau menggunakan sensor CO₂ di dalam ruang kelas agar siswa dan guru membuka jendela saat sensor memberi tanda kandungan CO₂ di udara lebih dari 1000 ppm (Gao et al., 2014; Griffiths & Eftekhari, 2008; Wyon & Wargocki, 2008). Keberadaan CO₂ di dalam ruang tidak dapat diketahui tanpa menggunakan alat deteksi atau sensor sebab CO₂ merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak dapat disaring (OSHA, 2011), berbeda dengan perubahan suhu yang dapat dirasakan oleh indra manusia.

Tidak banyak studi yang meneliti hubungan antara tipe jendela yang dimanfaatkan sebagai ventilasi terhadap konsentrasi CO₂ di dalam ruang kelas. Evaluasi terhadap masing-masing dua ruang belajar dari empat sekolah yang menggunakan jendela tipe gantung atas yang dioperasikan secara manual dan otomatis serta dirancang mengacu pada *Building Bulletin 101* (panduan merancang ventilasi bangunan sekolah di Inggris dan Wales) membuktikan rancangan jendela yang tepat mampu mempertahankan kualitas udara dan mengakomodasi kebutuhan pasokan

udara segar di dalam ruang kelas (Mumovic et al., 2009). Studi lain yang bertujuan untuk mengetahui performa berbagai tipe jendela dalam mengendalikan kandungan CO₂ udara di dalam ruangan menyimpulkan bahwa jendela tipe gantung atas memiliki performa paling buruk dalam mengendalikan konsentrasi CO₂ di dalam ruang sedangkan yang terbaik adalah jendela putar horizontal terbuka ke luar. Studi dilakukan terhadap enam tipe jendela yaitu jendela geser vertikal ganda; jendela gantung: atas, samping, bawah; dan jendela putar: horisontal dan vertical (Grabe, Svoboda, & Bäuml, 2014). Jika dihubungkan dengan Poirazis (2004, p. 30) maka dapat disimpulkan bahwa jendela putar horisontal adalah tipe jendela yang paling tepat digunakan untuk mengendalikan CO₂ yang dikandung udara sekaligus mengakomodasi kebutuhan pencahayaan, dan ventilasi di dalam ruang.

Kontradiksi dengan hal di atas, buku Manual Pembangunan Gedung Sekolah yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah memberi ilustrasi penggunaan jendela tipe gantung atas dengan penambahan ventilasi permanen berupa jalusi horisontal di atasnya. Mengacu pada hal di atas dan hasil penelitian Grabe et al. (2014) yang menyimpulkan jendela tipe gantung atas memiliki performa paling buruk dalam mengendalikan konsentrasi CO₂ di dalam ruang, Talarosha (2016) mengukur konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang kelas sekolah dasar yang menggunakan jendela tipe gantung atas. Pengukuran dilakukan pada kondisi sudut bukaan yang berbeda-beda yaitu 10° dan 30°, masing-masing selama tiga hari sepanjang waktu belajar. Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang kelas kurang dari 700 ppm, di bawah ambang batas yang diizinkan untuk kesehatan. Hal tersebut terjadi kemungkinan karena

obyek studi menggunakan sistem ventilasi silang dan adanya ventilasi permanen (jalusi horisontal) di atas jendela gantung atas, serta kondisi pintu yang dalam keadaan terbuka saat pengukuran dilakukan. Perlu penelitian lanjut untuk membuktikan hal tersebut.

Standar dan kebijakan yang mengatur tentang sistem bukaan (jendela, ventilasi, dan pintu) pada ruang kelas di lingkungan sekolah di Indonesia beragam dan tidak satupun yang secara spesifik berhubungan dengan kandungan konsentrasi CO₂ udara di dalam ruang (kelas). Keputusan Menteri Kesehatan No. 1429/MENKES/SK/XII/2006 tentang Pedoman Penyelenggaraan Kesehatan Lingkungan Sekolah hanya mengatur tentang jendela yang harus dapat dibuka/tutup untuk fungsi pencahayaan dan ventilasi dalam bentuk bukaan permanen. Luas lubang ventilasi untuk menjamin aliran udara segar di dalam ruang kelas di lingkungan sekolah ditetapkan minimal 20% dari luas lantai (kepadatan kelas 1,75 m²/murid dan tinggi langit-langit minimal 3 m dari permukaan lantai). Berbeda dengan hal di atas, Lampiran II Permendikbud No. 32 tahun 2011 (Kemendikbud, 2011) menetapkan luas bukaan ruang kelas berupa jendela untuk pencahayaan adalah 20% dari luas total lantai bangunan dan 6% - 10% diantaranya merupakan bukaan permanen untuk ventilasi. Kemendiknas (2009) menetapkan bukaan berupa jendela untuk memasukkan cahaya ke dalam ruangan (terbuat dari kaca mati) dengan ketinggian ambang bawah jendela minimal 1.10 m dari atas lantai dan ventilasi untuk sirkulasi udara: dipasang secara bersilangan (cross ventilation) dari jalusi kayu, kaca silang, kaca tidak penuh atau daun ventilasi kaca namun tidak mencantumkan ketentuan luas bukaan untuk jendela dan ventilasi. Kebijakan lainnya yaitu Permendiknas No. 24 tahun 2007 tidak menyinggung fungsi jendela untuk ventilasi melainkan untuk mengakomodasi kebutuhan cahaya yang memadai saat membaca, dan memberi pandangan ke luar ruangan.

Tabel 4. Kebijakan Terkait Jendela dan Ventilasi pada Ruang Kelas Sekolah di Indonesia

Data Fisik	SNI 03-6572-2001 (BSN, 2001)	Kep.Menkes R.I. No.1429/MEN KES/SK/XII/2006 (Kesehatan, 2006)	Per.Mendiknas RI Nomor 24 Tahun 2007 (Pendidikan, 2007)	Lamp IV Permendiknas No. 3 Tahun 2009	Permen-diknas RI No. 15 Tahun 2010	Lampiran II Permendikbud No. 32 Tahun 2011 (Kemendikbud, 2011)	Permendikbud No. 61 Tahun 2012 (Kemendiknas, 2012)
Ukuran R. Kelas	-	-	-	7m x 8m	-	7m x 8m	7m x 8m
Densitas kelas	-	Min 1,75 m ² /orang	2 m ² /orang, maks. 28 orang/kelas	-	Maks. 32 orang	-	-
Tinggi Lantai - Langit ²	-	3,00 m	-	Min. 3,50 m	-	Min. 3,50 m	Min. 3,50 m
Tinggi Ambang Bawah Jendela	-	-	-	1,10 m	-	-	-
Bukaan:						20% luas total lantai bangunan	20% luas total lantai bangunan
- Jendela (pencahayaan)	✓	dapat dibuka dan ditutup	memadai	✓	-	20% dari luas lantai	✓
- Ventilasi (permanen)	5 % luas lantai	20 % luas lantai	secukupnya	ventilasi silang	-	6% - 10% luas lantai	-
- Pintu	✓	-	-	✓	-	-	✓

Secara ringkas ketentuan terkait jendela dan ventilasi pada ruang kelas sekolah di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 4.

Untuk menjamin kualitas udara di dalam ruang yang menggunakan ventilasi alami, ASHRAE (2004) merekomendasikan luas bukaan permanen pada bagian dinding atau atap bangunan dengan ukuran kedalaman ruang 8m (25 ft), minimum 4% dari luas lantai ruangan dan harus terbuka langsung ke luar. Jika bukaan yang digunakan adalah tipe jalusi (louver) atau tipe lain yang sifatnya menghalangi udara bebas masuk ke dalam ruang, maka perhitungan luas bukaan harus berdasarkan luas bukaan yang bebas hambatan.

Penelitian Talarosha (2016) menunjukkan rasio luas bukaan terhadap luas lantai ruang kelas sejumlah 16,83% dengan komposisi: luas jendela gantung atas terhadap luas lantai ruang 3,83%, luas jalusi horizontal terhadap luas lantai ruang 9%, dan luas pintu terhadap luas lantai ruang 4%; mampu menekan kadar konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruangan selama berlangsungnya proses belajar, rata-rata kurang dari 700 ppm.

Tabel 5. Perbandingan Kondisi Eksisting Luas Bukaan terhadap Standar/Kebijakan terkait Luas Bukaan pada Ruang Kelas di Sekolah Indonesia, diadaptasi dari Talarosha (2016)

Jenis Bukaan	Luas bukaan / luas lantai eksisting (%)	Standar ^{1,2,3,4}			
		Luas bukaan / luas lantai (%)			
		1	2	3	4
Jendela gantung atas	3,83	-	-	-	-
Pintu	4	-	-	-	-
Ventilasi permanen (jalusi horisontal)	9	20	6-10	5	4
Total	16,83	20	6-10	5	4

Keterangan:

- 1 = Kep. Men.Kes. No. 1429/ MENKES/ SK/ 2006
- 2 = Lamp. II Permendikbud No. 32 tahun 2011
- 3 = SNI 03-6572-2001
- 4 = ASHRAE (2004)

Kesimpulan

Studi bertujuan merangkum kajian literatur terkait kadar konsentrasi CO₂ yang dikandung udara di dalam ruang kelas yang memanfaatkan jendela sebagai ventilasi dan peranannya sebagai pengendali konsentrasi CO₂ untuk mempertahankan kualitas udara. Untuk mengencerkan konsentrasi CO₂ di dalam ruang kelas maka jendela harus dapat dibuka sehingga udara segar dapat masuk ke dalam ruang. Luas lubang jendela yang terbuka akan memengaruhi konsentrasi CO₂ di dalam ruang kelas (Silva, 2011b; Sribanurekha et al., -) demikian halnya dengan tipe jendela yang digunakan (Grabe et al., 2014).

Mengacu pada kebijakan/standar terkait luas bukaan ventilasi, ASHRAE (2004) menetapkan kebutuhan

ventilasi yang paling sedikit (4 % dari luas lantai ruangan) dibandingkan dengan seluruh kebijakan yang mengatur hal yang sama di Indonesia. SNI 03-6572-2001 tentang Tata cara perancangan sistem ventilasi dan pengkondisian udara pada bangunan gedung menetapkan kebutuhan luas bukaan untuk ventilasi 5% dari luas lantai ruangan, Lampiran II Permendikbud No. 32 tahun 2011 menetapkan 6%-10% dari luas lantai ruangan, dan tuntutan yang paling luas ditetapkan oleh Keputusan Menteri Kesehatan No.1429/MEN-KES/SK/XII/2006 yaitu 20% dari luas lantai ruangan.

Perlu penelitian lanjut untuk memastikan luas bukaan dan tipe jendela yang tepat untuk mempertahankan kualitas udara dari aspek konsentrasi CO₂, untuk menjamin kesehatan dan kenyamanan kualitas udara di dalam ruang kelas sekolah Indonesia.

Daftar Pustaka

- Al-Rashidi, K., Loveday, D., & Al-Mutawa, N. (2012). Impact of Ventilation Modes on Carbon Dioxide Concentration Levels in Kuwait Classrooms. *Energy and Buildings*, 47, 540-549. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.030>
- ASHRAE. (1999). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality *ASHRAE Standard 62-1999 (supersedes ANSI/ASHRAE 62-1989) Includes ASHRAE Addenda Listed in Appendix I* Atlanta, GA 30329: ASHRAE.
- ASHRAE. (2001). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality *ANSI/ASHRAE Standard 62-2001 (Including ANSI/ASHRAE Addenda listed in Appendix H)*.
- ASHRAE. (2004). Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004 (Includes ANSI/ASHRAE Addenda listed in Appendix H)*
- Baker, L. (2012). A History of School Design and Its Indoor Environmental Standards, 1900 to Today: National Clearinghouse for Educational Facilities.
- Baxi, S. N., Muilenberg, M. L., Rogers, C. A., Sheehan, W. J., Gaffin, J., Permaul, P., . . . Phipatanakul, W. (2013). Exposures to Molds in School Classrooms of Children with Asthma. *Pediatric Allergy and Immunology*, 24(7), 697-703. <https://doi.org/10.1111/pai.12127>
- BSN. (2001). SNI 03-6572-2001 *Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- Charles, K., Magee, R. J., Won, D., & Luszyk, E. (2005). Indoor Air Quality Guidelines and Standards *CMEIAQ-II Report 5.1*: National Research Council Canada.
- Commission, G. F. E. A. S. I. A. H. (2008). Guidelines for Indoor Air Hygiene in School Buildings. Berlin: Federal Environment Agency (UBA).
- Industry Code of Practice on Indoor Air Quality 2010, JKPP DP(S) 127/379/4-39 C.F.R. (2010).
- EPA. (January 2005). Indoor Air Quality Tools for Schools *EPA 402-K-95-001* (Third ed.). Washington D.C.
- Etheridge, D. (2012). Steady Flow Characteristics of Openings Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design (1st ed., pp. 47-55). UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Gao, J., Wargocki, P., & Wang, Y. (2014). Indoor Air Quality and Thermal Environment in Classrooms with Different Ventilation Systems. *REHVA* 10-14.

- Gennaro, G. D., Farella, G., Marzocca, A., Mazzone, A., & Tutino, M. (2013). Indoor and Outdoor Monitoring of Volatile Organic Compounds in School Buildings: Indicators Based on Health Risk Assessment to Single out Critical Issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(12), 6273-6291. <https://doi.org/10.3390/ijerph10126273>
- Grabe, J. V., Svoboda, P., & Bäumlner, A. (2014). Window Ventilation Efficiency in the Case of Buoyancy Ventilation. *Energy and Buildings*, 72, 203-211. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.006>
- Griffiths, M., & Eftekhari, M. (2008). Control of CO₂ in A Naturally Ventilated Classroom. *Energy and Buildings*, 40(4), 556-560. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.013>
- Hreha, D. M. (2007). *The Influence of Indoor Air Quality (IAQ) on Student Test Performance*. (Doctor of Education Dissertation), Seton Hall University.
- Ismail, M., Sofian, N. Z. M., & Abdullah, A. M. (2010). Indoor Air Quality in Selected Samples of Primary Schools in Kuala Terengganu, Malaysia. *Environment Asia*, 3, 103-108.
- Ito, S., & Nishi, H. (2012). *Estimation of the Number of People Under Controlled Ventilation Using a CO₂ Concentration Sensor*. Paper presented at the IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. <https://doi.org/10.1109/iecon.2012.6388997>
- Lampiran II Permendikbud No. 32 Tahun 2011 tentang Standar dan Spesifikasi Teknis Rehabilitasi Ruang Kelas Rusak, Pembangunan Ruang Kelas Baru Beserta Perabotnya dan Pembangunan Ruang Perpustakaan Beserta Perabotnya untuk SD/SDLB. (2011).
- Lampiran IV Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 3 Tahun 2009 Tanggal 29 Januari 2009 Standar/Spesifikasi Teknis Pembangunan/Rehabilitai Gedung dan Meubelair Sekolah Dasar. (2009).
- Lampiran II Permendikbud No. 61 Tahun 2012 tentang Perubahan atas Permendikbud No 56 Tahun 2011 tentang Petunjuk Teknis Penggunaan DAK Bidang Pendidikan Tahun Anggaran 2012 untuk Sekolah Dasar/Sekolah Dasar Luar Biasa. (2012).
- Keputusan Menteri Kesehatan R.I. Nomor 1429/MENKES/SK/XII/2006 tentang Pedoman Penyelenggaraan Kesehatan Lingkungan Sekolah. (2006).
- Knottnerus, J. A. (2010). Indoor Air Quality in Primary Schools, and the Value of Carbon Dioxide as an Indicator of Air Quality (H. C. o. t. Netherlands, Trans.). Netherlands: Minister of Housing, Spatial Planning and the Environment Netherlands.
- Kong, G. O. H. (2003). *Guidance Notes for the Management of Indoor Air Quality in Offices and Public Places*.
- Luther, M. B., & Horan, P. (2014). *Investigating and Understanding CO₂ Concentrations in School Classrooms*. Paper presented at the 48th International Conference of the Architectural Science Association.
- Mainka, A., & Zajusz-Zubek, E. (2015). Indoor Air Quality in Urban and Rural Preschools in Upper Silesia, Poland: Particulate Matter and Carbon Dioxide. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12, 7697-7711. doi: 10.3390/ijerph120707697
- Mi, Y.-H., Norbäck, D., Tao, J., Mi, Y.-L., & Ferm, M. (2006). Current Asthma and Respiratory Symptoms among Pupils in Shanghai, China: Influence of Building Ventilation, Nitrogen Dioxide, Ozone, and Formaldehyde in Classrooms. *Indoor Air*, 16(6), 454-464. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00439.x>
- Moon, H. J., Ryu, S. H., & Kim, J. T. (2015). Investigation of IAQ in Mechanically Ventilated Kindergartens and Elementary Schools in Korea. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 7(5), 382-385. <https://doi.org/10.7763/ijet.2015.v7.823>
- Mumovic, D., Palmer, J., Davies, M., Orme, M., Ridley, I., Oreszczyn, T., . . . Way, P. (2009). Winter Indoor Air Quality, Thermal Comfort and Acoustic Performance of Newly Built Secondary Schools in England. *Building and Environment*, 44(7), 1466-1477. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.06.014
- Myhrvold, A., Olsen, E., & Lauridsen, O. (1996). Indoor Environment in Schools—Pupils Health and Performance in Regard to CO₂ Concentrations. *Indoor Air*, 96, 369-371.
- Mysen, M., Berntsen, S., Nafstad, P., & Schild, P. G. (2005). Occupancy Density and Benefits of Demand-Controlled Ventilation in Norwegian Primary Schools. *Energy and Buildings*, 37(12), 1234-1240. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.01.003>
- Norbäck, D., & Nordström, K. (2008). Sick Building Syndrome in Relation to Air Exchange Rate, CO₂, Room Temperature and Relative Air Humidity in University Computer Classrooms: An Experimental Study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 82(1), 21-30. doi: 10.1007/s00420-008-0301-9
- OSHA. (2011). Indoor Air Quality in Commercial and Institutional Buildings *OSHA 3430-04: Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor*.
- Pacurar, C., & Cernazanu, C. (2013). A Study of CO₂ Influence on Student Activity in Classroom. *Revista Română de Inginerie Civilă*, 4(2), 81-88.
- Park, H., Lee, B., ., E.-H. H., Lee, J.-T., Kim, H., & Hong, Y.-C. (2002). Association of Air Pollution with School Absenteeism Due to Illness. *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, 156(12), 1235-1239. doi: 10.1001/archpedi.156.12.1235
- Peraturan Menteri Pendidikan Nasional RI Nomor 24 Tahun 2007 tentang Standar Sarana dan Prasarana untuk Sekolah Dasar/Madrasah Ibtidaiyah (SD/MI), Sekolah Menengah Pertama/Madrasah Tsanawiyah (SMP/MTs), dan Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah (SMA/MA). (2007).
- Pickenpaugh, J. G. (2013). *Assessment of Potential Carbon Dioxide-Based Demand Control Ventilation System Performance in Single Zone Systems*. (Master of Science in Engineering Management), Air Force Institute of Technology Air University.
- Poirazis, H. (2004). Double Skin Façades for Office Buildings, Literature Review (D. o. E. a. B. D. D. o. C. a. A. L. I. o. Technology, Trans.). Lund, Sweden: Lund University.
- Razali, N. Y. Y., Latif, M. T., Dominick, D., Mohamad, N., Sulaiman, F. R., & Srithawirat, T. (2015). Concentration of Particulate Matter, CO and CO₂ in Selected Schools in Malaysia. *Building and Environment*, 87, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.015>
- Ribéron, J., O'Kelly, P., Maupetit, F., & Robine, E. (2002). *Indoor Air Quality in Schools: The Impact of Ventilation Conditions and Indoor Activities*. Paper presented at the Indoor Air.
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., & Faulkner, D. (2004). Associations Between Classroom CO₂ Concentrations and Student Attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14(5), 333-341. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>

- Silva, N. A. F. d. (2011a). Energy Efficient Window Opening for Air Quality Control in Classrooms. *Rheva*, 1-6.
- Silva, N. A. F. d. (2011b). *Energy-Efficient Air Quality Control in School Classrooms*. (Master Thesis), Technical University of Denmark.
- Simoni, M., Annesi-Maesano, I., Sigsgaard, T., Norback, D., Wieslander, G., Nystad, W., . . . Viegi, G. (2010). School Air Quality Related to Dry cough, Rhinitis and Nasal Patency in Children. *European Respiratory Journal*, 35(4), 742-749. <https://doi.org/10.1183/09031936.00016309>
- Sribanurekha, V., Wijerathne, S. N., Wijepala, L. H. S., & Jayasinghe, C. (-). Effect of Different Ventilation Conditions on Indoor CO₂ Levels. Retrieved from
- Talarosha, B. (2016, 26-28 Oktober). *Konsentrasi CO₂ pada Ruang Kelas dengan Sistem Ventilasi Alami, sebuah Penelitian Awal*. Paper presented at the Temu Ilmiah 5 Ikatan Peneliti Lingkungan Binaan Tahun 2016, Malang.
- Turanjanin, V., Vučićević, B., Jovanović, M., Mirkov, N., & Lazović, I. (2014). Indoor CO₂ Measurements in Serbian Schools and Ventilation Rate Calculation. *Energy*, 77, 290-296. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.028>
- Twardella, D., Matzen, W., Lahrz, T., Burghardt, R., Spiegel, H., Hendrowarsito, L., . . . Fromme, H. (2012). Effect of Classroom Air Quality on Students' Concentration: Results of a cluster-randomized cross-over experimental study. *Indoor Air*, 22(5), 378-387. doi: 10.1111/j.1600-0668.2012.00774.x
- Building Bulletin 101: Ventilation of School Buildings, Regulations Standards Design Guidance C. F. R. (2006).
- UNICEF, & WHO. (2002) The Physical School Environment, An Essential Component of a Health-Promoting School. *The World Health Organization's, Information Series on School Health Document 2*.
- Vural, S. M. J. (2011). Indoor Air Quality. In S. A. Abdul-Wahab (Ed.), *Sick Building Syndrome in Public Buildings and Workplaces* (pp. 59-74). https://doi.org/10.1007/978-3-642-17919-8_3
- Wyon, D. P., & Wargocki, P. (2008, 17-22 August). *Window-Opening Behaviour When Classroom Temperature and Air Quality are Manipulated Experimentally (ASHRAE 1257-RP)*. Paper presented at the Indoor Air, Copenhagen, Denmark
- Xu, H., Guinot, B., Shen, Z., Ho, K. F., Niu, X., Xiao, S., . . . Cao, J. (2015). Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM_{2.5} and PM_{0.25} in Indoor and Outdoor Environments of A Middle School: Secondary Formation of Organic Carbon and Sources Identification. *Atmosphere*, 6, 361-379. doi: 10.3390/atmos6030361