

ANALISIS SISTEM TATA UDARA DI DALAM KABIN KENDARAAN MINIBUS DENGAN MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

T. A. Fauzi Soelaiman dan Andini Aritonang

Lab. Termodinamika, KPP-IR, ITB, Jalan Tamansari 126, Bandung 40132
Telepon/Fax: 022-2502342, E-mail: fauzi@termo.pauir.itb.ac.id & andini_ca@hotmail.com

Ringkasan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sistem tata udara di dalam kabin sebuah kendaraan minibus melalui simulasi numerik yang menggunakan perangkat lunak Computational Fluid Dynamics. Dua model tiga-dimensi dari kendaraan tersebut digunakan dalam simulasi. Model pertama adalah kendaraan tanpa penumpang, dan model kedua adalah kendaraan dengan tujuh orang penumpang. Dalam penelitian ini, model penumpang dianggap sebagai salah satu sumber beban pendinginan, sehingga analisis efek pendinginan yang dialami oleh penumpang tidak dilakukan. Perhitungan beban pendinginan juga dilakukan untuk mengetahui beban pendinginan maksimum dengan menggunakan data cuaca kota Jakarta selama tahun 2002. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan kendaraan yang sebenarnya untuk mengetahui nilai maksimum kesalahan dari pembacaan temperature hasil eksperimen dan simulasi. Tahap ini memberikan nilai maksimum kesalahan sebesar 10%, yang mana dalam penelitian ini nilai tersebut masih dapat diterima. Simulasi dalam tahap ini dilakukan dengan menggunakan model pertama dan perhitungan pada kondisi tunak. Beberapa simulasi juga dilakukan untuk menganalisis kehandalan sistem tata udara dalam mengatasi beban pendinginan maksimum. Simulasi ini dilakukan dengan memvariasikan laju aliran massa udara yang memasuki kabin, menggunakan model kedua dan perhitungan dalam kondisi transien. Kontur temperatur dan kecepatan yang diperoleh melalui simulasi-simulasi ini memberikan pemahaman yang baik atas korelasi antara faktor-faktor yang mempengaruhi kondisi udara di dalam kabin.

Abstract

The aim of this research is to establish an analysis of an air conditioning system in a minibus vehicle cabin through some series of numerical simulations using a Computational Fluid Dynamics software. Two three-dimensional models of the vehicle were used in the simulations. The first model is a minibus without any passenger, and the second model is a minibus with seven passengers. In this research, the passenger model was considered as another cooling load source, therefore an analysis of the cooling effect experienced by passenger was not performed. A calculation of cooling load was also done to determine the maximum cooling load, using the weather data of Jakarta city throughout the year 2002. An experiment was done using an actual vehicle to validate the model. The maximum error of temperature reading between experiment and simulation was calculated and gave an acceptable maximum error of 10%. The simulation in this step was performed using the first model and steady calculation. A series of simulations were also done to analyze the air conditioning system performance under maximum cooling load. These simulations were done by varying the mass flow rates of the air entering the cabin, using the second model and transient calculations. The temperature and velocity contours acquired from these simulations were able to give good understanding of correlations between the factors influencing the air condition in the cabin.

Keywords: *Computational Fluid Dynamics, air conditioning system, vehicle*

1. PENDAHULUAN

Kenyamanan termal bagi penumpang dalam kabin suatu kendaraan bermotor telah menjadi perhatian para produsen dan pengguna. Penggunaan pengkondisi udara pada kendaraan bermotor bertujuan untuk mencapai kondisi nyaman bagi penumpangnya.

Kondisi udara di dalam kabin kendaraan bermotor dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti sinar matahari, temperatur udara, penumpang, kecepatan kendaraan, dan lain-lain. Berbagai inovasi telah dilakukan untuk menciptakan kondisi udara kabin yang diinginkan, diantaranya penggunaan kaca film dan modifikasi letak masukan unit pendingin di dalam kabin [Aghil, 2000].

Dengan berkembangnya penggunaan program *Computational Fluid Dynamics*, efek dari inovasi-inovasi tersebut terhadap kondisi udara kabin dapat diteliti dengan mudah dalam waktu yang singkat. Hasil penelitian akan memberikan informasi untuk pengembangan kabin dan pengkondisi udara yang akan digunakan.

Pada penelitian ini dilakukan analisis sistem tata udara pada kendaraan minibus Panther LS 2.5 dalam mengatasi beban pendinginan maksimum serta kemampuannya memberikan kondisi termal yang nyaman bagi penumpang pada berbagai kondisi kerja dengan menggunakan data cuaca kota Jakarta selama tahun 2002. Analisis ini dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics*. Melalui simulasi ini diketahui pola distribusi temperatur dan kecepatan udara di dalam kabin mobil, serta faktor-faktor yang mempengaruhinya.

Perhitungan beban pendinginan maksimum dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Pembuatan model dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Solid Edge V 12. Penggenerasian mesh dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Gambit 1.1. Sedangkan simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Fluent 6.0.

2. KENYAMANAN TERMAL

Tujuan utama dari sistem pemanasan, ventilasi, dan pengkondisian udara adalah untuk menciptakan kondisi yang nyaman bagi tubuh manusia. Definisi yang diterima secara luas menyatakan kenyamanan termal sebagai perasaan puas seseorang terhadap suatu lingkungan termal. Secara umum, kenyamanan terjadi saat temperatur tubuh manusia berada pada rentang yang sempit, kelembaban kulit yang rendah, dan usaha fisiologis yang diperlukan untuk pengaturan temperatur tubuh diminimalkan [ASHRAE, 1997].

Temperatur rata-rata tubuh manusia bervariasi terhadap balans antara panas yang dihasilkan oleh tubuh dengan panas yang didisipasikan ke lingkungan. Panas terutama diproduksi oleh metabolisme, misalnya proses oksidasi elemen-elemen makanan. Saat metabolisme terjadi, tubuh manusia juga dapat melakukan kerja, kehilangan panas akibat evaporasi cairan tubuh, dan pertukaran panas akibat radiasi dan konveksi. Pada kondisi tubuh relaks, proses-proses ini menghasilkan temperatur rata-rata bagian dalam tubuh \bar{t}_{core} antara 36 hingga 38°C [ASHRAE, 1985].

Panas dari lingkungan dapat mencapai permukaan tubuh melalui proses konduksi, konveksi, dan radiasi, sehingga kulit akan mengalami efek termal total dari kombinasi ketiga proses tersebut. Keseimbangan termal akan tercapai saat seluruh panas yang dihasilkan oleh tubuh didisipasikan ke lingkungan. Panas yang dihasilkan oleh jaringan dalam tubuh secara kontinyu dipindahkan ke

permukaan kulit. Selanjutnya, panas akan diemisikan ke lingkungan secara konveksi, radiasi, dan evaporasi. Sebagian dari panas juga dipindahkan dari permukaan kulit ke lingkungan secara konduksi [Agarwal, 1998].

Faktor-faktor utama yang mempengaruhi kenyamanan termal dibagi menjadi dua, yaitu faktor lingkungan dan faktor individu [Agarwal, 1998].

Faktor lingkungan terdiri dari empat faktor berikut [Agarwal, 1998]:

1. Temperatur udara kering
Temperatur udara kering, yang dinyatakan oleh temperatur bola kering pada alat ukur psikrometer, merupakan faktor yang paling penting. Tubuh manusia memberikan respons terutama terhadap perubahan temperatur, sehingga temperatur lingkungan harus dijaga pada zona nyaman bagi kondisi tubuh manusia.
2. Kelembaban
Kelembaban atmosfer tidak memberikan efek besar terhadap kenyamanan tubuh saat temperatur lingkungan berada pada zona nyaman, kecuali jika kelembaban terlalu tinggi atau terlalu rendah. Dari semua metoda pengukuran kelembaban, kelembaban relatif (RH) adalah yang paling sesuai untuk menyatakan kondisi kenyamanan, karena RH menyatakan kemungkinan terjadinya evaporasi.
3. Laju aliran udara
Laju aliran udara dapat memberikan efek termal yang berbeda pada temperatur yang berbeda melalui dua cara berikut:
 - a. Meningkatkan rugi-rugi panas melalui konveksi selama temperatur udara yang bergerak lebih rendah daripada temperatur kulit. Jika kondisi ini tidak terpenuhi, udara yang bergerak justru menghangatkan kulit.
 - b. Mempercepat evaporasi sehingga memberikan pendinginan fisiologis.
4. Radiasi termal
Setelah temperatur udara kering, radiasi memberikan efek terbesar terhadap kenyamanan termal. Radiasi yang jatuh pada permukaan tubuh akan mengaktifkan sensor yang juga diaktifkan oleh kehangatan udara. Jika radiasi jatuh pada permukaan yang menutupi permukaan tubuh, misalnya pakaian, panas radiasi akan diubah menjadi gelombang elektromagnetik panjang yang kemudian dikonduksikan melalui permukaan tersebut ke permukaan tubuh.

Faktor individu terdiri dari dua faktor berikut [Agarwal, 1998]:

1. Aktivitas
Secara umum, tubuh memproduksi lebih banyak panas saat beraktivitas dibanding saat beristirahat. Tubuh manusia senantiasa menghasilkan panas yang besarnya tergantung pada jenis aktivitas yang dilakukannya. Metabolisme adalah istilah yang digunakan untuk menjelaskan proses biologis pada tubuh yang menghasilkan panas.

2. Pakaian

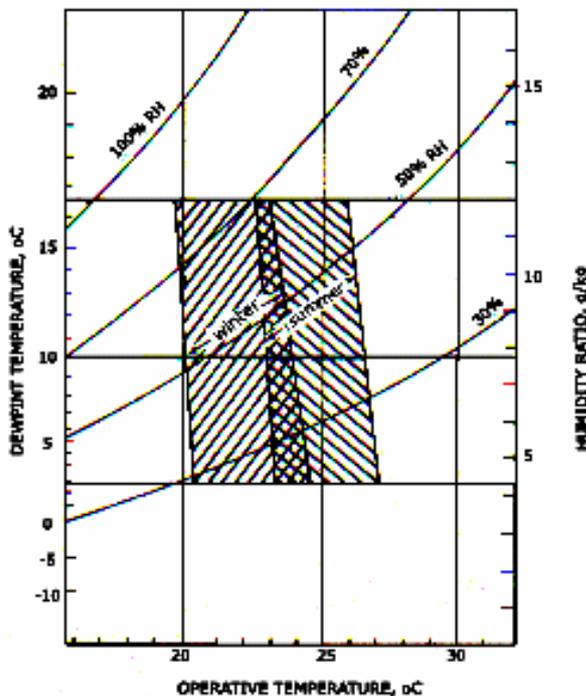
Setiap orang dapat mengatur perpindahan panas yang terjadi antara tubuhnya dengan lingkungan melalui pemilihan jenis pakaian yang dikenakannya. Hal ini disebabkan oleh variasi nilai koefisien transmisi panas yang dimiliki setiap jenis pakaian.

Salah satu hal yang patut menjadi perhatian adalah bahwa tubuh manusia tidak kehilangan panasnya secara merata. Hingga 50% dari panas tubuh hilang dari kepala, yang luas permukaannya hanya kira-kira 9% dari seluruh permukaan tubuh [WorldWeb Travel Guide, 2003].

3. ZONA NYAMAN PADA DIAGRAM PSIKROMETRI

Diagram psikrometri adalah diagram yang secara grafis memberi informasi tentang sifat-sifat termodinamika udara lembab, yaitu udara yang mengandung uap air.

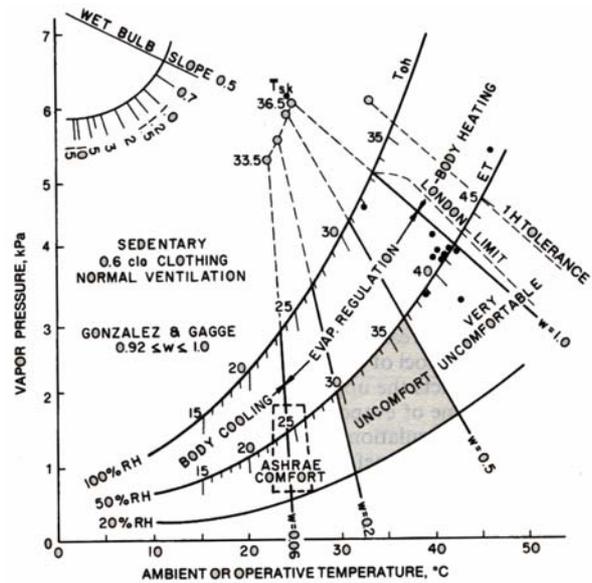
Zona nyaman bagi manusia dapat dinyatakan melalui diagram psikrometrik pada Gambar 1 di bawah ini:



Gambar 1. Zona nyaman pada diagram psikrometrik [ASHRAE, 1985].

Untuk Indonesia yang beriklim tropis, kondisi nyaman dapat didekati dengan kondisi nyaman pada *summer* (musim panas), yaitu pada rentang temperatur 23 hingga 27°C dan perbandingan kelembaban antara 4,2 hingga 12 g/kg..

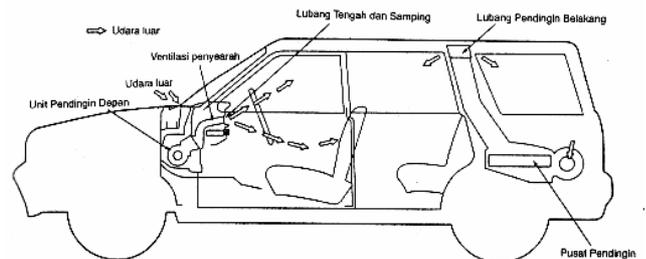
Sedangkan pada Gambar 2 berikut diperlihatkan tingkatan kenyamanan dan toleransi terhadap panas bagi orang yang melakukan aktivitas ringan.



Gambar 2 Tingkat kenyamanan dan toleransi terhadap panas pada diagram psikrometrik [ASHRAE, 1985].

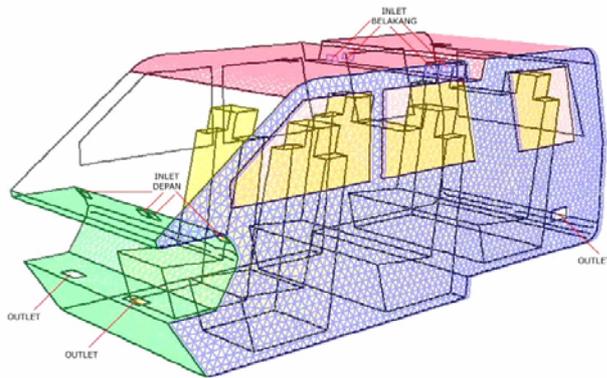
4. MODEL KENDARAAN MINIBUS YANG DIGUNAKAN DALAM PENELITIAN

Penelitian dilakukan menggunakan kendaraan minibus Panther LS 2.5 yang memiliki dua unit pendingin, yaitu depan dan belakang. Saluran masuk AC untuk unit pendingin depan terletak pada *dashboard*, sedangkan untuk unit pendingin belakang terletak pada *air duct* yang terpasang pada langit-langit kabin di antara kursi tengah dan kursi belakang. Gambar 3 memperlihatkan kedua unit pendingin pada kabin. Saluran keluar (*outlet*) tidak diperlihatkan pada Gambar 3, akan tetapi diperlihatkan pada Gambar 4 dan 5.

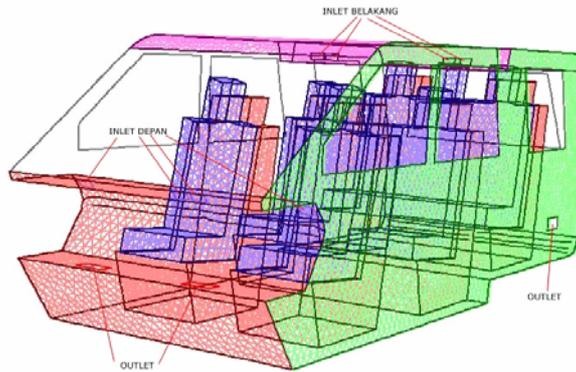


Gambar 3. Dua unit pendingin pada kabin Panther LS 2.5 [Isuzu, 2001].

Dari objek penelitian tersebut dibuat dua model tiga dimensi. Penggenerasian mesh pada kedua model dilakukan dengan *volume mesh* dengan besar interval 50 mm, menggunakan bentuk elemen Tet-Hybrid tipe T Grid. Jumlah sel pada model tanpa penumpang adalah sebanyak 170526 sel dan pada model dengan 7 orang penumpang adalah sebanyak 135124 sel. Gambar 4 dan 5 memperlihatkan kedua model tiga dimensi yang dipergunakan dalam penelitian ini.



Gambar 4. Model kabin tanpa penumpang.



Gambar 5. Model kabin dengan 7 orang penumpang.

Sistem pengkondisi udara Panther LS 2.5 memiliki tiga variasi laju aliran massa masuk seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Input Data untuk Kondisi Batas *Mass Flow Inlet* pada Laju Aliran Massa Masuk Rendah, Sedang, dan Tinggi

T_{in} [°C]	=	20
x_{H_2O} [$\frac{kg \text{ uap}}{kg \text{ udara lembab}}$]	=	0,01089
\dot{m} [$\frac{kg}{s}$]	rendah	= 0,0192
	sedang	= 0,0264
	tinggi	= 0,0336

5. PERHITUNGAN BEBAN PENDINGINAN

Perhitungan beban pendinginan dilakukan untuk mengetahui besarnya energi kalor di dalam ruangan yang harus dikeluarkan oleh mesin pendingin untuk mendapatkan kondisi ruangan yang diinginkan. Dalam penelitian ini beban pendinginan berasal dari unsur-unsur berikut:

1. Radiasi sinar matahari, yang diperhitungkan melalui beban pendinginan yang berasal dari atap, dinding, dan kaca jendela mobil.
2. Temperatur udara luar yang lebih tinggi daripada temperatur ruangan yang diinginkan. Temperatur ini diperhitungkan melalui beban pendinginan yang berasal dari atap, dinding, lantai, dan kaca jendela mobil.

3. Penumpang mobil. Beban pendinginan yang berasal dari orang sebagai penumpang mobil terdiri atas:
 - a. Beban sensibel, yaitu beban pendinginan yang berasal dari aktivitas manusia.
 - b. Beban laten, yaitu beban pendinginan yang berasal dari metabolisme tubuh manusia.
4. Lampu kabin mobil.

Beban pendinginan dari ventilasi tidak disertakan karena perhitungan dilakukan saat AC mobil bekerja dalam fungsi resirkulasi, sehingga dianggap tidak ada udara luar yang masuk ke dalam kabin. Beban pendinginan dari mesin mobil diabaikan karena adanya lapisan isolator yang mencegah masuknya panas dari mesin mobil ke dalam kabin. Beban pendinginan akibat gesekan dengan udara luar diabaikan karena saat penelitian dilakukan mobil dalam keadaan diam.

Pada tahap verifikasi, dilakukan eksperimen dengan menggunakan kendaraan minibus yang sesungguhnya, yaitu dengan mengukur temperatur kabin pada 3 titik yang kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil perhitungan temperatur pada simulasi. Sedangkan simulasi dilakukan dengan data beban pendinginan yang diperoleh melalui perhitungan yang dilakukan dengan asumsi-asumsi yang mendekati keadaan sesungguhnya saat eksperimen dilakukan. Hasil perhitungan tersebut diperlihatkan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Beban Pendinginan pada Tahap Verifikasi

Struktur	Q [kJ/hr]
Atap	4,214
Lantai	3,670
Dinding samping (kiri/kanan)	4,214
Dinding belakang	4,214
Kaca depan	15,933
Kaca belakang	15,933
Kaca samping (kiri/kanan) depan	15,933
Kaca samping (kiri/kanan) tengah	15,933
Kaca samping (kiri/kanan) belakang	15,933
Lampu kabin (2 buah)	97,912

Perhitungan beban pendinginan maksimum dilakukan dengan menggunakan data temperatur kota Jakarta selama tahun 2002 yang diperoleh dari BMG. Dibandingkan dengan data ASHRAE, data ini dinilai lebih baik karena sudah mengikutsertakan kenaikan temperatur akibat semakin banyaknya kendaraan di Jakarta. Besar radiasi sinar matahari bervariasi berdasarkan letak dan orientasi arah mobil, sehingga perhitungan beban maksimum dilakukan untuk setiap jam antara jam 5.00 hingga 24.00 WIB pada delapan orientasi berdasarkan arah mata angin.

Dari perhitungan, diketahui bahwa beban pendinginan maksimum adalah sebesar 5080,98 kJ/hr, terjadi pada jam 14.00 WIB di bulan Juni, dengan posisi kendaraan menghadap Timur.

Tabel 3 memperlihatkan beban pendinginan maksimum dari setiap bagian yang diperhitungkan.

Tabel 3. Beban Pendinginan Maksimum dari Setiap Bagian Kendaraan

Bagian	Q [kJ/hr]
Atap	47,096
Lantai	33,352
Dinding samping kanan	41,620
Dinding samping kiri	768,081
Dinding belakang	34,634
Kaca depan	277,653
Kaca belakang	157,193
Kaca samping kanan depan	41,732
Kaca samping kanan tengah	54,252
Kaca samping kanan belakang	33,707
Kaca samping kiri depan	205,121
Kaca samping kiri tengah	266,657
Kaca samping kiri belakang	165,675
Penumpang	2954,210

Untuk mengetahui efek penggunaan kaca film yang memiliki nilai koefisien transmisi panas jauh lebih kecil daripada kaca biasa, dilakukan perhitungan beban pendinginan maksimum dari unsur kaca dengan menggunakan kaca film. Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4 di bawah ini:

Tabel 4. Beban Pendinginan Maksimum dari Kaca Film

Bagian	Q [kJ/hr]
Kaca depan	193,044
Kaca belakang	117,827
Kaca samping kanan depan	16,890
Kaca samping kanan tengah	21,956
Kaca samping kanan belakang	13,642
Kaca samping kiri depan	180,278
Kaca samping kiri tengah	234,362
Kaca samping kiri belakang	145,609

6. VERIFIKASI DATA HASIL EKSPERIMEN DENGAN SIMULASI

Eksperimen dilakukan dengan mengukur temperatur pada 3 posisi pada bidang yang berjarak 25 cm dari langit-langit kabin. Keadaan lingkungan saat dilakukan eksperimen dijelaskan pada Tabel 5 berikut ini.

Tabel 5. Data Keadaan Lingkungan Saat Dilakukan Eksperimen untuk Verifikasi Data

Objek pengukuran	: Kabin Panther tipe LS 2.5
Waktu	: 18.30-20.00
Temperatur sekeliling	: 26°C
Temperatur inlet	: 20°C
Laju aliran massa	: 0,0192 kg/s (rendah)
Unit pendingin	: depan dan belakang

Kontur temperatur hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 6.

Terdapat selisih nilai temperatur hasil eksperimen dan simulasi pada setiap posisi. Untuk mengetahui secara kuantitatif perbedaan tersebut, dilakukan perhitungan perbedaan yang hasilnya ditampilkan pada Tabel 6 berikut. Ditinjau dari kecermatan alat ukur yang digunakan serta tujuan dari penelitian ini, maka perbedaan yang sama dengan atau lebih kecil dari 10% ini dinilai tidak signifikan.

Tabel 6. Kesalahan Pengukuran Temperatur

Posisi	T eksp. [°C]	T simulasi [°C]	Perbedaan [%]
1	23	20,7	10,00
2	23	20,8	9,56
3	23	21,7	5,65

7. SIMULASI DENGAN BEBAN PENDINGINAN MAKSIMUM

Pendingin udara mobil Panther LS memiliki tiga tingkatan laju aliran massa udara masuk ke kabin. Simulasi dilakukan secara transien pada beban pendinginan maksimum dengan memvariasikan laju aliran massa masuk. Dengan melakukan simulasi transien, efek pendinginan udara di dalam kabin dapat dilihat dengan mengamati kontur temperatur pada bidang yang kira-kira setinggi kepala penumpang, yaitu pada bidang yang berjarak 35 cm dari langit-langit kabin, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.

Dari Gambar 7 dapat diamati bahwa semakin lama waktu pendinginan, maka luas daerah dingin, yang digambarkan dengan warna yang lebih gelap (lebih biru, bila berwarna), akan semakin luas.

Variasi laju aliran massa udara yang memasuki kabin juga akan mempengaruhi kontur temperatur kabin. Gambar 8 memperlihatkan kontur temperatur kabin pada bidang yang berjarak 35 cm dari langit-langit kabin.

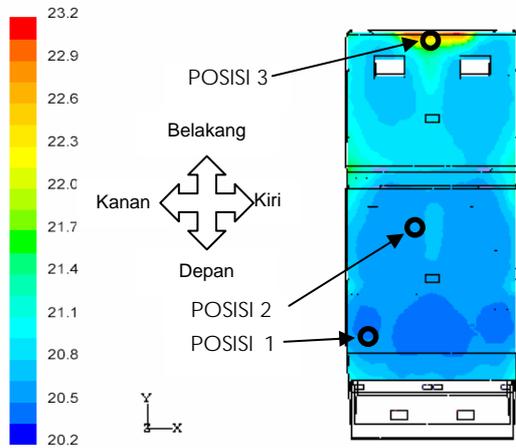
Dari Gambar 8 dapat diamati bahwa semakin besar laju aliran massa, maka daerah yang dingin akan semakin luas.

Pola kontur kecepatan udara pada kabin juga mempengaruhi kontur temperatur yang terbentuk pada kabin. Pada daerah dengan kecepatan udara tinggi, temperaturnya akan lebih rendah. Gambar 9 memperlihatkan perbandingan kontur temperatur kabin dan kontur vektor kecepatan udara pada bidang yang berjarak 35 cm dari langit-langit kabin.

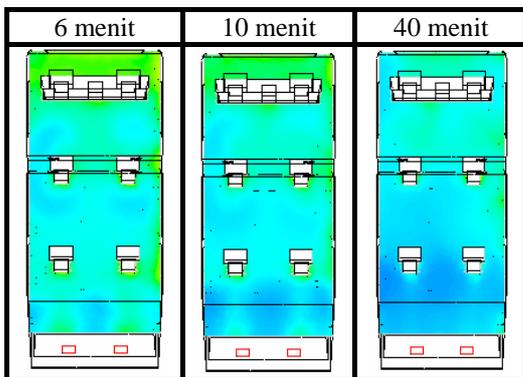
8. SIMULASI DENGAN PENGGUNAAN KACA FILM

Untuk mengetahui efek penggunaan kaca film terhadap beban pendinginan, dilakukan simulasi pada kondisi tunak dengan menggunakan beban pendinginan maksimum dari kaca film seperti tercantum pada Tabel 4. Sedangkan beban pendinginan maksimum dari

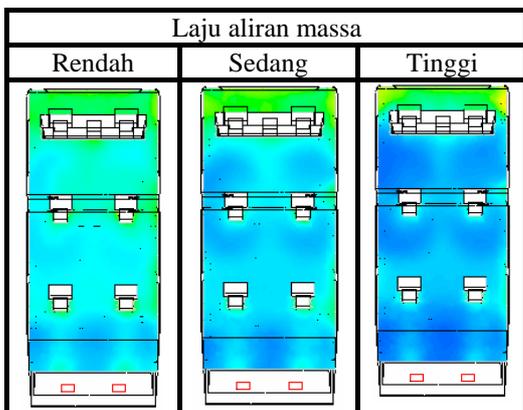
bagian-bagian selain kaca tetap sama seperti tercantum pada Tabel 3. Gambar 10 memperlihatkan perbandingan kontur temperatur antara simulasi dengan penggunaan kaca film dan simulasi tanpa kaca film pada menit ke-40. Pemilihan kontur pada menit ke-40 ini dengan pertimbangan bahwa efek pendinginan yang dialami oleh kabin sudah dianggap tunak.



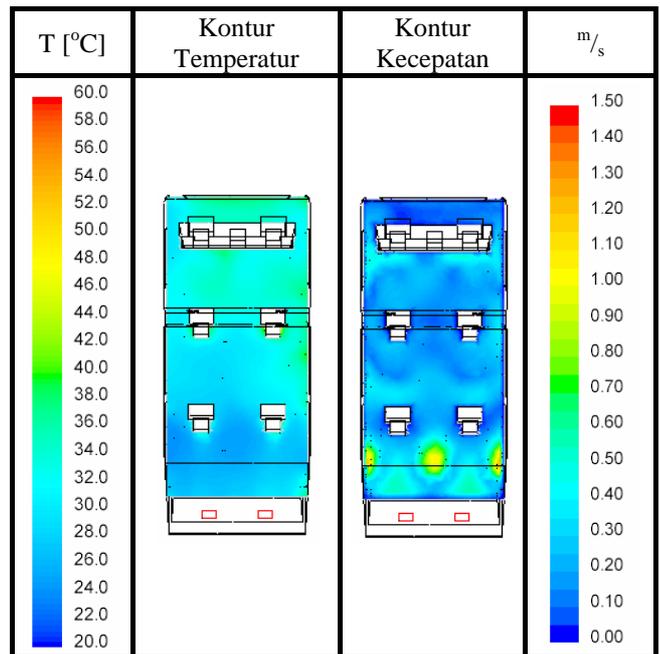
Gambar 6. Kontur temperatur hasil simulasi pada bidang yang berjarak 25 cm dari langit-langit kabin.



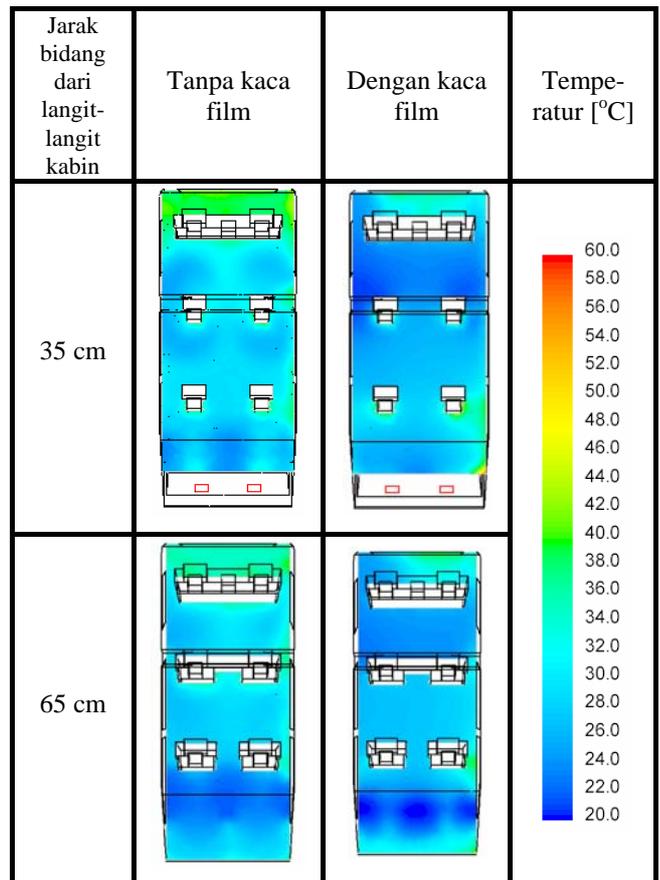
Gambar 7. Pendinginan transien kabin dengan laju aliran massa rendah.



Gambar 8. Kontur temperatur kabin untuk $t = 10$ menit.



Gambar 9. Perbandingan kontur temperatur dengan pola kontur kecepatan dengan laju aliran massa rendah pada menit ke-40.



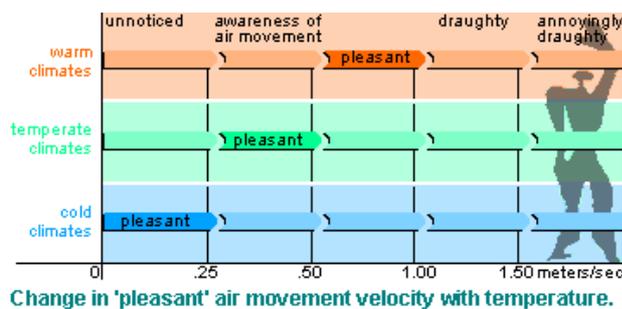
Gambar 10. Perbandingan kontur temperatur pada laju aliran massa sedang.

Dari Gambar 10 dapat diamati bahwa dengan penggunaan kaca film, daerah dingin yang terbentuk

lebih luas dibandingkan tanpa penggunaan kaca film. Daerah dingin ini digambarkan oleh warna yang lebih gelap (lebih biru, bila berwarna).

9. ANALISIS KENYAMANAN TERMAL KABIN

Kenyamanan termal ditentukan oleh berbagai faktor seperti telah dijelaskan pada Bagian 2. Dari hasil simulasi dapat dilakukan analisis kenyamanan termal dengan menggunakan parameter temperatur dan kecepatan. Untuk analisis kenyamanan termal dengan parameter kecepatan, dapat digunakan acuan berdasarkan Gambar 11 berikut:



Gambar 11. Variasi laju aliran udara yang nyaman berdasarkan temperatur [Agarwal, 1998].

Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa pada daerah di sekitar penumpang, kecepatan udara berkisar antara 0 hingga 0,4 m/s. Pada Gambar 11 diperlihatkan bahwa untuk iklim tropis (*warm climate*), ditunjukkan pada bagian atas, rentang kecepatan tersebut masih dikategorikan sebagai kecepatan yang dapat dirasakan oleh manusia. Namun mengingat bahwa akibat penggunaan pendingin udara, temperatur di dalam kabin akan lebih rendah daripada temperatur udara luar, maka kondisi kabin dapat diasumsikan sebagai *temperate climate*, ditunjukkan pada bagian tengah. Untuk *temperate climate*, rentang kecepatan 0 hingga 0,4 m/s dikategorikan sebagai nyaman, sehingga dari faktor kecepatan udara, kondisi kabin sudah nyaman.

Mengacu pada Gambar 1, untuk iklim tropis seperti Indonesia kondisi nyaman didekati dengan kondisi nyaman pada musim panas (*summer*), yaitu pada rentang temperatur 23 hingga 27°C. Untuk orang yang berpakaian normal dan melakukan kegiatan ringan, pada temperatur lingkungan 23 hingga 27°C, tidak terjadi pendinginan atau pemanasan badan, serta tidak terjadi peningkatan rugi-rugi panas akibat penguapan keringat. Pada rentang temperatur ini, manusia tidak perlu melakukan kegiatan fisiologis, seperti mengeluarkan keringat, untuk mempertahankan temperatur normal tubuh [ASHRAE, 1993]. Jadi dapat dikatakan bahwa pada temperatur di atas 27°C manusia mulai melakukan kegiatan fisiologis untuk mencegah naiknya temperatur normal tubuh.

Jika kecepatan udara dalam gedung tidak dapat diperkirakan secara pasti, maka kondisi nyaman untuk Indonesia ditentukan sebagai $T_{DB} = 27^{\circ}\text{C}$ dan $\text{RH} = 50\%$ [Pasek, 2002]. Dengan temperatur nyaman 27°C, diasumsikan bahwa pada temperatur lingkungan 28°C

manusia belum melakukan kegiatan fisiologis yang berlebihan, sehingga temperatur 28°C masih dapat dikategorikan sebagai nyaman bagi penduduk Indonesia. Dengan penjelasan tersebut dan dengan memperhatikan temperatur maksimum yang terjadi pada setiap lokasi kabin, pada Tabel 7 diperlihatkan tingkat kenyamanan kabin pada setiap laju aliran massa berdasarkan spesifikasi di paragraf sebelum ini [Pasek, 2002].

Tabel 7. Tingkat Kenyamanan Kabin

Laju Aliran Massa	Lokasi	Rentang Temperatur [°C]	Tingkat kenyamanan penumpang
Rendah	Kursi Depan	26-30	Mulai merasa tidak nyaman
	Kursi Tengah	29-32	Tidak nyaman
	Kursi Belakang	31-36	Tidak nyaman
Sedang	Kursi Depan	22-30	Mulai merasa tidak nyaman
	Kursi Tengah	27-32	Mulai merasa tidak nyaman
	Kursi Belakang	27-32	Tidak nyaman
Tinggi	Kursi Depan	21-26	Nyaman
	Kursi Tengah	24-30	Nyaman
	Kursi Belakang	24-30	Nyaman

Sebagai perbandingan, pada Tabel 8 diperlihatkan tingkat kenyamanan kabin dengan penggunaan kaca film.

Tabel 8. Tingkat Kenyamanan Kabin Dengan Penggunaan Kaca Film

Laju Aliran Massa	Lokasi	Rentang Temperatur [°C]	Tingkat kenyamanan penumpang
Rendah	Kursi Depan	26-30	Mulai merasa tidak nyaman
	Kursi Tengah	26-32	Tidak nyaman
	Kursi Belakang	26-30	Mulai merasa tidak nyaman
Sedang	Kursi Depan	23-29	Mulai merasa tidak nyaman
	Kursi Tengah	23-29	Mulai merasa tidak nyaman
	Kursi Belakang	23-28	Nyaman
Tinggi	Kursi Depan	20-26	Nyaman
	Kursi Tengah	23-27	Nyaman
	Kursi Belakang	23-27	Nyaman

10. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Beban pendinginan maksimum di kota Jakarta selama tahun 2002 adalah sebesar 5080,98 kJ/hr, terjadi pada jam 2 siang di bulan Juni, dengan posisi kendaraan menghadap Timur.
2. Temperatur kabin hasil eksperimen dengan hasil simulasi memiliki selisih maksimum yang masih dapat ditolerir yaitu sebesar 10%.
3. Sirkulasi udara yang cepat pada suatu daerah di kabin akan menghasilkan temperatur yang rendah pada daerah tersebut, karena udara dingin dari pengkondisi udara dapat lebih cepat mencapai daerah yang panas dan mendinginkannya.
4. Laju aliran massa mempengaruhi luas daerah dingin yang terjadi di dalam kabin. Daerah dingin yang paling luas terjadi pada laju aliran massa cepat, dan yang paling sempit terjadi pada laju aliran massa lambat.
5. Laju aliran massa mempengaruhi temperatur maksimum di dalam kabin, yaitu laju aliran massa tinggi menghasilkan temperatur maksimum yang paling kecil dan laju aliran massa rendah menghasilkan temperatur maksimum yang paling besar, sehingga efek pendinginan yang lebih nyata akan dicapai dengan penggunaan laju aliran massa tinggi.
6. Kondisi nyaman pada beban pendinginan maksimum dicapai dengan penggunaan pengkondisi udara pada laju pendinginan tinggi.
7. Penggunaan kaca film akan meningkatkan kondisi kenyamanan kabin dengan cara mengurangi jumlah beban pendinginan dari kaca akibat konduksi dengan udara luar.

Beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut dari makalah ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih baik, kerapatan *mesh* pada model harus diperkecil, dengan konsekuensi jumlah sel dapat mencapai jutaan. Dalam penelitian ini keterbatasan komputer dalam melakukan perhitungan dan menampilkan hasil penggenerasian *mesh* di monitor menjadi salah satu alasan penggunaan *mesh* dengan ukuran 50 mm.
2. Penelitian ini tidak dapat menggambarkan efek pendinginan pada penumpang. Hal ini disebabkan penggunaan kondisi batas *wall* pada model penumpang dengan input fluks panas, sehingga yang dapat diketahui adalah panas yang dihasilkan oleh penumpang. Untuk dapat meneliti efek pendinginan tersebut, perlu digunakan model fisiologi seperti model Stolwijk [Taeyoung, 2001].
3. Pada kondisi sebenarnya, penggunaan pengkondisi udara akan menyebabkan penurunan kelembaban udara. Namun efek tersebut tidak dapat diperlihatkan karena dalam penelitian udara yang masuk ke kabin melalui inlet selalu dianggap udara segar dan bukan udara dari kabin yang telah didinginkan sebelumnya. Diperlukan perangkat lunak lain untuk dapat menggambarkan efek dehumidifikasi, misalnya perangkat lunak AirPak [www.fluent.com, 2003].

4. Untuk meningkatkan kenyamanan kabin kendaraan minibus ini, dapat dipertimbangkan penggunaan kaca film yang berfungsi mengurangi beban pendinginan pengkondisi udara.

11. DAFTAR PUSTAKA

1. Aghil S., dan Aroussi A., "Characterisation of the Flow Field in a Passenger Car Model", *Optical Diagnostics in Engineering*, Vol 4(1), 2000, 1-15.
2. Agarwal, Peyush., Website: "Bio-Climatic Design Center", 1998. (September 2003)
3. Alexandrov, A., Kudriavtsev, V., dan Reggio, M., "Analysis of Flow Patterns and Heat Transfer in Generic Passenger Car Mini-Environment", 9th Annual Conference of the CFD Society of Canada, 27-29 May, 2001, Kitchener, Ontario.
4. "ASHRAE Handbook CD", ASHRAE Inc., 1999.
5. "ASHRAE Handbook 1985 Fundamentals Inch-Pound Edition", ASHRAE Inc., 1985.
6. "ASHRAE Handbook 1993 Fundamentals SI Edition", ASHRAE Inc., 1993.
7. Conceicao, E., "Integral Simulation of Passengers and Vehicles Thermal Response: Evaluation of Thermal Comfort and Air Quality", <http://www.roomvent.dk/papers/p661.pdf>. (September 2003).
8. "Carrier Handbook of Air Conditioning System Design", McGraw Hill, 1965.
9. "Fluent NEWS", <http://www.fluent.com>. (September 2003).
10. Heidorn, K. "Weather and Life: Cold Impacts on Human Health and Comfort", <http://www.islandnet.com/~see/weather/life/coldimpacts>., 2001. (Oktober 2003).
11. Incropera Frank P., dan DeWitt David P., "Introduction to Heat Transfer", 3rd edition, John Wiley and Sons, New York: 1996.
12. Isuzu International Service and Parts, "Buku Pedoman Perbaikan Seri TBR: Pendingin Udara Bagian 1", Isuzu Motors Limited International Service Department, Tokyo: 2001.
13. Lyons Peter, dan Arasteh Dariush, "Window Performance for Human Thermal Comfort", 2000 ASHRAE Winter Meeting, Dallas, TX, February 5-9, 2000.
14. Linjie H., "Passenger Thermal Comfort Model Helps Optimize HVAC Systems", <http://www.cfdreview.com/application/02/08/30/1422240>. (September 2003).
15. Mann M., dan Haigis M., "Numerical Investigation of the Ventilation and Thermal Comfort in a Commuter Train", http://www.arsenal.ac.at/publikationen/pdfvt/Mira_Arsenal_Paper_Abstract.pdf. (September 2003).
16. Pasek, Ari Darmawan, "Psikrometri", ITB, Bandung: 2002.
17. Taeyoung H., Linjie H., Kelly S., Huizenga C., dan Zhang H., "Virtual Thermal Comfort Engineering", SAE Paper 2001-01-0588, 2001.
18. WorldWeb Travel Guide, "Heat Loss and Anatomy", <http://rockies.discoverbc.com/Articles/BackCountryClothing/8-14.html> .(September 2003).

19. Tanabe, S. "*Numerical Prediction of Thermal Comfort in a Vehicle with Solar Reflection Glass*", <http://www.roomvent.dk/papers/p653.pdf>. (September 2003).