

Pengembangan Sistem Pengukuran Densitas Optik Asap Kebakaran

Tito Apriano dan Yulianto Sulisty Nugroho(*)

Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia
Kampus UI, Depok, 16424, Indonesia

Ph. +62 217270032, Fax. +62 21 7270033, e-mail. yulianto@eng.ui.ac.id

(*) Corresponding Author

Abstrak

Pada suatu peristiwa kebakaran, terjadinya asap yang terakumulasi di dalam ruangan, dapat membahayakan keselamatan penghuni karena asap kebakaran bersifat racun, dan berpotensi menghambat pergerakan penghuni akibat berkurangnya jarak pandang. Makalah ini mempresentasikan pengembangan sistem pengukuran densitas optik asap kebakaran yang dapat diaplikasikan untuk pengukuran *in-situ* sifat asap kebakaran, tanpa mengganggu dinamika pergerakan asap. Pengukuran densitas optik asap dilakukan dengan mempergunakan pendekatan hukum Lambert Beer, dimana perbandingan intensitas awal dan intensitas asap yang diterima oleh *receiver* dari sumber cahaya, akan dipengaruhi oleh jarak dan ketebalan asap. Sistem pengukuran yang dikembangkan ini memiliki komponen utama berupa: sinar laser komersial sebagai sumber cahaya dan sensor cahaya photodiode sebagai *receiver*. Sebuah *micro controller* diaplikasikan untuk mengontrol sistem termasuk merekam data eksperimen. Untuk mendapatkan konsistensi dan akurasi, di dalam pengukuran densitas optik, telah dilakukan kalibrasi menggunakan lima buah (5) lensa terkalibrasi dengan densitas optik yang berbeda. Sistem pengukuran densitas optik asap, kemudian diuji dalam pengukuran densitas optik asap yang berasal dari pembakaran kertas dengan variasi massa dan volume ruang uji. Secara simultan juga dilakukan pengukuran jarak pandang terhadap tanda EXIT dengan ketebalan asap yang berbeda. Penelitian ini dapat membuktikan bahwa terdapat hubungan yang positif antara densitas optik asap terukur dengan jarak pandang / visibilitas tanda EXIT.

Keywords : densitas optik, asap kebakaran, dinamika pergerakan asap, visibilitas, kalibrasi.

Pendahuluan

Pada suatu peristiwa kebakaran, terjadinya asap yang terakumulasi di dalam ruangan, dapat membahayakan keselamatan penghuni karena asap kebakaran bersifat racun, dan berpotensi menghambat pergerakan penghuni akibat berkurangnya jarak pandang. Kemampuan untuk mendeteksi asap dan api secara dini mempunyai peran yang penting dalam upaya menjaga keselamatan penghuni bangunan yang mengalami kebakaran (Nugroho, dkk, 2010).

Asap merupakan salah satu produk hasil pembakaran dari suatu material yang berbahaya bagi manusia karena terdiri dari partikel-partikel uap dan gas serta unsur-unsur yang terurai yang dilepaskan pada tahapan pembakaran material. Selain beracun, ketebalan asap juga dapat menurunkan tingkat visibilitas seseorang dan tentunya akan berpengaruh dalam kecepatan melakukan evakuasi selama kebakaran. (Mulholland, GW., 2002)

Makalah ini mempresentasikan hasil pengembangan alat pendeteksi asap tipe fotoelektrik untuk mengetahui batas aman dari *optical density* asap terhadap kemampuan penglihatan seseorang dalam melihat tanda darurat saat kebakaran terjadi sehingga evakuasi dapat berjalan dengan cepat dan lancar.

Alat pendeteksi asap berbasis fotoelektrik yang dikembangkan menggunakan perbedaan intensitas cahaya yang diterima oleh sensor cahaya untuk mendeteksi asap. Di dalam detektor asap tipe fotoelektrik, terdapat suatu sumber cahaya dan sensor cahaya yang diatur sedemikian rupa sehingga sensor cahaya dapat tepat menerima cahaya yang dihasilkan oleh sumber cahaya. Jika alat ini dilewati oleh asap maka intensitas cahaya yang terbaca oleh sensor cahaya akan berubah. Semakin tebal asap maka semakin besar pula perubahan intensitas yang diterima oleh sensor cahaya. Dengan mengetahui perbandingan antara intensitas cahaya yang diterima oleh sensor cahaya maka kita dapat mendapatkan *optical density* dari asap (Drysdale, D. 2003).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan sistem pengukuran densitas optik asap kebakaran berbasis sensor cahaya photodiode dan sinar laser sebagai sumber cahaya. Hasil rancangan kemudian dikalibrasi dengan menggunakan sejumlah kaca yang telah terkalibrasi densitas optiknya, dan dipergunakan untuk mengetahui pengaruh dari ketebalan asap terhadap jarak pandang seseorang.

Metode Percobaan dan Fasilitas yang Digunakan

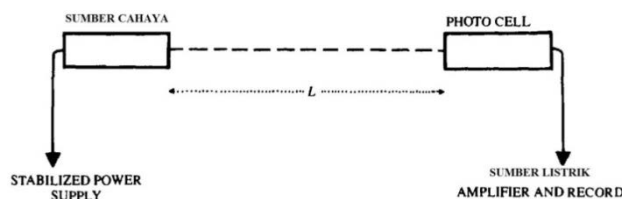
Secara garis besar metode percobaan dan fasilitas yang digunakan dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Tahapan Perancangan Sistem Alat Pengukur Densitas Optik

Pengukuran densitas optik asap dapat dilakukan dengan mempergunakan pendekatan hukum Lambert Beer,

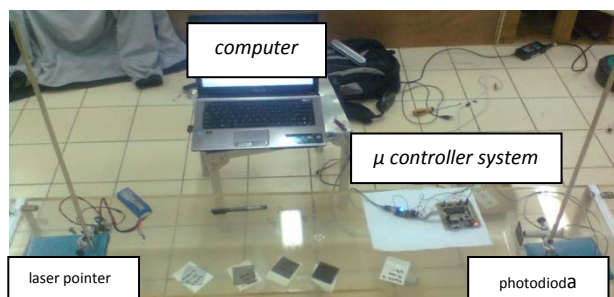
$$I = I_0 \exp(-kCL)$$

dimana perbandingan intensitas awal dan intensitas asap yang diterima oleh *receiver* dari sumber cahaya, akan dipengaruhi oleh jarak dan ketebalan asap.



Gambar 1 Gambaran cara kerja beam of light untuk mengukur optical density (Drysdale, D. 2003).

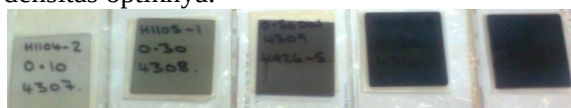
Sistem pengukuran yang dikembangkan ini memiliki komponen utama berupa: sinar laser komersial sebagai sumber cahaya dan sensor cahaya photodiode sebagai *receiver*. Sebuah *micro controller* diaplikasikan untuk mengontrol sistem termasuk merekam data eksperimen.



Gambar 2 Rangkaian Sistem Alat Pengukur Densitas Optik

2. Tahapan Kalibrasi Alat

Kalibrasi dilakukan untuk mengetahui nilai standar dari pengukuran asap. Alat dikalibrasi dengan cara mengukur nilai densitas optik dari kaca-kaca yang telah terkalibrasi nilai densitas optiknya.

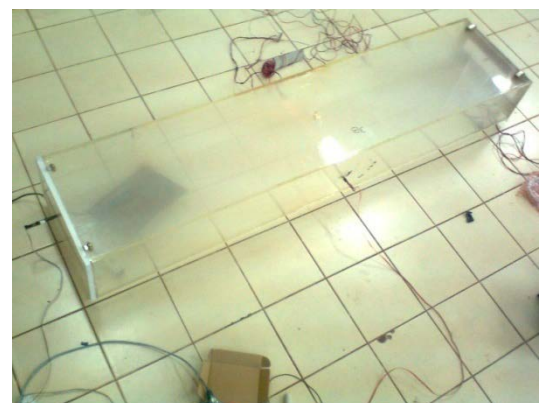


Gambar 3 Kaca dengan *optical density* berbeda-beda

Kalibrasi juga dilakukan dengan menggunakan variasi jarak (1m s.d. 5m) dan variasi tegangan input laser pointer (3V s.d. 5V).

3. Tahapan Pengujian Pengukuran Densitas Optik

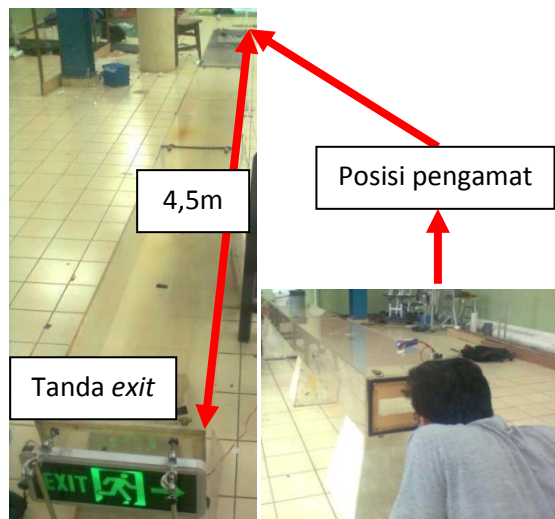
Pengujian nilai densitas optik asap dilakukan didalam ruang uji yang terbuat dari acrylic. Pengujian ini bermaksud untuk mendapatkan nilai *smoke conversion factor* dari material yang diuji. Adapun material uji yang digunakan adalah kertas A4 80gr.m⁻². Untuk mendapatkan hasil yang lebih valid, maka pengujian dilakukan dengan variasi volume ruang uji (1,5 x 0,33 x 0,18m dan 3 x 0,33 x 0,18m), massa material uji (0,5gr, 1gr, dan 1,5gr), dan jarak pengukuran densitas optik (0,33m; 1,5m; dan 3m).



Gambar 4 Proses Pengujian Pengukuran Densitas Optik pada volume ruang uji pertama

4. Tahapan Pengujian Pengaruh Densitas Optik Asap terhadap Visibilitas

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara pengaruh perubahan densitas optik terhadap penglihatan / visibilitas seseorang. Percobaan ini dilakukan dengan cara menempatkan tanda EXIT di ujung ruang uji dan pengamat berada di ujung lainnya. Jarak pengamatan adalah 4,5m dan dengan variasi densitas optik dari 0,1 sampai 2. Sistem alat pengukur densitas optik juga diletakkan di kedua ujung ruang uji.



Gambar 5 Proses pengujian pengaruh densitas optik terhadap visibilitas

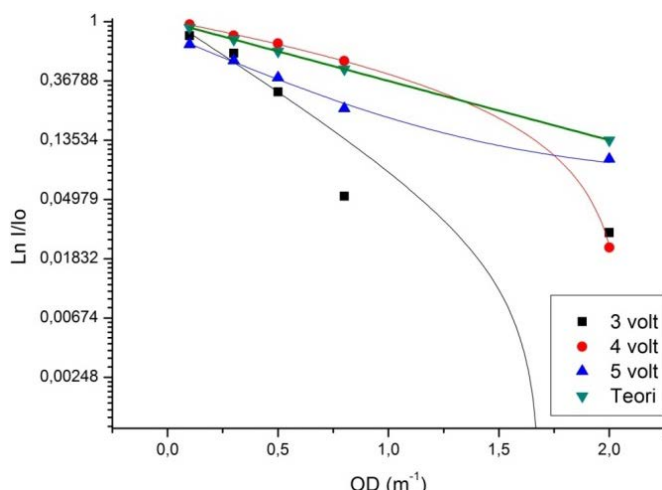
Adapun parameter pengamatan adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Parameter pengamatan tanda EXIT

Nilai	Keterangan
1	Tulisan dapat terbaca dengan jelas
2	Tulisan kurang jelas namun gambar terlihat jelas
3	Tulisan dan gambar tidak jelas namun terlihat cahaya lampu hijau
4	Tidak jelas sama sekali

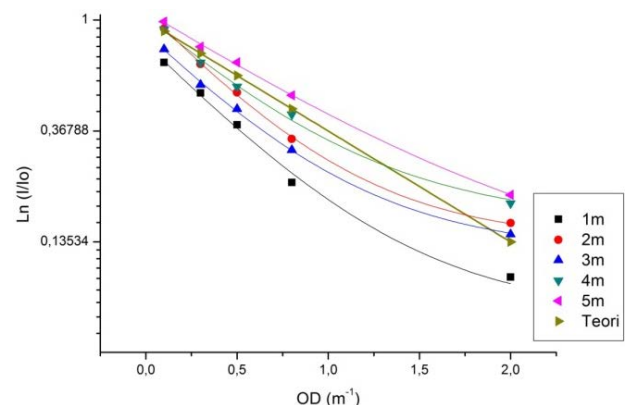
Hasil dan Pembahasan

1. Hasil dan Pembahasan Kalibrasi Alat



Gambar 6 Grafik hasil kalibrasi laser pointer untuk jarak pengukuran 1m

Dari hasil kalibrasi di atas, dapat terlihat pengaruh perubahan tegangan input pada laser pointer terhadap hasil bacaan sensor. Hasil bacaan sensor dengan tegangan input *laser pointer* 5 V terlihat memiliki grafik yang lebih stabil jika dibandingkan dengan yang lainnya. Sedangkan, dengan menggunakan tegangan input 4, hasil bacaan sensor lebih mendekati teori, namun hanya berlaku untuk *optical density* dibawah 1,5. Hasil kalibrasi juga menunjukkan bahwa bacaan sensor dengan tegangan input *laser pointer* 3V menghasilkan grafik yang relatif berbeda dengan teori. Secara umum penggunaan tegangan input sebesar 5V dapat menghasilkan bacaan yang konsisten dengan tingkat kesalahan hasil bacaan sensor yang lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan tegangan input 3V dan 4V.



Gambar 7 Grafik hasil bacaan sensor dengan variasi jarak untuk tegangan input 5V.

Hasil kalibrasi untuk jarak yang berbeda-beda juga menunjukkan bahwa dengan menggunakan tegangan input 5V, hasil bacaan sensor cahaya memiliki grafik yang stabil dan *trend error* yang relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan menggunakan tegangan input laser pointer 3V dan 4V.

2. Hasil dan Pembahasan Pengujian Pengukuran Densitas Optik

Pengukuran densitas optik (*optical density*) dengan menggunakan alat hasil rancangan bertujuan untuk menghitung nilai *smoke conversion factor* (ϵ) dari material yang dibakar. Dalam percobaan kali ini material yang digunakan adalah kertas A4 80gm⁻². Variasi yang digunakan adalah variasi massa (1,5 gr, 1gr, dan 0,5gr) dan variasi jarak sensor dengan laser pointer (3m dan 1,5m). Hubungan antara ϵ

dengan *optical density* per meter didapat dari persamaan [Mulholland, GW (2002)]:

$$OD = K_m \cdot m \cdot L$$

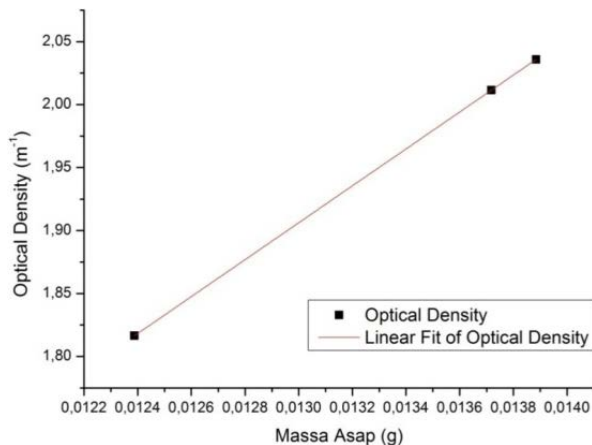
dimana K_m adalah *specific extinction coefficient* (m^2g^{-1}), m adalah besarnya konsentrasi massa asap (gm^{-3}), dan L adalah jarak antara sensor cahaya dengan sumber cahaya. Konsentrasi massa asap didapat dengan persamaan:

$$m = \frac{M_s}{V_r}$$

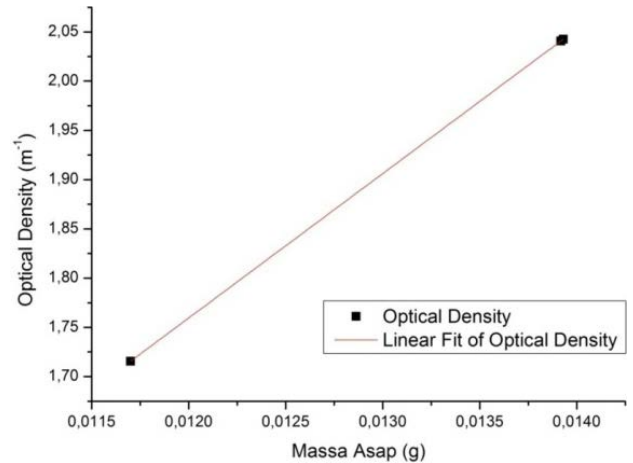
dengan M_s adalah massa asap (g) dan V_r adalah volume ruang uji (m^3). Dari kedua persamaan diatas maka dapat disimpulkan bahwa:

$$M_s = \frac{OD \cdot V_r}{K_m \cdot L}$$

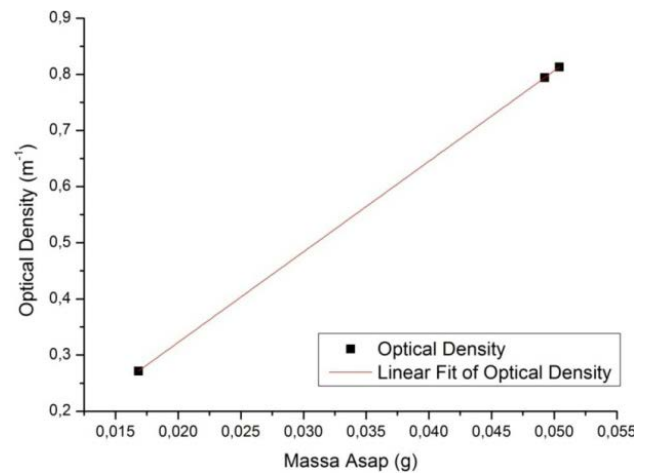
Terlihat dari persamaan diatas, untuk nilai V_r dan L yang tetap, perubahan massa asap berbanding lurus dengan perubahan *optical density* sehingga makin besar nilai *optical density* makin besar pula massa asap.



Gambar 8 Hubungan antara Massa asap dengan *optical density* per meter ($V_r = 0,089\text{m}^3$ dan $L=3\text{m}$)



Gambar 9 Hubungan antara Massa asap dengan *optical density* per meter ($V_r = 0,089\text{m}^3$ dan $L=1,5\text{m}$)



Gambar 10 Hubungan antara Massa asap dengan *optical density* per meter ($V_r = 0,178\text{m}^3$ dan $L=0,33\text{m}$)

Dengan mengetahui massa asap, M_s , maka nilai *smoke conversion factor*, ε , dapat diperoleh setelah dibandingkan dengan massa sisa hasil pembakaran, M_b .

$$\varepsilon = \frac{M_s}{M_b}$$

Nilai rata-rata ε yang didapatkan dari hasil percobaan adalah 0,0326. Nilai ini sama dengan nilai ε yang ada di Tabel 2 untuk tipe *douglas fir* yang merupakan bahan dasar pembuatan kertas.

Tabel 2 Nilai *smoke conversion factor* (Mulholland, G.W. 2002)

Type	Smoke Conversion Factor, ζ	Combustion Conditions	Fuel Area, m^2
Douglas fir	0.03–0.17	Pyrolysis	0.005
Douglas fir	< 0.01–0.025	Flaming	0.005
Hardboard	0.0004–0.001	Flaming ^a	0.0005
Fiberboard	0.005–0.01	Flaming ^a	0.0005
Polyvinylchloride	0.03–0.12	Pyrolysis	0.005
Polyvinylchloride	0.12	Flaming	0.005
Polyurethane (flexible)	0.07–0.15	Pyrolysis	0.005
Polyurethane (flexible)	< 0.01–0.035	Flaming	0.005
Polyurethane (rigid)	0.06–0.19	Pyrolysis	0.005
Polyurethane (rigid)	0.09	Flaming	0.005
Polystyrene	0.17 ($m_{CO} = 0.30$) ^b	Flaming	0.0005
Polystyrene	0.15 ($m_{CO} = 0.23$)	Flaming	0.07
Polypropylene	0.12	Pyrolysis	0.005
Polypropylene	0.016	Flaming	0.005
Polypropylene	0.08 ($m_{CO} = 0.23$)	Flaming	0.007
Polypropylene	0.10 ($m_{CO} = 0.23$)	Flaming	0.07
Polymethylmethacrylate	0.02 ($m_{CO} = 0.23$)	Flaming	0.07
Polyoxymethylene	~0	Flaming	0.007
Cellulosic insulation	0.01–0.12	Smoldering	0.02

3. Hasil dan Pembahasan Pengujian Pengaruh Densitas Optik Asap terhadap Visibilitas

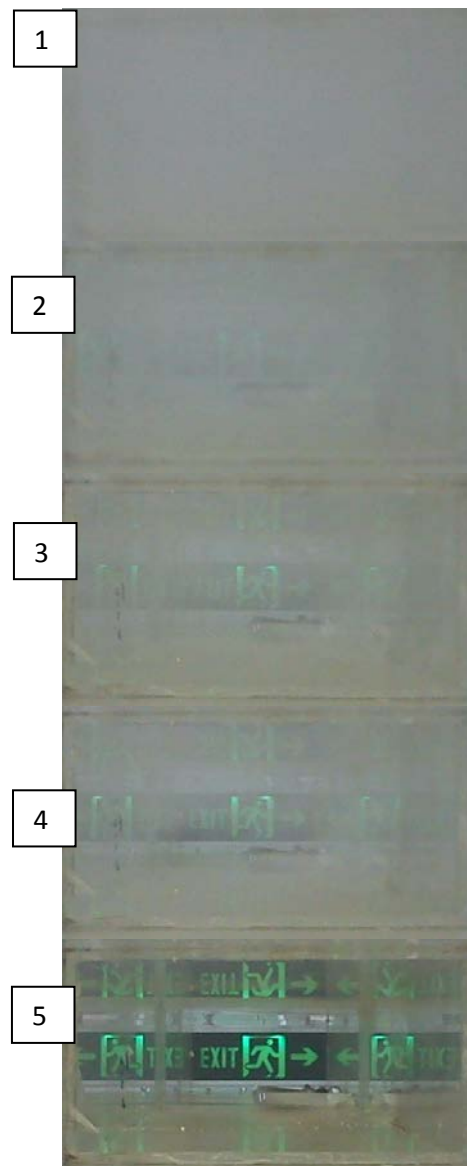
Secara garis besar hasil pengujian densitas optik asap terhadap visibilitas pengamat dapat diberikan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3 Hasil pengamatan tanda *exit* dengan *optical density* berbeda-beda

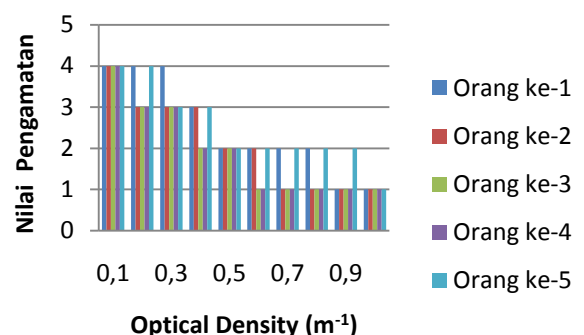
OD	Pengamat				
	A	B	C	D	E
0,1	1	1	1	1	1
0,2	1	2	2	2	1
0,3	1	2	2	2	2
0,4	2	2	3	3	2
0,5	3	3	3	3	3
0,6	3	3	4	4	3
0,7	3	4	4	4	3
0,8	3	4	4	4	3
0,9	4	4	4	4	3
1	4	4	4	4	4
>1	4	4	4	4	4

Keterangan:

1. Tidak jelas sama sekali
2. Tulisan dan gambar tidak terlihat jelas, tetapi terlihat warna lampu hijau
3. Tulisan kurang terlihat jelas tetapi gambar terlihat jelas
4. Tulisan dapat terbaca dengan jelas



Gambar 11 Parameter yang digunakan untuk mengamati pengaruh perubahan *optical density* asap (1-4) dan kondisi pengamatan tanpa asap (5)



Gambar 12 Hasil pengamatan tanda *exit* dengan nilai *optical density* berbeda-beda

Hasil percobaan menunjukkan jika pengamat sama sekali tidak bisa melihat tanda EXIT jika *optical density* bernilai ≥ 1 . Hanya satu orang saja yang mampu mengidentifikasi tanda EXIT dengan melihat warna hijau pada tanda EXIT saat *optical density* bernilai 0,9.

Pada saat *optical density* bernilai 0,5, semua pengamat tidak mampu melihat tulisan maupun gambar, namun bisa mengidentifikasi nyala lampu EXIT.

Pada saat *optical density* bernilai 0,4, tiga orang menyatakan bahwa mereka mampu melihat gambar dengan jelas tetapi belum melihat tulisan dengan jelas. Satu orang bertambah saat *optical density* mencapai nilai 0,3.

Pada saat *optical density* bernilai 0,1, semua pengamat mampu mengamati tulisan EXIT dan gambar dengan jelas.

Dari hasil percobaan diatas terlihat bahwa pengamat lebih mudah untuk mengidentifikasi gambar dibandingkan tulisan. Terlihat juga, bahwa pada *optical density* 0,1 pengamat baru dapat mengidentifikasi tanda EXIT dengan jelas.

Kesimpulan

1. Sistem pendeteksi dan pengukuran densitas optik asap dapat berfungsi dengan baik dan dengan hasil pengukuran yang konsisten dengan teori yang ada.
2. Kalibrasi hasil bacaan menggunakan kaca terkalibrasi merupakan tahapan yang penting sebelum alat pengukur ini dapat dipergunakan untuk mengukur densitas asap kebakaran.
3. Untuk kondisi dan peralatan uji yang dikembangkan pada penelitian ini, penggunaan tegangan input sebesar 5V dapat menghasilkan bacaan yang konsisten dan memiliki tingkat kesalahan yang lebih kecil.
4. Hasil pengukuran densitas optik selaras dengan hasil pengamatan tanda EXIT yang dilaporkan oleh para pengamat, dimana desain gambar lebih mudah diidentifikasi dibandingkan dengan tulisan.
5. Nilai *optical density* asap sebesar 0,1 adalah titik kritis kemampuan melihat seseorang dengan jarak 4,5 m.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat dilaksanakan berkat dukungan pendanaan riset yang diberikan oleh DRPM UI melalui skema Riset Utama UI tahun 2012 dengan peneliti utama Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, Ph.D. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada

Keluarga Besar Tim Robot UI yang telah memberikan dukungan ruangan dan fasilitas lainnya.

Nomenklatur

OD	<i>Optical Density</i> Densitas Optik per meter (m^{-1})
I	Intensitas asap
I_0	Intensitas awal tanpa asap
k	<i>specific extinction coefficient</i> ($m^2 g^{-1}$)
C	konsentrasi massa asap (mg^{-3})
L	Jarak antara sumber dan sensor cahaya (m)
M_s	massa asap (g)
M_b	massa sisa hasil pembakaran (g)
V_r	volume ruang uji (m^3)
ε	<i>smoke conversion factor</i>

Referensi

- Drysdale, D., An Introduction to Fire Dynamics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, John Wiley & Sons (2003).
- Fire Testing Technology, Smoke Density Photometric System (DIN 50055) Users Manual, West Sussex, UK (2011).
- Jin, Tadahisa. Visibility and Human Behavior in Fire Smoke, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, pp 2-42 – 2.53 (2002).
- Mulholland, GW. Smoke Production and Properties. Chapter 13, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, pp. 2-258 – 2-268 (2002).
- Nugroho, YS, Suwarno, Widyanto M R, Yanuar, Jakti, EW, and Alif, GM, Early Detection of Cables Fires Using Image Processing, Proceeding of the Interflam 2010, 247-256 (2010).
- Pandiangan, Johannes, Perancangan dan Penggunaan Photodiode Sebagai Sensor Penghinder Dinding pada Robot Forklift. Medan: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Sumatera Utara (2007).
- Setyaningsih, Agustina, Penentuan Nilai Panjang Koherensi Laser Menggunakan Interferometer Michelson. Semarang: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Diponegoro, (2006).