

PENGUJIAN CIGARETTE SMOKE FILTER BERBASIS THERMOPHOSIS DAN KARBON

Ferdiansyah N. Iskandar, Ari Widiarto, Ario Ardianto, Nandy Putra

Laboratorium Perpindahan Kalor
Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus UI Depok 16424, Indonesia
E-mail: nandyputra@eng.ui.ac.id

ABSTRAK

Asap rokok disebut juga *Environmental Tobacco Smoke* mengandung fase gas dan komponen partikulat. *Environmental Tobacco Smoke* terdiri dari *Mainstream Smoke* berupa asap yang dihembuskan oleh perokok dan *Sidestream Smoke* berupa asap yang dihasilkan dari ujung rokok yang terbakar. *Sidestream Smoke* adalah komponen utama *Environmental Tobacco Smoke* dengan kandungan hampir seluruh dari total fase gas dan lebih dari setengah dari total komponen partikulat. Oleh sebab itu perlindungan terhadap perokok pasif dapat dilakukan dengan menciptakan suatu alat penyaring yang dapat mengurangi jumlah partikel yang dihasilkan oleh *Sidestream Smoke*. *Cigarette Smoke Filter* merupakan rangkaian alat penyaring yang terdiri dari filter udara konvensional, karbon aktif, dan *thermal precipitator*. Pengujian yang dilakukan adalah guna mengetahui efisiensi penyaringan yang dihasilkan oleh *Cigarette Smoke Filter*. Pengujian dilakukan menggunakan variasi rangkaian filter, karbon aktif, dan *thermal precipitator*. Analisa hasil pengujian yang dilakukan adalah untuk mengetahui rangkaian filter dan karbon aktif yang memberikan efisiensi penyaringan terbaik serta perbedaan temperatur pada *thermal precipitator* yang menghasilkan gaya *thermophoresis* optimal. Dari hasil pengujian, rangkaian filter udara konvensional, karbon aktif homogen, dan *thermal precipitator* pada perbedaan temperatur 35°C memberikan efisiensi penyaringan terbaik sebesar 81,81%, untuk karbon aktif homogen memberikan efisiensi penyaringan paling baik sebesar 40% dibandingkan dengan karbon aktif tanpa pencetakan dan karbon aktif heterogen (berlapis) yang masing-masing memberikan efisiensi penyaringan sebesar 20%. Gaya *thermophoresis* memberikan pengaruh dominan terhadap partikel aerosol dalam proses penyaringan dimana hasil terbaik terjadi pada perbedaan temperatur 25°C. Hasil pengujian *Cigarette Smoke Filter* yang menggunakan sistem karbon aktif dan *thermophoresis* telah mampu mengurangi jumlah partikel yang dihasilkan oleh *Sidestream Smoke* dengan cukup signifikan sehingga upaya untuk melindungi perokok pasif dapat terwujud.

Kata Kunci : *Smoke, Cigarette Smoke Filter, Thermophoresis, Efisiensi Penyaringan*

1. Pendahuluan

Rokok merupakan materi yang bila terbakar akan mengeluarkan zat-zat yang membahayakan bagi kesehatan dan mencemari lingkungan. Rokok kurang lebih mengandung 4000 zat kimia dengan 200 diantaranya merupakan zat beracun dan 60 zat yang dapat memicu terjadinya kanker. Zat-zat kimia berbahaya yang terkandung dalam rokok diantaranya tar, karbon monoksida, nikotin, ammonia, formaldehide, aceton, DDT dan zat-zat lain.

Rokok tidak hanya membahayakan bagi penghisapnya saja (perokok aktif) akan tetapi jauh berdampak buruk bagi orang-orang yang berada disekitar (perokok pasif). Bahaya yang ditimbulkan oleh perokok aktif terhadap perokok pasif berupa asap dan bau yang

sangat mengganggu. Asap rokok disebut juga *Environmental Tobacco Smoke* (ETS) terdiri dari *Mainstream Smoke* yaitu asap yang dihembuskan dari mulut perokok, dan *Sidestream Smoke* yaitu asap yang dihasilkan dari ujung rokok yang membara. *Sidestream Smoke* dapat menyebabkan penyakit pneumonia dan bronchitis pada anak-anak berusia 1-1,5 tahun yang turut menghisap asap rokok yang dihembuskan oleh orang tua mereka (sumber EPA - *Environmental Protection Agency*) [1]. Selain pada anak-anak *Sidestream Smoke* juga membahayakan bagi orang dewasa yang menghirupnya khususnya terjadi pada wanita. Hal ini terlihat dari 24 dari 30 wanita beresiko terkena kanker yang disebabkan oleh *Sidestream Smoke* yang dihembuskan dari rokok yang dihisap oleh sang suami (sumber EPA - *Environmental*



Protection Agency). World Health Organization (WHO) memperkirakan 0,5 juta kematian terjadi pada perokok pasif karena berbagai penyakit yang terkait dengan rokok. Di Amerika Serikat (AS), khusus pada kelompok orang dewasa, setiap tahun sebanyak 3.400 kematian perokok pasif karena kanker paru, sekitar 3.400 sampai 70.000 kematian karena penyakit jantung [2].

Upaya pemerintah khususnya pemerintah provinsi DKI Jakarta untuk melindungi perokok pasif tercermin dalam Surat Keputusan Gubernur No.11 Tahun 2004 mengenai Pengendalian Merokok Di Tempat Kerja Di Lingkungan Pemerintah Provinsi DKI Jakarta. Peraturan tersebut diikuti oleh peraturan turunan lainnya untuk menjamin terciptanya lingkungan yang bersih dan terlindunginya perokok pasif melalui Peraturan Gubernur Provinsi DKI Jakarta No.75 Tahun 2005 mengenai Kawasan Larangan Merokok dimana terdapat tujuh kawasan yang dinyatakan sebagai kawasan dilarang merokok adalah tempat umum seperti terminal, stasiun dan pusat perbelanjaan, tempat kerja seperti gedung perkantoran, pabrik dan ruang rapat, tempat belajar, tempat pelayanan kesehatan, tempat kegiatan anak dan sejenis, serta tempat ibadah. [3]

Berdasarkan Peraturan Gubernur Provinsi DKI Jakarta No.75 Tahun 2005 pasal 18 butir b dan c yang mengharuskan tempat khusus merokok dilengkapi alat penghisap udara atau memiliki sistem sirkulasi dan dilengkapi asbak atau tempat pembuangan puntung rokok, maka penulis mencoba untuk menciptakan alat yang mengintergasikan kebutuhan tersebut yakni *Cigarette Smoke Filter*. Dengan kehadiran *Cigarette Smoke Filter* diharapkan komponen kimia, partikel dan bau yang dihasilkan dari asap rokok dapat diminimalisir sehingga asap keluaran yang dihasilkan tidak membahayakan bagi perokok pasif

2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah untuk menguji efisiensi *Cigarette Smoke Filter*. Pengujian dilakukan untuk membandingkan susunan rangkaian filter dan penggunaan kombinasi filter karbon aktif baik yang dilengkapi dengan *thermal precipitator* maupun yang tidak, dengan merancang, membuat, dan menguji alat penyaring *Sidestream Smoke* yang digunakan dalam suatu ruangan tertentu, sehingga akan diketahui susunan rangkaian filter yang memiliki efisiensi penyaringan terbaik untuk melindungi perokok pasif, memenuhi nilai estetika dan ergonomis.

3. Asap Rokok

Merokok adalah kegiatan membakar zat, umumnya tembakau, untuk dihisap asapnya. Rokok yang dihisap dapat berupa rokok produksi industri maupun hanya daun tembakau kering yang digulung dengan kertas.

Asap rokok yang disebut juga *Environmental Tobacco Smoke* (ETS) terdiri dari *Mainstream Smoke* yaitu asap yang dihembuskan mulut perokok, dan *Sidestream Smoke* yaitu asap yang dihasilkan dari ujung rokok yang membara. *Environmental Tobacco Smoke* mengandung fase gas dan komponen partikulat. *Sidestream Smoke* adalah komponen utama *Environmental Tobacco Smoke* dengan mengandung hampir seluruh dari total fase gas dan lebih dari setengah dari total komponen partikulat.



Gambar 1. Komponen rokok dan asap rokok
Sumber: <http://www.tanyadokteranda.com>

Sidestream Smoke lebih cepat terlarut di udara, sehingga ukuran partikelnya lebih kecil dibanding *Mainstream Smoke* sehingga dapat ditemui perubahan fase zat untuk beberapa komponen. Nikotin contohnya, merupakan partikel pada *mainstream smoke*, namun ditemui pada *Sidestream Smoke* lebih banyak dalam fase gas. Perubahan ini disebabkan kelarutan *Sidestream Smoke* yang cepat di udara. Ukuran partikel pada *sidestream smoke* umumnya berada pada kisaran 0.01-1.0 μm , sedangkan *Mainstream Smoke* memiliki ukuran partikel antara 0.1-1.0 μm .

ETS diketahui mengandung campuran lebih dari 4000 jenis komponen zat kimia, dan lebih dari 60 jenis diketahui bersifat karsinogen (zat pemicu kanker) bagi manusia.

Penelitian menunjukkan sebagian besar *Sidestream Smoke* merupakan aerosol yaitu partikel solid dalam suspensi gas, disamping gas hasil pembakaran yaitu gas CO dan CO₂. Jumlah partikel dalam aerosol tercatat sebanyak $6,34 \cdot 10^5$ per cm³ atau mencapai $9,3 \cdot 10^{12}$ partikel per batang rokok. Namun dari jumlah tersebut, partikel yang dapat terhisap pernafasan manusia atau RSP (*Respirable Suspended Particulate Matter*) tercatat sebanyak 16,9 mg per batang. Konsentrasi RSP dianggap sebagai indikasi turunnya kualitas udara dalam ruangan, misalnya RSP sebesar 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dapat mengakibatkan mata perih dan gangguan pernafasan pada orang sekitar asap rokok. [4]

Sebatang rokok yang terbakar hingga habis rata-rata



menghasilkan aerosol dengan *flow rate* sebesar 370 cm^3 per menit. Densitas aerosol *Sidestream Smoke* lebih padat 20% dari densitas udara normal, yaitu sekitar $1,43 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$. [5]

Tabel 1. Sifat-sifat *Sidestream Smoke* ETS

No.	Nama	Nilai
1	Diameter Partikel	0.01-1 μm
2	Densitas Partikel	1,2 g/cm^3
3	Jumlah Partikel	$6,34 \cdot 10^5 / \text{cm}^3$
4	Flow Rate Aerosol	370 cc/min
5	Densitas Aerosol	$1,43 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

4. Karbon Aktif

Karbon aktif sudah digunakan untuk membersihkan air sejak 2000 tahun lalu, namun baru diproduksi secara komersil pada awal abad 20. Pada awalnya karbon aktif hanya digunakan untuk membersihkan warna gula, namun penggunaannya ditingkatkan untuk menghilangkan warna dan bau pada air. Karbon aktif granular digunakan di masker gas Perang Dunia I, dan penggunaan selanjutnya pada pengolahan air, pembersihan pelarut dan pembersihan udara.

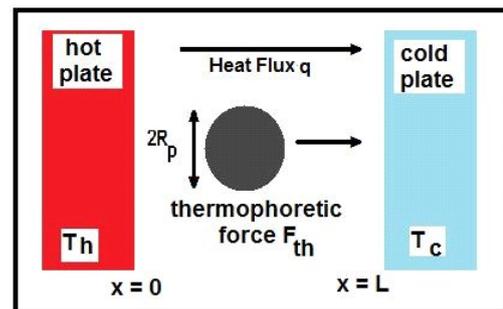
Permukaan karbon aktif bersifat non-polar, yang menyebabkan afinitas untuk adsorbat non-polar, yaitu bahan organik. Karbon aktif sangat efektif untuk pembersihan air atau udara, juga penyaringan logam.

Pori karbon aktif dapat digolongkan menjadi tiga ukuran umum, yaitu Micro-pores (diameter kurang dari 2 nm), Meso-pores (diameter antara 2 – 25 nm), dan Macro-pores (diameter diatas 25 nm). Karbon batok kelapa umumnya terdiri dari micro-pores dan meso-pores dan karena distribusi pori tersebut, karbon batok kelapa banyak digunakan di pembersihan fase gas dan pemurnian air. [6]

Energi potensial penyerapan sangat bergantung pada ukuran pori-pori, semakin besar ukuran pori-pori maka energi potensial yang dihasilkan pun semakin kecil sedangkan ukuran pori-pori makin kecil menghasilkan energi potensial yang besar. Lokasi penyerapan dengan energi potensial besar terisi terlebih dahulu oleh molekul *adsorbate* dan selanjutnya molekul bergerak menuju lokasi dengan energi potensial yang lebih rendah hingga tidak lagi terdapat tekanan relatif (p/p^0). Proses penyerapan berlangsung secara kontinu tanpa kehadiran gangguan dan hal ini terlihat pada kurva penyerapan isotherm.

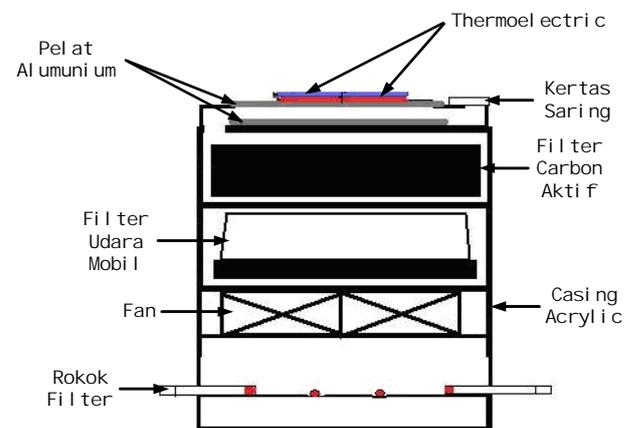
5. Thermophoresis

Gaya thermophoresis adalah fenomena pergerakan partikel dalam aliran fluida yang diakibatkan oleh perbedaan temperatur dalam sistem aliran fluida tersebut. Fenomena ini disebabkan oleh transfer momentum dari lingkungan sekitar ke partikel melalui media panas. Perbedaan momentum pada partikel terbentuk akibat perbedaan temperatur. Partikel akan bergerak dari daerah dengan temperatur tinggi menuju daerah temperatur lebih rendah. Lingkungan sekitar partikel diasumsikan dalam kondisi diam tanpa aliran udara dan tidak ada gaya-gaya lain yang bekerja pada partikel.



Gambar 2. Gaya thermophoresis pada dua pelat

Gaya thermophoresis digunakan dalam berbagai bidang seperti pembersihan gas, perlindungan permukaan dari deposisi partikel, dan *aerosol thermal precipitator*. Konfigurasi peletakan filter karbon aktif dan sistem thermophoresis ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Design alat yang telah dilengkapi dengan Carbon Akif dan Thermophoresis

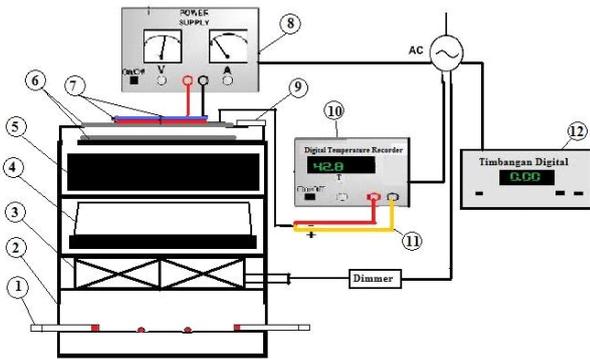
6. Skema Pengujian Cigarette Smoke Filter

Pengujian yang dilakukan pada *Cigarette Smoke Filter* adalah untuk mengetahui seberapa besar kinerja penyaringan yang dihasilkan dengan membandingkan massa partikel yang tersaring pada kertas saring menggunakan rangkaian filter dan kombinasi variasi filter



karbon dengan dilengkapi dan tanpa rangkaian *thermal precipitator*.

- 1. Rokok filter
- 2. Casing akrilik
- 3. Fan
- 4. Filter Udara Mobil
- 5. Filter Karbon Aktif
- 6. Pelat aluminium
- 7. Thermoelectric
- 8. Power Supply Voltage Regulator DC
- 9. Kertas saring
- 10. Digital Temperature Recorder
- 11. Termokopel Tipe K
- 12. Timbangan Digital



Gambar 4. Skema pengujian

Kertas saring yang digunakan adalah kertas saring kimia dengan pori-pori sebesar 0,1 μm . Kertas saring dengan dimensi yang disesuaikan akan diletakkan pada lubang *outlet* alat untuk menangkap partikel asap rokok selama jangka waktu tertentu. Partikel yang tertangkap adalah partikel asap rokok yang tidak tersaring oleh alat. Perbandingan massa sebelum dan sesudah pengujian akan menentukan kinerja penyaringan alat.

Sebagai sumber daya *thermal precipitator*, digunakan *power supply* DC dengan regulator tegangan sehingga temperatur yang dihasilkan dapat dikontrol sesuai tegangan yang diberikan.

Termokopel yang digunakan dalam pengujian ini adalah termokopel tipe K, dengan material pembentuknya adalah *kromel* (Nikel-Kromium) dan *alumel* (Nikel-Aluminium) dan untuk pembacaannya ke dalam satuan temperatur digunakan sebuah *digital temperature recorder* YEW tipe 3874.

Hot wire anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara yang dihasilkan *fan*. Kawat tipis yang berfungsi sebagai sensor harus terletak tegak lurus terhadap arah aliran udara.

Pengambilan data ditujukan untuk mengetahui kinerja penyaringan *Cigarette Smoke Filter*. Pengambilan data pengujian diantaranya dilakukan dengan menguji variasi rangkaian filter, kombinasi filter karbon aktif dan penggunaan *thermal precipitator* pada *Cigarette Smoke Filter*. Pengambilan data berupa penambahan massa rata-rata dan massa total pada kertas saring yang digunakan.

Berdasarkan data massa partikel yang tersaring pada kertas saring maka dapat diketahui seberapa besar kinerja yang dihasilkan dari :

1. Rangkaian filter dengan hanya menggunakan filter udara mobil, rangkaian filter dengan hanya menggunakan rangkaian *thermal precipitator*
2. Rangkaian filter menggunakan filter udara mobil dan karbon aktif homogen
3. Rangkaian filter menggunakan filter udara mobil dan karbon aktif berlapis
4. Rangkaian filter menggunakan filter udara mobil dan karbon aktif tanpa pencetakan
5. Rangkaian filter menggunakan filter udara mobil, rangkaian *thermal precipitator* serta karbon aktif yang memiliki fungsi penyaringan terbaik

7. Hasil dan Analisa

Perhitungan didasarkan pada pengujian selama 50 menit pada *Cigarette Smoke Filter* tanpa penambahan filter baik filter udara, karbon aktif, dan *thermal precipitator*. Pengujian menunjukkan bahwa dalam 10 menit dibutuhkan 5,5 batang rokok yang menyala untuk menghasilkan *Sidestream Smoke*. Jumlah massa awal aerosol yang dihasilkan oleh 5,5 batang rokok dalam 10 menit dapat dihitung dengan menggunakan relasi antara *flow rate* yang dihasilkan oleh satu batang rokok yang menyala serta densitas aerosol. Jumlah massa aerosol yang dihasilkan dalam 10 menit adalah:

$$\text{flow rate} \times \text{densitas aerosol} \times \text{waktu} \dots \dots \dots (1)$$

$$5,5 \times 370 \text{ cm}^3 / \text{min} \times 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ gram} / \text{cm}^3 \times 10 \text{ min} = 29,1 \text{ gram}$$

Prosentase massa aerosol yang terdapat didalam *Cigarette Smoke Filter* dapat dihitung menggunakan selisih antara jumlah massa yang dihasilkan dengan massa yang tersaring dibandingkan dengan jumlah massa yang dihasilkan. Pada pengujian digunakan kertas saring yang ditempatkan pada bagian *outlet Cigarette Smoke Filter* dan dengan menggunakan *hot wire anemometer* diketahui kecepatan pada bagian *outlet* sebesar 2,6 m/s. Pada kertas saring terdapat penambahan massa tiap pengujian selama 10 menit sehingga penambahan massa total dan penambahan massa rata-rata yang terjadi selama pengujian selama 50 menit dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Penambahan massa aerosol pada perhitungan massa awal aerosol

Pengujian	Massa awal	Massa akhir	Penambahan massa
1	0.49	0.51	0.02
2	0.55	0.57	0.02
3	0.53	0.54	0.01
4	0.55	0.57	0.02
5	0.56	0.6	0.04
Penambahan massa total			0.11*
Penambahan massa rata-rata			0.022*



*dalam gram

Presentase massa aerosol yang terdapat dalam *Cigarette Smoke Filter* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\frac{\text{Jumlah massa} - \text{Penambahan massa}}{\text{Jumlah massa}} \times 100\% \dots\dots (2)$$

Sehingga prosentase massa aerosol yang terdapat dalam *Cigarette Smoke Filter* untuk pengujian selama 50 menit tanpa menggunakan filter sebesar:

$$\frac{145,5 - 0,11}{145,55} \times 100\% = 99,9\%$$

1. Pengujian Menggunakan Filter Udara Konvensional

Pengujian menggunakan filter udara konvensional dilakukan sebanyak 5 kali selama 50 menit sehingga massa aerosol yang dihasilkan pada *Cigarette Smoke Filter* sebanyak 145,5 gram. Pengujian ini ditujukan untuk mengetahui seberapa efektif penggunaan filter udara konvensional sebagai penyaring partikel aerosol. Pada pengujian ini ditempatkan kertas saring pada bagian *outlet Cigarette Smoke Filter*. Sama halnya dengan pengujian sebelumnya bahwa terdapat penambahan massa pada kertas saring selama pengujian, sehingga penambahan massa total dan penambahan massa rata-rata yang terjadi selama 50 menit, hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Penambahan massa aerosol pada pengujian menggunakan filter udara konvensional

Pengujian	Massa awal	Massa akhir	Penambahan massa
I	0.52	0.53	0.01
II	0.5	0.51	0.01
III	0.51	0.52	0.01
IV	0.59	0.6	0.01
V	0.61	0.63	0.02
Penambahan massa total			0.06*
Penambahan massa rata-rata			0.012*

*dalam gram

Pada tabel 3 terlihat penurunan massa aerosol yang tersaring dan ini mengindikasikan bahwa penggunaan filter udara konvensional mampu mengurangi jumlah massa aerosol yang dihasilkan. Mengenai jumlah massa aerosol yang dihasilkan pada pengujian selama 10 menit sebesar 29,1 gram dan jumlah massa aerosol yang dihasilkan pada pengujian selama 50 menit sebesar 145,5 gram. Dengan melakukan asumsi bahwa massa aerosol yang dihasilkan konstan selama pengujian maka dapat dihitung efisiensi penggunaan filter udara konvensional sebagai komponen penyaring pada *Cigarette Smoke Filter*. Efisiensi penyaringan filter udara konvensional merupakan rasio antara selisih massa yang tersaring pada kertas saring

tanpa filter apapun dengan massa yang tersaring pada kertas saring menggunakan filter udara konvensional dibandingkan dengan massa yang tersaring pada kertas saring tanpa menggunakan filter. Sehingga efisiensi penyaringan filter udara konvensional sebesar 45,45%

2. Pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen

Pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen ditujukan guna memperoleh efisiensi penyaringan yang lebih baik. Penggunaan filter udara konvensional memiliki efisiensi penyaringan 45,45%, dan kebanyakan dari partikel aerosol yang tersaring merupakan partikel dengan ukuran besar (1-100 µm). Sedangkan penggunaan filter karbon aktif homogen dengan mesh/sieve sebesar 20 ditujukan untuk menyaring partikel aerosol berukuran kecil dan menghilangkan bau yang dihasilkan dari *Sidestream Smoke*. Penambahan massa rata-rata dan penambahan massa total yang dihasilkan dari pengujian dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Penambahan massa aerosol pada pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen

Pengujian	Massa awal	Massa akhir	Penambahan massa
I	0.5	0.5	0
II	0.44	0.45	0.01
III	0.41	0.42	0.01
IV	0.47	0.47	0
V	0.63	0.64	0.01
Penambahan massa total			0.03*
Penambahan massa rata-rata			0.006*

*dalam gram

Pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen didapat penurunan massa aerosol yang tersaring pada kertas saring dibandingkan dengan tanpa menggunakan filter dan menggunakan filter udara konvensional. Hal ini menandakan bahwa penggunaan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen efektif menyaring partikel aerosol yang dihasilkan dari *Sidestream Smoke*. Dengan menggunakan selisih antara massa aerosol yang tersaring tanpa menggunakan filter dan menggunakan rangkaian filter udara konvensional dengan karbon aktif homogen lalu dibandingkan dengan massa aerosol yang tersaring tanpa menggunakan filter maka didapatkan efisiensi penyaringan. Efisiensi penyaringan yang dihasilkan oleh rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen sebesar 72,72%

Sedangkan efisiensi karbon aktif homogen dapat dihitung menggunakan selisih massa yang tersaring pada filter udara konvensional dengan massa yang tersaring



pada kertas saring pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen dibandingkan massa yang tersaring pada filter udara konvensional. Efisiensi penyaringan yang dihasilkan karbon aktif homogen adalah sebesar 40%

3. Pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif tanpa pencetakan

Pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif tanpa pencetakan ditujukan untuk mengetahui efisiensi penyaringan yang dihasilkan dan membandingkan penggunaan variasi karbon aktif terhadap efisiensi penyaringan pada rangkaian. Sama halnya dengan pengujian sebelumnya bahwa efisiensi yang dihasilkan merupakan rasio antara selisih massa yang tersaring tanpa menggunakan filter dengan massa yang tersaring menggunakan filter dibandingkan massa yang tersaring tanpa menggunakan filter. Sedangkan penggunaan filter karbon aktif tanpa pencetakan merupakan salah satu variasi yang dilakukan untuk mengetahui karbon aktif yang menghasilkan efisiensi penyaringan terbaik. Penambahan massa total dan rata-rata yang terjadi pada kertas saring selama pengujian dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Penambahan massa aerosol pada pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan filter karbon aktif tanpa pencetakan

Pengujian	Massa awal	Massa akhir	Penambahan massa
I	0.49	0.5	0.01
II	0.69	0.69	0
III	0.56	0.57	0.01
IV	0.5	0.51	0.01
V	0.54	0.55	0.01
Penambahan massa total			0.04*
Penambahan massa rata-rata			0.008*

*dalam gram

Pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif tanpa pencetakan didapat penurunan pada penambahan massa total dan penambahan massa rata-rata dibandingkan tanpa menggunakan filter dan menggunakan filter udara konvensional. Efisiensi penyaringan yang dihasilkan oleh rangkaian filter udara konvensional dengan karbon aktif tanpa pencetakan dapat dihitung menggunakan perbandingan antara selisih massa yang tersaring tanpa filter dengan massa yang tersaring menggunakan rangkaian filter udara konvensional serta karbon aktif tanpa pencetakan dibandingkan massa yang tersaring tanpa penggunaan filter. Sehingga efisiensi penyaringan pada rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif tanpa pencetakan yang dihasilkan sebesar 63,63% dengan efisiensi penyaringan karbon aktif tanpa pencetakan sebesar 20%

4. Pengujian menggunakan rangkaian filter udara

konvensional dan karbon aktif heterogen (berlapis)

Pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif heterogen (berlapis) bertujuan untuk mengetahui efisiensi penyaringan yang dihasilkan dan penggunaan variasi karbon aktif yang menghasilkan kemampuan penyaringan terbaik. Efisiensi penyaringan merupakan perbandingan antara selisih massa yang tersaring tanpa menggunakan filter dengan massa yang tersaring menggunakan rangkaian filter udara konvensional serta karbon aktif heterogen (berlapis) dibandingkan massa yang tersaring tanpa menggunakan filter. Dengan membandingkan efisiensi yang dihasilkan pada rangkaian filter menggunakan filter udara konvensional dan berbagai variasi penggunaan karbon aktif seperti karbon aktif homogen, karbon aktif tanpa pencetakan, dan karbon aktif heterogen (berlapis) maka diketahui karbon aktif yang memiliki kemampuan penyaringan terbaik.

Berdasarkan persamaan efisiensi maka dibutuhkan penambahan massa total yang terjadi pada kertas saring selama pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif heterogen (berlapis). Penambahan massa total dan penambahan massa rata-rata selama pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif heterogen (berlapis) disajikan pada tabel 6.

Tabel 6. Penambahan massa aerosol pada pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan filter karbon aktif heterogen

Pengujian	Massa awal	Massa akhir	Penambahan massa
I	0.63	0.63	0
II	0.61	0.63	0.02
III	0.6	0.62	0.02
IV	0.6	0.6	0
V	0.62	0.62	0
Penambahan massa total			0.04*
Penambahan massa rata-rata			0.008*

*dalam gram

Sehingga efisiensi penyaringan yang dihasilkan pada pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif heterogen (berlapis) sebesar 63,63% dengan efisiensi karbon aktif heterogen yang dihasilkan sebesar 20%

5. Pengujian dengan menggunakan *thermal precipitator*

Pengujian menggunakan *thermal precipitator* ditujukan guna mengetahui seberapa efisien penggunaan *thermal precipitator* sebagai filter dengan memanfaatkan perbedaan temperatur pada sisi panas dan dingin *thermal precipitator*. Perbedaan temperatur pada sisi panas dan



dingin divariasikan sebanyak empat buah yakni 0°C, 15°C, 25°C, dan 35°C dengan temperatur yang terukur pada sisi pelat dingin sebesar 27,8°C. Pengujian dilakukan menggunakan *thermal precipitator* tanpa rangkaian filter lainnya seperti filter udara konvensional dan karbon aktif berbagai variasi. Efisiensi penyaringan yang diperoleh merupakan rasio antara selisih massa yang tersaring pada kertas saring tanpa menggunakan filter apapun dengan massa yang tersaring menggunakan *thermal precipitator* pada perbedaan temperature 0°C, 15°C, 25°C, dan 35°C. Tabel 7 memuat data mengenai penambahan massa total dan penambahan massa rata-rata pada variasi pengujian.

Tabel 7. Penambahan massa aerosol pada pengujian menggunakan *thermal precipitator*

Delta Pengujian	0°C		15°C		25°C		35°C	
	m awal	m akhir						
I	0.45	0.46	0.49	0.49	0.46	0.46	0.46	0.47
II	0.43	0.45	0.44	0.45	0.45	0.46	0.48	0.48
III	0.48	0.49	0.47	0.47	0.44	0.45	0.46	0.47
IV	0.44	0.46	0.44	0.46	0.43	0.43	0.43	0.44
V	0.45	0.47	0.46	0.47	0.44	0.45	0.44	0.44
Penambahan m total	0.08*		0.04*		0.03*		0.03*	
Penambahan m rata-rata	0.016		0.008		0.006		0.006	
Efisiensi penyaringan	27.27%		63.63%		72.72%		72.72%	

*dalam gram

Efisiensi penyaringan dengan menggunakan *thermal precipitator* merupakan pengaruh perbedaan temperatur antara sisi panas dan dingin yang menghasilkan penyerapan/penarikan partikel aerosol pada sisi pelat dingin dengan jumlah yang besar. Semakin besar jumlah partikel aerosol yang tertarik pada sisi dingin menandakan bahwa pada perbedaan temperatur tersebut menghasilkan efisiensi penyaringan yang besar. Dengan membandingkan selisih massa total antara pengujian tanpa filter dengan pengujian menggunakan *thermal precipitator* pada $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ dan ΔT lainnya (15°C, 25°C, dan 35°C) maka didapatkan perbedaan temperatur yang menghasilkan efisiensi penyaringan terbaik.

Efisiensi penyaringan terbaik terdapat pada perbedaan temperature 25°C dan 35°C dengan efisiensi penyaringan sebesar 72,72%. Untuk menarik partikel pada sisi pelat dingin dibutuhkan gaya *thermophoresis* yang dihasilkan oleh perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin *thermal precipitator*. Gaya *thermophoresis* yang dihasilkan untuk perbedaan temperatur 35°C secara teori lebih besar dibandingkan perbedaan temperature 25°C akan tetapi pada perbedaan temperatur 35°C terjadi perpindahan panas antara sisi pelat panas dengan sisi pelat

dingin secara konveksi yang menyebabkan sisi dingin menjadi sedikit lebih panas sehingga gaya *thermophoresis* yang dibangkitkan besarnya hampir sama dengan gaya yang dihasilkan untuk perbedaan temperatur 25°C.

6. Pengujian dengan menggunakan rangkaian filter udara konvensional, karbon aktif heterogen, dan *thermal precipitator*.

Pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional, karbon aktif homogen, dan *thermal precipitator* ditujukan untuk mengetahui efisiensi penyaringan yang dihasilkan dari rangkaian tersebut. Dengan mengabungkan ketiga filter diatas diharapkan massa partikel yang tersaring pada kertas saring berkurang. Filter udara konvensional digunakan untuk menyaring partikel aerosol berukuran besar (1-100 µm), karbon aktif dengan pori-pori yang seragam dalam ukuran diharapkan mampu meningkatkan penyaringan partikel dengan ukuran sesuai dengan pori-pori dan menghilangkan bau yang dihasilkan dari *Sidestream Smoke*, dan *thermal precipitator* ditujukan untuk menyaring partikel aerosol berukuran kecil (0,001-5 µm). Variasi yang dilakukan pada pengujian ini tidak melibatkan penggunaan karbon aktif lainnya dikarenakan karbon homogen memberikan efisiensi terbaik dan variasi yang dilakukan hanya pada perbedaan temperatur sisi pelat panas dan sisi pelat dingin sebanyak empat buah yakni 0°C, 15°C, 25°C, dan 35°C dengan sisi pelat dingin yang terukur sebesar 27,8°C. Tabel 8 memuat data penambahan massa total dan penambahan massa rata-rata selama pengujian.

Tabel 8. Penambahan massa aerosol menggunakan rangkaian filter udara konvensional, karbon aktif homogen, dan *thermal precipitator*

Delta Pengujian	0°C		15°C		25°C		35°C	
	m awal	m akhir						
I	0.5	0.51	0.5	0.5	0.51	0.51	0.46	0.47
II	0.5	0.51	0.47	0.47	0.48	0.49	0.49	0.49
III	0.49	0.5	0.49	0.5	0.48	0.49	0.51	0.52
IV	0.5	0.5	0.48	0.49	0.47	0.48	0.5	0.5
V	0.5	0.51	0.5	0.51	0.49	0.49	0.48	0.48
Penambahan m total	0.04*		0.03*		0.03*		0.02*	
Penambahan m rata-rata	0.008		0.006		0.006		0.004	
Efisiensi penyaringan	63.63%		72.72%		72.72%		81.81%	

*dalam gram

Berdasarkan tabel, efisiensi penyaringan dapat dihitung untuk variasi perbedaan temperatur 0°C, 15°C, 25°C, dan 35°C. Efisiensi penyaringan yang dihasilkan dipengaruhi oleh gaya gesek yang dibutuhkan untuk mengatasi halangan berupa rangkaian filter udara



konvensional dan karbon aktif homogen dan gaya *thermophoresis* yang dihasilkan dari perbedaan temperatur sisi panas dan dingin pada *thermal precipitator*. Efisiensi penyaringan yang dihasilkan merupakan rasio selisih massa yang tersaring pada pengujian tanpa dengan massa yang tersaring menggunakan rangkaian filter udara konvensional, karbon aktif homogen, dan *thermal precipitator* pada perbedaan temperature 0°C, 15°C, 25°C, dan 35°C dibandingkan dengan massa yang tersaring pada pengujian tanpa menggunakan filter.

Besarnya efisiensi yang dihasilkan pada pengujian menggunakan rangkaian filter udara konvensional, karbon aktif homogen, dan *thermal precipitator* ditentukan gaya gesek dan gaya *thermophoresis* yang bekerja pada partikel aerosol. Kecepatan aliran yang terukur pada *hot wire anemometer* pada bagian outlet rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif sebesar 0,3 m/s menghasilkan gaya gesek yang sangat kecil. Untuk menghasilkan gaya konstan yang bekerja pada partikel aerosol jika gaya gesek bernilai kecil maka gaya *thermophoresis* memberikan pengaruh yang dominan. Hal ini dapat dibuktikan pada saat perbedaan temperatur *thermal precipitator* bernilai 0°C baik pada pengujian 5 dan 6. Pada pengujian 6 ketika tidak terdapat gaya *thermophoresis* maka gaya gesek berperan besar, pada pengujian ini terdapat penghalang berupa rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen sehingga gaya gesek berperan untuk melewati halangan dan menyebabkan penurunan massa yang tersaring pada kertas saring. Sedangkan pada percobaan 5 tidak terdapat penghalang berupa rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen sehingga jumlah massa yang tersaring pada kertas saring jumlahnya lebih besar dibandingkan pengujian 6. Gaya gesek akan berkurang seiring bertambahnya gaya *thermophoresis* yang dibangkitkan oleh perbedaan temperatur, pada percobaan 5 untuk perbedaan temperatur 15°C jumlah massa yang tersaring pada *thermal precipitator* sebanyak 0,07 gram sedangkan untuk pengujian 6 jumlah massa yang tersaring pada rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen sebanyak 0,01 gram. Jumlah massa yang tersaring pada rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif homogen pada pengujian 2 sebanyak 0,08 gram, hal ini menunjukkan bahwa gaya *thermophoresis* memberikan pengaruh dominan pada penyaringan partikel aerosol dibandingkan gaya gesek. Hal tersebut juga berlaku pada pengujian dengan perbedaan temperatur 35°C pada *thermal precipitator* menggunakan rangkaian filter udara konvensional dan karbon aktif. Sedangkan perbedaan temperatur 25°C memberikan gaya *thermophoresis* optimal karena jumlah massa yang tersaring tidak terpengaruh oleh gaya gesek.

8. Kesimpulan

Rangkaian filter udara konvensional, karbon aktif homogen, dan *thermal precipitator* pada perbedaan temperature 35°C memberikan efisiensi penyaringan terbaik sebesar 81,81%

Karbon aktif homogen memberikan efisiensi penyaringan paling baik sebesar 40% dibandingkan dengan karbon aktif tanpa pencetakan dan karbon aktif heterogen (berlapis) yang masing-masing memberikan efisiensi penyaringan sebesar 20%.

Perbedaan temperatur 25°C pada *thermal precipitator* menghasilkan gaya *thermophoresis* terbaik.

Gaya *thermophoresis* memberikan pengaruh dominan terhadap partikel aerosol dalam proses penyaringan.

Referensi

- [1]. Office of Research and Development, and Office of Air and Radiation EPA Document Number 43-F-93-003
- [2]. EPA/600/6-90/006F, RESPIRATORY HEALTH EFFECTS OF PASSIVE SMOKING: LUNG CANCER AND OTHER DISORDERS
- [3]. Peraturan Gubernur Nomor 75 Tahun 2005 Tentang Kawasan Larangan Merokok
- [4]. Brigitta Danuser, Martin H. Junker, Theodor Koller, "Acute sensory responses of nonsmokers at very low *Environmental Tobacco Smoke* concentrations in controlled laboratory settings," *Environmental Health Perspectives* (10/1/2001)
- [5]. Armour Research Foundation of Illinois Institute of Technology Technology Center Chicago 16, Illinois PHYSICAL PROPERTIES OF CIGARETTE SMOKE Project Evaluation Report hal. 20 - 25.
- [6]. Ecologix Environmental Systems Basic Information of Activated Carbon diakses pada 26 Mei 2008 http://www.ecologixsystems.com/activated_carbon.php
- [7]. Danuser, Brigitta, Martin H. Junker, Theodor Koller, (2001). "Acute sensory responses of nonsmokers at very low *Environmental Tobacco Smoke* concentrations in controlled laboratory settings". Dari *Environmental Health Perspectives* 109:1045-1052 (2001) Diakses pada 20 Mei 2008. www.encyclopedia.com
- [8]. Davies, CN, *Aerosol Science vol. 1*, (New York: Academic Press, 1966), hal.137 - 140 Hakim, Imansyah Ibnu, Herdi R., Ahmad F., "Studi Eksperimen Thermophoretic Force Pada Permukaan Perpindahan Panas," Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri, UGM Yogyakarta, 25 Mei 2005, hal. 3 - 4



- [9]. Marsh, Harry, Francisco Rodriguez-Reinoso, *Activated Carbon*, (Amsterdam: Elsevier, 2004), hal. 143 – 151
- [10]. Zimon, Anatolii D. *Adhesion of Dust And Powder*, (New York: Plenum Press, 1969), hal. 22 – 26



