

# PENGUJIAN KARAKTERISTIK KINERJA SIKLON SEPARATOR HEMAT ENERGI

Prihadi Setyo Darmanto dan Katon Primanto

Laboratorium Teknik Pendingin, Jurusan Teknik Mesin  
Institut Teknologi Bandung

## Abstrak

Kinerja suatu siklon separator ditentukan dari kemampuan pemisahan dan rugi tekanannya. Parameter terakhir tersebut menyatakan ukuran energi untuk mengoperasikannya. Penggunaan siklon di industri mengharapkan siklon dengan efisiensi yang tinggi dan rugi tekanan yang rendah. Penelitian ini mempelajari pengaruh modifikasi yang diterapkan pada siklon untuk meningkatkan kinerjanya dibanding kinerja siklon yang ada. Modifikasi dilakukan dengan mengubah kemiringan atap siklon. Modifikasi tersebut berhasil menurunkan konsumsi energi sebesar 50% tanpa diikuti penurunan efisiensi pemisahan secara berarti. Penelitian ini membahas pengujian yang telah dilakukan terhadap kinerja siklon modifikasi. Dari pengujian tersebut diperoleh korelasi-korelasi empirik tentang efisiensi pemisahan dan rugi tekanan siklon pada beberapa harga konsentrasi debu.

## Abstract

The performance of cyclone separator is measured by its capability to separate solid particles from dust laden gas flow and its pressure drop. The last parameter shows the energy used for running it. The cyclone having highest separation efficiency and lowest pressure drop is needed in the industrial application. It is the aim of this research work to study a modified cyclone in order to find a better performance than the classical cyclone type. The modification is employed by inclining the roof of cyclone. With this modification, the pressure drop could be reduced of about 50% without significantly reducing of separation efficiency. This paper presents an investigation of performance of the modified cyclone. This experiment proposes some empirical correlation of separation efficiency and pressure drop at various values of dust load.

*Keywords : cyclone, dust laden, separation efficiency, pressure drop, roof inclination.*

## 1. PENDAHULUAN

Pada industri yang polusif selalu diperlukan perangkat peralatan yang berfungsi mengurangi emisi debu pada lingkungan. Disamping itu pada beberapa industri, misalnya industri semen, peralatan tersebut berfungsi pula sebagai peralatan proses. Salah satu peralatan tersebut dikenal sebagai siklon separator yang pada industri semen berfungsi memisahkan debu padatan dari campurannya dengan gas dan sebagai tempat pemanasan partikel.

Siklon terbukti secara luas digunakan pada berbagai industri komersial. Luasnya jangkauan kerja siklon disebabkan oleh kemudahan pengoperasiannya. Siklon dapat dioperasikan pada temperatur tinggi tanpa resiko terjadi ledakan. Disamping itu pembuatan dan pemasangannya relatif mudah dan murah.

Kinerja operasi suatu siklon ditentukan oleh efisiensi pemisahan dan karakteristik rugi tekanannya. Efisiensi

pemisahan didefinisikan sebagai perbandingan antara massa padatan yang tersaring dengan massa padatan saat memasuki siklon. Sedangkan rugi tekanan menyatakan perbedaan tekanan statis yang terjadi antara sisi masuk dan sisi keluar siklon selama proses pemisahan berlangsung.

Suatu desain siklon biasanya selalu diarahkan untuk memperoleh efisiensi pemisahan maksimum dengan konsumsi energi akibat rugi tekanan serendah mungkin. Walau demikian, kedua tujuan ini tidak selamanya dapat dipenuhi karena secara umum untuk memperoleh efisiensi pemisahan yang tinggi diperlukan energi yang besar, sehingga pada suatu perancangan siklon diperlukan suatu metode optimasi untuk memperoleh geometri yang mengkompromikan parameter tersebut.

Beberapa pengujian yang dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu didasarkan atas penelitian yang dilakukan oleh Stairmand [7]. Pada hasil penelitian

yang dipublikasikan oleh Stairmand pada tahun 1951 sebenarnya telah dibahas hampir seluruh masalah praktis berkenaan dengan pemakaian siklon. Walaupun demikian, terdapat beberapa hal yang berhubungan dengan perkiraan rugi tekanan dan efisiensi pemisahan yang belum dapat dijelaskan dengan baik.

Pada tahun 1956, Barth meletakkan dasar yang kuat untuk perhitungan [1]. Hasil kerjanya ini belakangan telah disempurnakan oleh Muschelknautz [6]. Dengan menggunakan persamaan Barth-Muschelknautz dapat diperkirakan batas ukuran partikel yang dapat dipisahkan dan kebutuhan energinya akibat rugi tekanan siklon [1]. Cara perhitungan yang dikembangkan oleh Barth-Muschelknautz ini secara umum terbukti berhasil dimanfaatkan dalam beberapa aplikasi praktis di industri, dan banyak dijumpai dalam literatur-literatur Anglo-Saxon [1]. Pengembangan lanjutan untuk memperoleh hasil kalkulasi yang lebih baik pada umumnya didasarkan pada metode yang dikembangkan oleh Barth-Muschelknautz. Beberapa diantaranya telah diusulkan oleh Davies, Leith-Lich [5], Fuchs [2] dan sebagainya. Hasil pengujian atau pengembangan metode perhitungan yang tersedia biasanya diperuntukkan bagi siklon konvensional.

Dalam rangka peningkatan kinerja siklon perlu diupayakan suatu modifikasi atau pengembangan desain, sehingga diperoleh karakteristik dasar yang lebih baik. Penelitian pendahuluan yang dilakukan pada tahun 1995 secara umum menyimpulkan bahwa dengan mengubah kemiringan atap siklon akan diperoleh suatu siklon dengan karakteristik kinerja yang lebih baik [9]. Hasil penelitian tersebut didukung dan dilanjutkan dengan simulasi aliran fluida di dalam siklon dengan menggunakan metode elemen hingga [4]. Simulasi numerik tersebut menyimpulkan bahwa sudut kemiringan optimal suatu desain siklon modifikasi adalah  $15^{\circ} - 20^{\circ}$ .

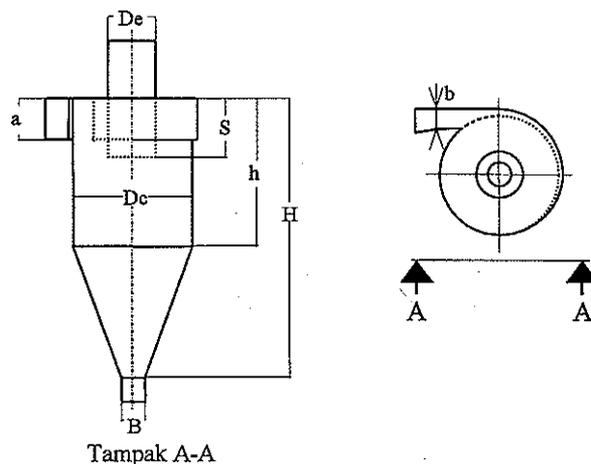
Sebelum dapat digunakan pada aplikasi industri, suatu model siklon modifikasi yang akan digunakan harus diuji agar diketahui karakteristik kinerjanya. Disamping itu pengujian memiliki arti penting mengingat teori-teori yang dikembangkan secara teoritik maupun eksperimental tidak dapat berlaku secara umum untuk seluruh model siklon.

Penelitian ini membahas pengujian yang telah dilakukan untuk suatu geometri siklon modifikasi yang menghasilkan korelasi-korelasi empirik tentang efisiensi pemisahan dan rugi tekanan siklon modifikasi yang lebih hemat energi pada beberapa variasi konsentrasi debu.

## 2. DASAR TEORI

Geometri yang khas dari suatu jenis siklon yang paling banyak digunakan adalah siklon aliran balik (*reversed cyclone*) yang ditunjukkan pada Gb.1. Dimensi siklon

standar yang digunakan dalam praktek industri sering diwakili dengan bentuk tak berdimensi, yaitu dengan cara membagi setiap dimensi dengan diameter siklon ( $D_c$ ). Misalnya lebar saluran masuk dinyatakan dalam bentuk tak berdimensi adalah  $b/D_c$ . Beberapa rasio geometri yang standart untuk siklon konvensional diberikan pada tabel.1.



Tampak A-A

Gb.1. Geometri siklon aliran balik konvensional

Tabel 1. Dimensi berbagai desain siklon standar [10]

Ket.	Efisiensi Tinggi (HE)		Penggunaan Umum (GP)		
	Stairmand d	Swift	Lapple	Swift	Petterson & Whitby
Dc	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
a	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583
b	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208
S	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583
De	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
h	1.5	1.4	2.0	1.75	1.333
H	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17
B	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5
l	2,48	2,04	2,30	2,30	1,8
G	551,3	699,2	402,9	381,8	324,8
N <sub>H</sub>	5,1876	9,204	8,0 (*)	7,599	7,76 (*)

catatan : (\*) adalah harga pendekatan

Besar kecepatan tangensial ( $U_t$ ) yang merupakan komponen utama kecepatan di dalam siklon dinyatakan dalam bentuk :

$$U_t \cdot r^n = \text{konstan} \quad (1)$$

Pada umumnya untuk fluida ideal, harga eksponen vorteks ( $n$ ) adalah sama dengan satu ( $n = 1$ ). Hubungan empirik antara  $n$ , temperatur gas  $T(K)$ , dan diameter siklon  $D_c$  (m) sering dinyatakan dalam bentuk [3]:

$$n = 1 - (1 - 0,683 D_c^{0,14}) \left( \frac{T}{294,44} \right)^{0,3} \quad (2)$$

## Efisiensi Pemisahan

Beberapa teori telah dikembangkan untuk dapat memperkirakan karakteristik pemisahan dari suatu siklon. Karena rumitnya aliran fluida pada siklon, teori atau model tersebut tidak dapat berlaku secara umum. Bahkan beberapa diantaranya berupa korelasi empirik yang harus diperoleh secara eksperimental.

Salah satu teori yang paling populer dan paling banyak digunakan adalah Model Pengendapan Turbulen (*Turbulent Sedimentation Model with Complete Lateral Mixing*) yang pertama kali diusulkan oleh Fuchs [2]. Model ini didasarkan pada analogi langsung terhadap ruang pengendap (*turbulent settling chamber*) dengan mempertimbangkan penurunan konsentrasi partikel pada tiap posisi, tetapi konsentrasi tersebut dianggap seragam pada setiap posisi melintang siklon. Modifikasi terakhir model tersebut diberikan oleh Leith dan Licht [5], yang memberikan persamaan efisiensi pemisahan sebagai fungsi laju aliran udara (Q) menurut:

$$\eta_c(x) = 1 - \exp \left[ -C1 \left( \frac{\tau G Q}{D_c^3} (n+1) \right)^{\frac{C2}{(n+1)}} \right] \quad (3)$$

dengan n adalah eksponen vorteks yang dihitung menurut pers. 2. Untuk siklon konvensional (Gb.1), harga C1 dan C2 secara empirik masing-masing adalah 2 dan 0,5. Faktor geometri G dinyatakan dalam [3]:

$$G = \frac{8 Kc}{K_a^2 K_b^2}; K_a = \left[ \frac{a}{D_c} \right]; K_b = \left[ \frac{b}{D_c} \right] \quad (4)$$

Waktu relaksasi partikel ( $\tau$ ) ditentukan berdasarkan persamaan:

$$\tau = \frac{d_p^2 \rho_p}{18 \mu} \quad (5)$$

Konstanta Kc dihitung berdasarkan:

$$Kc = \frac{(2 V_s + V)}{2 D_c^3} \quad (6)$$

Volume ruangan bebas ( $V_s$ ) di luar saluran gas keluar didefinisikan:

$$V_s = \frac{\pi(S-a/2)(D_c^2 - D_e^2)}{4} \quad (7)$$

Pengamatan menunjukkan bahwa gas akan bergerak mendekati sumbu siklon sesaat akan meninggalkan siklon. Fenomena ini akan terjadi apabila gas berada pada jarak tertentu di bawah saluran keluar, dan jarak ini dikenal sebagai "panjang natural" siklon. Panjang natural (l) tergantung pada dimensi saluran masuk dan keluar siklon, tetapi tidak dipengaruhi oleh kecepatan gas dan tinggi siklon. Alexander (1939) menurunkan hubungan untuk menentukan panjang natural, yaitu:

$$l = 2,3 De \left( \frac{D_c^2}{ab} \right)^{1/3} \quad (8)$$

♦ Volume siklon pada panjang natural, jika  $l > (H-S)$ :

$$V = \frac{\pi D_c^2}{4} (h-S) + \left( \frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left( \frac{H-h}{3} \right) \left( 1 + \frac{B}{D_c} + \frac{B^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_c^2}{4} (H-S) \quad (9)$$

♦ Volume siklon pada panjang natural, jika  $l < (H-S)$ :

$$V = \frac{\pi D_c^2}{4} (h-S) + \left( \frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left( \frac{l+S-h}{3} \right) \left( 1 + \frac{d}{D_c^2} + \frac{d^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_c^2 l}{4} \quad (10)$$

dengan,

$$d = D_c - (D_c - B) \left( \frac{S+l-h}{H-h} \right) \quad (11)$$

Model ini berlaku untuk hampir semua model siklon konvensional. Walaupun demikian, seringkali pendekatan dari pers. (3) memberikan perkiraan yang lebih besar dari kondisi kinerja sebenarnya. Secara umum model pengendapan turbulen menunjukkan hasil terbaik dan bentuk kurva efisiensi pemisahan eksperimental sangat mirip dengan kurva dari pers. (3).

Dari kenyataan tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk berbagai geometri siklon, dengan beberapa penyesuaian, efisiensi pemisahan siklon dapat dengan baik diperkirakan melalui model Pengendapan Turbulen.

## Rugi Tekanan

Hal-hal yang mempengaruhi besarnya rugi tekanan tersebut antara lain adalah:

1. Ekspansi aliran pada saat aerosol memasuki siklon.
2. Energi yang diperlukan untuk menimbulkan aliran vorteks.
3. Gesekan pada dinding siklon.

Secara teoritik Barth menurunkan hubungan untuk menentukan rugi tekanan ( $\Delta P$ ) sebagai fungsi faktor gesekan ( $\lambda$ ) dan kecepatan tangensial menurut [1]:

$$\Delta P = \Psi \frac{1}{2} \rho V_e^2 \quad (12)$$

dengan,

$$\Psi = 2 + 3 U^{4/3} + U^2, U = \frac{U_e}{V_e} \text{ dan } V_e = \frac{Q}{\pi/4 De^2}$$

Müschelknautz [1,26] menunjukkan untuk suatu siklon konvensional, kecepatan tangensial pada  $r = De/2$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$U_c = \frac{U_c \left[ \frac{D_c}{D_e} \right]}{1 + \lambda \left[ \frac{2 h_i}{D_e} \right] \left[ \frac{U_c}{V_e} \right]} \quad (13)$$

dengan  $h_i$  menyatakan tinggi ruangan di bawah saluran gas, sedangkan  $U_c$  adalah kecepatan tangensial pada  $r=D_c/2$ . Disamping itu berlaku hubungan:  $U_c = V_i/\alpha$ , sehingga rasio kecepatan ( $U$ ) pada pers.(13) menjadi :

$$U = \frac{\left( \frac{\pi \left[ \frac{D_e}{a} \right] \left[ \frac{D_e}{b} \right] \right)^{1/\alpha}}{\left( \left[ \frac{D_e}{D_c} \right] + \lambda \left[ \frac{2 h_i}{D_c} \right] \left( \frac{\pi \left[ \frac{D_e}{a} \right] \left[ \frac{D_e}{b} \right] \right)^{1/\alpha} \right)} \quad (14)$$

Faktor  $\alpha$  dalam pers. di atas (14) menyatakan faktor kontraksi yang bergantung pada harga  $b/D_c$  dan konsentrasi debu dalam aerosol [26]. Peningkatan konsentrasi debu akan meningkatkan harga faktor  $\alpha$ . Dengan demikian pers. (14) mengisyaratkan bahwa :

$$\Delta P = \left( Q, \left[ \frac{4 a b}{\pi D_e^2} \right], \left[ \frac{D_c}{h_i} \right], \left[ \frac{D_c}{D_e} \right], \lambda \right) \quad (15)$$

Beberapa hasil eksperimental karakteristik rugi tekanan siklon ( $N_H$ ) seringkali dihitung berdasarkan kecepatan gas saat memasuki siklon,  $V_i$ , yaitu [3] :

$$N_H = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V_i^2} \quad (16)$$

Karakteristik rugi tekanan tersebut secara khas dipengaruhi oleh geometri siklon. Harga  $N_H$  secara eksperimental [8] untuk beberapa desain siklon diberikan pada tabel 1. Pendekatan empirik untuk memperkirakan  $N_H$  yang berlaku untuk siklon konvensional diusulkan oleh Shepherd dan Lapple:

$$N_H = 16 \left[ \frac{a}{D_e} \right] \left[ \frac{b}{D_e} \right] \quad (17)$$

Pendekatan tersebut digunakan pada tabel 1 untuk memperkirakan karakteristik rugi tekanan siklon Lapple dan Pettersen-Whitby. Perbedaan maksimum pendekatan pers. (17) terhadap nilai sesungguhnya adalah 23% bergantung model siklon yang dipakai.

Perbedaan tersebut sebagai akibat dari pers. (17) yang tidak mempertimbangkan geometri aksial ( $h_i$ ), yang diyakini memiliki pengaruh cukup berarti seperti pada pers. (15). Pendekatan lain diusulkan oleh Casal dan Martinez-Benet [1], yaitu :

$$N_H = 11,3 \left[ \frac{a}{D_e} \right]^2 \left[ \frac{b}{D_e} \right]^2 + 3,33 \quad (18)$$

Dari pers. 15, karena  $\alpha$  dipengaruhi oleh konsentrasi debu dalam aerosol, maka secara keseluruhan rugi tekanan akan dipengaruhi pula oleh konsentrasi debu dalam aerosol. Dugaan tersebut diperkuat dengan hasil percobaan yang menunjukkan adanya pengaruh konsentrasi debu terhadap besarnya rugi tekanan.

Smolik telah memperoleh hubungan empirik pengaruh konsentrasi debu pada rugi tekanan menurut [8]:

$$\frac{\Delta P^*}{\Delta P} = 1 - 0,02 c^{0,6} \quad (19)$$

$\Delta P^*$  dalam pers. (19) di atas menyatakan rugi tekanan pada siklon untuk kondisi aliran aerosol dengan konsentrasi debu  $c \text{ g/m}^3$ . Rugi tekanan aliran tanpa debu dinyatakan sebagai  $\Delta P$  pada pers. (19). Pers. (19) tersebut hanya berlaku untuk jenis material atau debu yang dipakai dalam percobaan, sehingga setiap material uji memberikan korelasi yang spesifik.

Pendekatan eksperimental (dari pers. (17) dan pers. (18) ) menunjukkan peningkatan rugi tekanan lebih dipengaruhi oleh pembentukan *vorteks* dibandingkan gesekan dinding siklon. Penurunan intensitas *vorteks* biasanya dijadikan dasar untuk melakukan desain atau modifikasi siklon hemat energi. Walaupun demikian penurunan intensitas *vorteks* biasanya akan diikuti pula oleh penurunan efisiensi pemisahan.

### 3. INSTALASI PENGUJIAN

Geometri model siklon yang diuji ditunjukkan pada Gb.2. Pengujian dilakukan pada sudut kemiringan atap yang konstan, yang dianggap sebagai sudut kemiringan optimal dari hasil simulasi numerik [4]. Sudut optimal tersebut diasumsikan berlaku umum untuk berbagai laju aliran udara dan seluruh variasi desain siklon yang lain. Tujuan utama pengujian ini adalah :

1. Memperoleh karakteristik pemisahan berdasarkan Teori Pengendapan Turbulen (pers. (3)).
2. Memperoleh karakteristik rugi tekanan yang dikembangkan dari pers. (15).

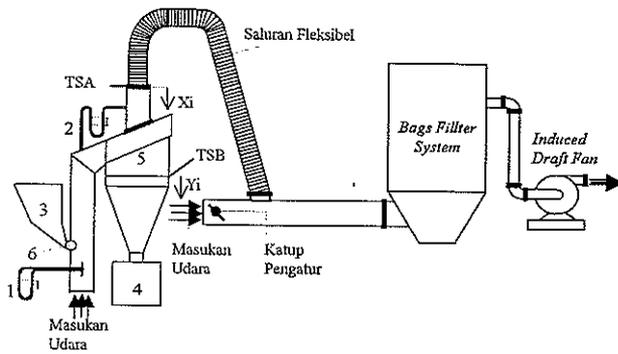
Pada penelitian ini, untuk memenuhi tujuan tersebut dibuat perangkat pengujian (Gb.2) yang dirancang untuk memenuhi beberapa variasi pengujian, yaitu:

- ♦ Variasi laju udara dapat diperoleh dengan mengatur bukaan dari katup pengatur.
- ♦ Panjang saluran keluar (S) diatur dengan mengubah posisi TSA (Titik Siklon Atas) sebesar  $X_i$ .
- ♦ Tinggi silinder (h) dan tinggi total (H) diatur dengan menggeser TSB (Titik Siklon Bawah) sebesar  $Y_i$ .
- ♦ Modul pipa saluran keluar dengan diameter yang berbeda,  $D_e=135 \text{ mm} \ \& \ 160 \text{ mm}$ .
- ♦ Laju material umpan diatur berdasarkan putaran motor yang menggerakkan *feeder*.

Dimensi standar model siklon sesuai nomenklatur pada Gb.1 yang disesuaikan dengan geometri siklon modifikasi (DOPOL) pada Gb.3, adalah :

- ⊗ Sudut kemiringan atap siklon,  $\alpha = 15^\circ$
- ⊗ Diameter siklon,  $D_c=410 \text{ mm}$
- ⊗ Tinggi saluran masuk,  $a=200 \text{ mm}$
- ⊗ Lebar saluran masuk,  $b=90 \text{ mm}$
- ⊗ Diameter saluran debu,  $B=75 \text{ mm}$

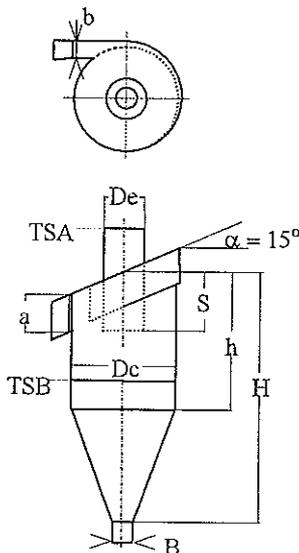
- ⊗ Pada  $X_i=0$ , tinggi *outlet tube*,  $S=120$  mm
- ⊗ Pada  $Y_i=0$ , tinggi silinder,  $h=580$  mm
- ⊗ Pada  $Y_i=0$ , tinggi total,  $H=1070$  mm
- ⊗ Diameter saluran keluar,  $De=135$  dan  $160$  mm



Keterangan :

- |   |   |
|---|---|
| 1 Tabung pitot untuk mengukur kecepatan udara   | 2 Manometer untuk mengukur rugi tekanan                       |
| 3 Penampung material padat umpan, <i>Hopper</i> | 4 Penampung material padat hasil pemisahan                    |
| 5 Model siklon yang diuji                       | 6 Pengumpan ( <i>feeder</i> ) berputar dengan penggerak motor |

Gb.2. Skema instalasi pengujian



Gb.3. Geometri siklon modifikasi yang diuji

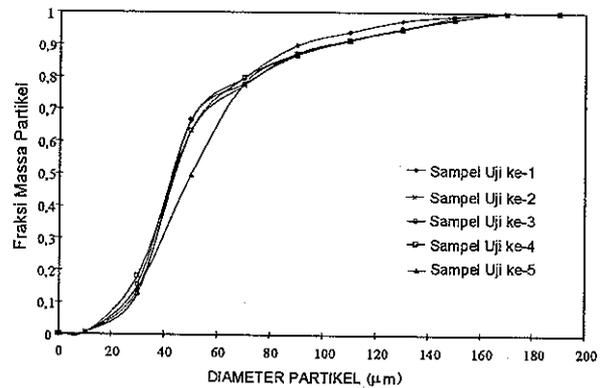
### Material Uji

Material padat yang digunakan pada pengujian adalah material *raw mix* bahan baku semen, dengan komposisi utama batu kapur (*limestone*) dan tanah liat (*clay*). Partikel material uji memiliki massa jenis  $2450 \text{ kg/m}^3$ . Dalam perhitungan seluruh partikel diasumsikan berbentuk bulat. Dari kurva distribusi diameter partikel (pada Gb.4), terlihat kecuali sampel ke-5 distribusi partikel material uji dapat dianggap sama, sehingga data hasil pengujian dapat diasumsikan diperoleh dari material uji yang sama.

Sebagai penyederhanaan, evaluasi waktu relaksasi didasarkan atas diameter rata-rata partikel ( $d_m$ ), yaitu:

$$d_m = \left[ \sum \left( \frac{f_i}{d_p} \right) \right]^{-1} \quad (20)$$

Dengan  $f_i$  menyatakan fraksi massa untuk suatu diameter partikel  $d_p$ .



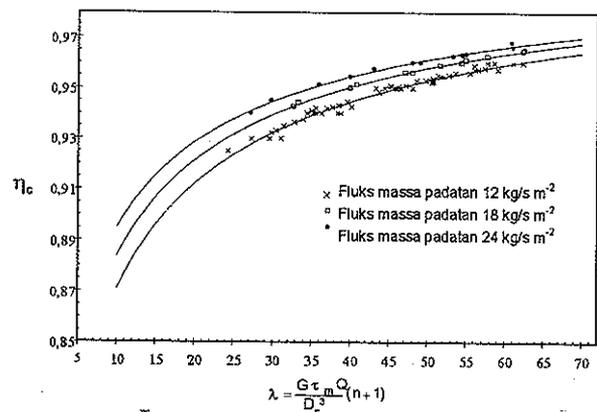
Gb. 4 Distribusi partikel material uji

### 4. ANALISIS HASIL PENGUJIAN

Pada Gb.5 ditunjukkan kurva yang menyatakan karakteristik pemisahan siklon. Untuk beberapa variasi fluks laju massa padatan (yang didefinisikan sebagai laju massa padatan per satuan luas *inlet* siklon) diperoleh konstanta empirik ( $C1$  dan  $C2$  pada pers. (3)) yang berlaku untuk siklon modifikasi, yaitu :

- ◆ Untuk fluks massa padatan  $12 \text{ kg/s m}^2$ ,  $C1=1,1533$  dan  $C2=0,39952$ .
- ◆ Untuk fluks massa padatan  $18 \text{ kg/s m}^2$ ,  $C1=1,2382$  dan  $C2=0,38416$ .
- ◆ Untuk fluks massa padatan  $24 \text{ kg/s m}^2$ ,  $C1=1,3320$  dan  $C2=0,36480$ .

Efisiensi pemisahan siklon modifikasi menurut pers.(3) dengan konstanta empirik tersebut di atas memiliki korelasi antar variabel yang sangat baik (ditunjukkan dari koefisien korelasi regresi linier ( $r$ ) mendekati 1).



Gb.5 Karakteristik pemisahan siklon modifikasi

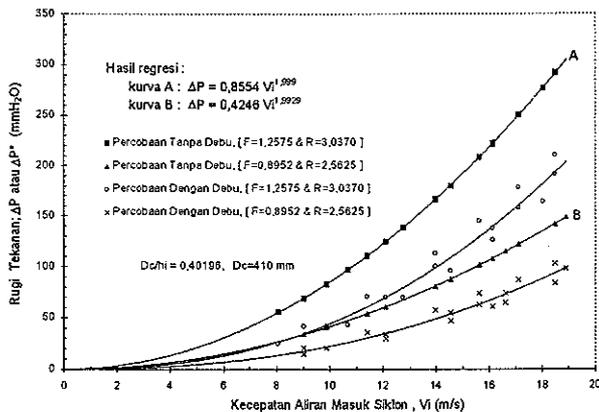
Dalam penelitian ini, pengaruh laju volumetrik udara didasarkan atas kecepatan udara saat memasuki siklon ( $V_i$ ). Koefisien rugi tekanan tersebut dinyatakan dalam:

$$N_H = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V_i^k} \quad (21)$$

Dengan k melukiskan pengaruh  $V_i$  terhadap rugi tekanan ( $\Delta P$ ). Dari pengujian yang dilakukan akan ditentukan harga k untuk siklon yang diuji.

Pengaruh laju volumetrik udara atau kecepatan udara ( $V_i$ ) diperoleh dengan memvariasikan kecepatan udara untuk suatu konfigurasi geometri yang tetap ( $N_H$  konstan). Pengujian untuk melihat pengaruh parameter ini dilakukan pada konfigurasi  $X=D_c/h_i=0,40196$ , masing-masing untuk  $D_e=135$  mm dan 160 mm. Kurva hasil pengujian ini diberikan pada Gb.6.

Pada Gb.6 terlihat penyebaran data pada pengujian dengan menggunakan debu. Hal ini dapat menjadi bukti pengaruh konsentrasi debu pada rugi tekanan siklon. Dengan demikian koefisien rugi tekanan ( $N_H$ ) pada pers.(21) hanya sesuai untuk rugi tekanan siklon jika fluida tidak mengandung padatan. Hal ini memberikan petunjuk bahwa pengaruh konsentrasi harus dianalisis secara terpisah. Dengan demikian rugi tekanan pada operasi siklon dengan debu dapat diestimasi berdasarkan rugi tekanan tanpa debu.



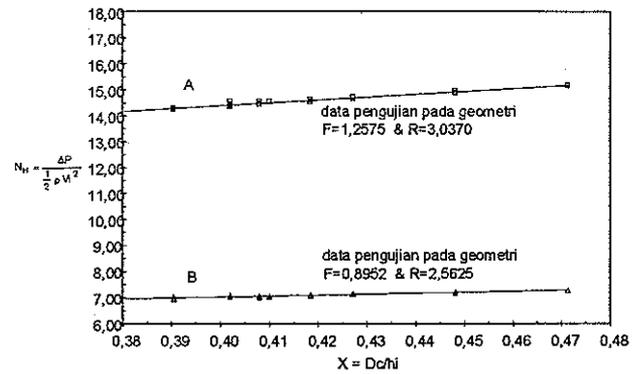
Gb.6 Pengaruh laju udara terhadap rugi tekanan

Dari pengujian tanpa debu berdasarkan kurva A atau kurva B pada Gb.6 diperoleh harga k mendekati 2. Dengan demikian dapat disimpulkan: rugi tekanan pada operasi tanpa debu ( $\Delta P$ ) berkorelasi sangat baik terhadap kuadrat kecepatan udara masuk siklon ( $V_i^2$ ), atau secara matematik:  $\Delta P \sim V_i^2$ .

Pengaruh tinggi ruangan di bawah outlet tube ( $h_i$ ) terhadap rugi tekanan diekspresikan pada variabel bebas  $X = D_c/h_i$ . Hasil pengujian ini ditunjukkan pada Gb.7. Pada Gb.7 tersebut, kurva A diperoleh dari data untuk diameter outlet tube,  $D_e=135$  mm atau ( $F=1,2575$  &  $R=3,0370$ ), sedangkan kurva B diperoleh dari  $D_e=160$  mm atau ( $F=0,8952$  &  $R=2,5625$ ). Analisis regresi linier untuk kurva A dan B menghasilkan:

- ♦ untuk  $F=1,2575$  &  $R=3,0370$ , persamaan:  $N_H = 10,023 + 10,923 X$  (22)

- ♦ untuk  $F=0,8952$  &  $R=2,5625$ , persamaan:  $N_H = 5,6040 + 3,5462 X$  (23)



Gb.7 Pengaruh  $h_i=(H-S)$  pada koef. rugi tekanan ( $N_H$ ).

Pada Gb.7 terlihat perubahan  $X$  tidak memberi pengaruh yang berarti terhadap perubahan koefisien rugi tekanan, tetapi pers. (22) dan (23) dapat dianggap mewakili data pengujian tersebut. Indikasi ini ditunjukkan oleh koefisien korelasi regresi linier ( $r$ ) dari persamaan tersebut dapat dianggap mendekati 1. Data untuk  $F=0,8952$  dan  $R=2,5625$  (ekivalen dengan  $D_e=160$  mm) menunjukkan penyebaran data yang cukup besar ( $r=0,9462$ ). Hal ini disebabkan pada diameter outlet tube yang besar rugi tekanan sudah cukup kecil, sehingga pembacaan perbedaan level air pada alat ukur (manometer) semakin sulit dilakukan.

Keterbatasan data pengujian membuat analisis regresi rugi tekanan secara lengkap sulit diperoleh. Pada penjelasan terdahulu terlihat bahwa rugi tekanan sedikitnya dipengaruhi oleh 5 variabel bebas, yaitu :

- ♦ laju volumetrik udara,  $Q$
- ♦ rasio luas bidang masuk terhadap luas bidang keluar udara,  $F = \frac{4ab}{\pi D_e^2}$
- ♦ rasio diameter siklon terhadap tinggi ruang dibawah outlet tube,  $X = \frac{D_c}{h_i} = \frac{D_c}{(H-S)}$
- ♦ rasio diameter siklon terhadap diameter outlet tube,  $R = \frac{D_c}{D_e}$
- ♦ konsentrasi padatan dalam aerosol,  $c = \frac{mf}{Q}$

Dalam perangkat percobaan pada Gb.2 atau Gb.3 hanya dimungkinkan 2 buah variasi untuk harga  $R$  dan  $F$ , sehingga untuk memperoleh korelasi koefisien rugi tekanan siklon sangat bergantung pada pendekatan teoritiknya, dalam hal ini pers. (14) dan (15).

Berdasarkan teori yang diberikan oleh Bart-Muschelknautz rugi tekanan dipengaruhi oleh bilangan tak berdimensi  $U$  ( pers.(14) ). Pers. (14) tersebut dapat dituliskan dalam bentuk yang lebih umum:

$$U = [F]^{\beta_1} \left( K_1 [R]^{\beta_2} + K_2 [F]^{\beta_3} [X]^{\beta_4} \right)^{\beta_5} \quad (24)$$

Pada pers. (24),  $F$ ,  $R$ , dan  $X$  adalah faktor geometri yang mempengaruhi rugi tekanan siklon, dengan  $F = \frac{4ab}{\pi D_e^2}$ ,  $R = \frac{D_c}{D_e}$ , dan  $X = \frac{D_c}{h_i} = \frac{D_c}{(H-S)}$ ,

sedangkan K1, K2,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$ , dan  $\beta_5$  adalah konstanta yang secara ideal diperoleh dari eksperimen.

Dari definisi koefisien rugi tekanan ( $N_H$  pers. (16)) dan ( $\psi$  pers. (12)), dapat diidealkan secara teoritik berlaku :

$$N_H = [F]^{\beta_1} \left( K_1 [R]^{\beta_2} + K_2 [F]^{\beta_3} [X]^{\beta_4} \right)^{\beta_5} \quad (25)$$

Penentuan K1, K2,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$ , dan  $\beta_5$  diperoleh dengan mencocokkan persamaan hasil regresi ( yaitu pers. (22) dan pers. (23) ) dengan pers. (25). Berdasarkan pers. (22) dan (23) untuk siklon yang diuji dengan mudah dapat diketahui harga  $\beta_4$  dan  $\beta_5$  adalah 1, dan untuk siklon yang diuji modifikasi pers. (25) dapat disederhanakan menjadi :

$$N_H = [F]^{\beta_1} \left( K_1 [R]^{\beta_2} + K_2 [F]^{\beta_3} [X] \right) \quad (26)$$

Dengan mensubstitusikan harga  $F=1,2575$  &  $0,8952$  dan  $R=3,0370$  &  $2,5625$  pada pers. (26), serta menyamakan setiap sukunya dengan pers. (22) dan (23) diperoleh persamaan-persamaan yang harus diselesaikan :

$$\left[ \frac{1,2575}{0,8952} \right]^{\beta_1} \left[ \frac{3,0370}{2,5625} \right]^{\beta_2} = \left( \frac{10,023}{5,604} \right) \quad (27)$$

$$\left[ \frac{1,2575}{0,8952} \right]^{\beta_1 + \beta_3} = \left( \frac{10,923}{3,5462} \right) \quad (28)$$

Pers. (27) dan (28) tidak dapat diselesaikan sampai salah satu dari  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  atau  $\beta_3$  ditentukan harganya. Beberapa hasil penelitian (pers. (17) dan (18) ) menunjukkan bahwa pengaruh F lebih dominan dibanding pengaruh R, karenanya sebagai pendekatan harga  $\beta_2$  ditetapkan sesuai harga teoritiknya ( pers. (14) ), yaitu  $\beta_2 = 1$ . Dengan pendekatan-pendekatan di atas diperoleh korelasi koefisien rugi tekanan :

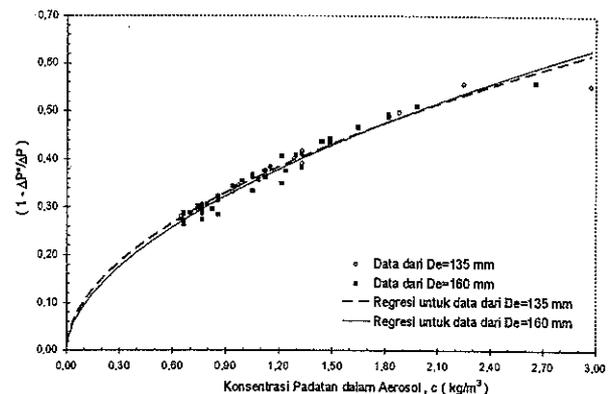
$$N_H = [F]^{1,21} \left( 2,5 [R] + 5,12 [F]^{2,11} [X] \right) \quad (29)$$

Walaupun demikian pers. (29) merupakan persamaan pendekatan yang harus diuji batas-batas keberlakuannya, terutama pada  $F \leq 0,8952$  atau  $F \geq 1,2575$  dan pada  $R \leq 2,5625$  atau  $R \geq 3,0370$ .

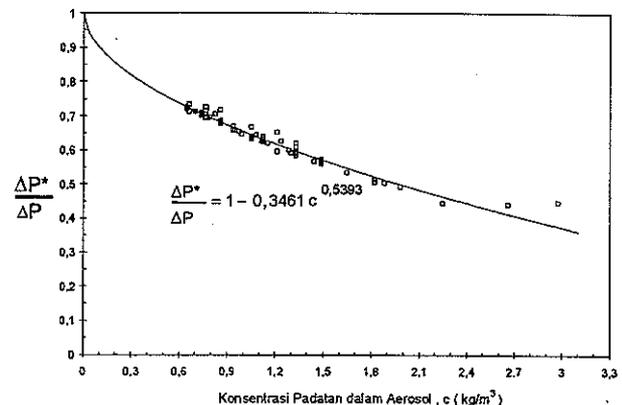
Dalam penelitian ini diamati pula perubahan rugi tekanan dalam siklon ( $\Delta P$ ) yang selanjutnya berubah menjadi  $\Delta P^*$  setelah debu dengan laju mf kg/s ditambahkan pada aliran udara. Dari pengujian ini tersedia 78 buah data yang dapat dipakai untuk mengamati fenomena tersebut. Analisis regresi linier untuk data yang diperoleh pada pengujian siklon dengan  $De=135$  mm dan  $160$  mm diberikan pada Gb.8. Kedua kurva pada Gb.8 membuktikan bahwa dimensi outlet tube ( $De$ ) tidak berpengaruh terhadap perubahan  $\Delta P/\Delta P^*$ . Hal ini ditandai oleh kedua kurva yang hampir berhimpit, walau kurva tersebut diperoleh dari percobaan dengan dimensi ( $De$ ) yang berbeda.

Dari kenyataan bahwa dimensi siklon tidak mempengaruhi perubahan rugi tekanan akibat penambahan konsentrasi debu, maka kedua kurva pada Gb.8 dapat digabungkan dalam sebuah kurva pada Gb.9. Persamaan regresi pada Gb.9 memiliki koefisiensi korelasi regresi linier sebesar  $0,9826$  ( $r \approx 1$ ), sehingga disimpulkan terdapat korelasi yang baik antara  $c$  dan  $\Delta P^*/\Delta P$  dalam pers. regresi (Gb.9).

Penambahan konsentrasi debu ( $c$ ) menyebabkan kontraksi distribusi kecepatan di sekitar bidang masuk sebesar  $\alpha$ . Kontraksi aliran tersebut menurut pers. (14) menyebabkan penurunan rugi tekanan siklon. Pada literatur lain [8] penurunan rugi tekanan tersebut disebabkan oleh perubahan pola distribusi kecepatan akibat turbulensi aliran yang dipengaruhi oleh jumlah partikel dalam fluida.



Gb.8 Kurva regresi linier pengaruh konsentrasi debu dalam aerosol terhadap rugi tekanan pada siklon dengan dimensi outlet tube yang berbeda

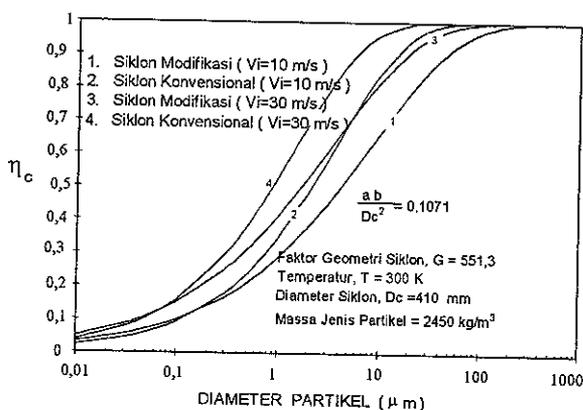


Gb.9 Pengaruh konsentrasi terhadap  $\Delta P^*/\Delta P$ .

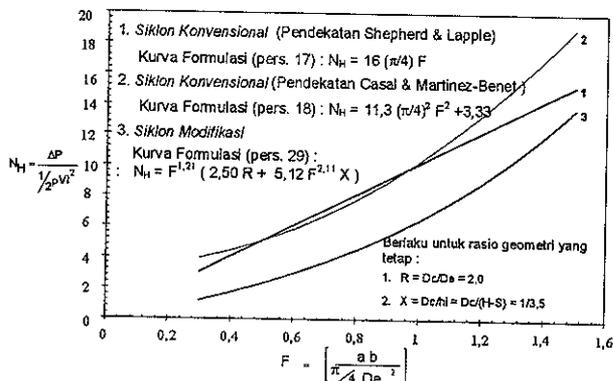
Hasil yang diperoleh dari penelitian ini (Gb.9) memiliki kecenderungan yang mirip, tetapi berbeda dalam besarnya. Perbedaan tersebut kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan material uji dan perbedaan rasio  $b/D_c$  dalam penelitian ini dibandingkan dengan yang dipergunakan pada pengujian Smolik.

## 5. PERBANDINGAN KINERJA SIKLON KONVENSIONAL DAN MODIFIKASI

Pada Gb.10 berikut ini ditunjukkan suatu perbandingan teoritis kinerja pemisahan suatu siklon konvensional dan siklon modifikasi. Karakteristik pemisahan siklon konvensional berdasarkan pers.(3) diaplikasikan dengan konstanta empirik  $C1=2$  dan  $C2=0,5$  [3]. Sedangkan untuk siklon modifikasi didasarkan pada korelasi dari pengujian yang dilakukan pada penelitian ini. Dari gambar tersebut, terlihat secara teoritik siklon modifikasi memiliki karakteristik pemisahan yang lebih rendah dibanding siklon konvensional. Walau demikian penelitian terdahulu [9] menyimpulkan bahwa tidak terdapat penurunan efisiensi pemisahan yang berarti akibat modifikasi yang dilakukan; yang diduga disebabkan diameter partikel uji yang relatif besar sehingga penurunan efisiensi pemisahannya dapat diabaikan.



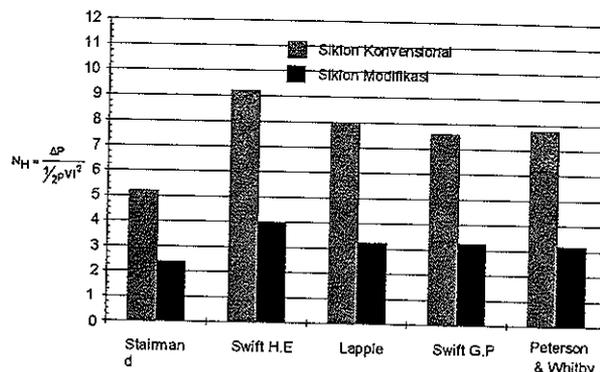
Gb.10. Perbandingan kurva Tromp untuk siklon konvensional dan modifikasi



Gb.11 Pengaruh F pada karakteristik rugi tekanan ( $N_H$ )

Gb.11 menunjukkan perbandingan karakteristik rugi tekanan untuk berbagai variasi harga F untuk rasio geometri dari model siklon Stairmand standar (tabel 1). Perbandingan karakteristik rugi tekanan pada berbagai variasi rasio geometri yang distandarkan menurut tabel 1 ditunjukkan pada Gb.12. Dari Gb.11 dan 12 terlihat dengan jelas bahwa siklon modifikasi memiliki karakteristik rugi tekanan yang lebih baik dibanding siklon konvensional. Dengan menggunakan siklon modifikasi dapat diperoleh penghematan energi sebesar

50%. Hal ini telah dibuktikan pula pada penelitian terdahulu [9].



Gb.12 Koefisien rugi tekanan siklon konvensional dan modifikasi pada beberapa geometri standard

## 6. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian ini dapat disimpulkan beberapa hal, diantaranya :

1. Model Pengendapan Turbulen yang dipakai pada penelitian ini berhasil dengan baik melukiskan karakteristik pemisahan siklon sebagai fungsi beberapa parameter penting.
2. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan diperoleh karakteristik dasar kinerja siklon, berupa efisiensi pemisahan dan rugi tekanan.
3. Secara kualitatif disimpulkan bahwa siklon modifikasi memiliki karakteristik pemisahan yang lebih rendah dari siklon konvensional.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

1. Burkholtz, A. , "Droplet Separation", VCH VmbH, 1989.
2. Fuchs, N. A., "The Mechanics of Aerosol", Pergamon Press, 1964.
3. Koch, W.H. & Licht, W. "New Design Approach Boosts Cyclone Efficiency", *Chemical Eng.* 1977.
4. Kurniawan, K.P., "Pengembangan Siklon Separator Hemat Energi", Tesis Magister, Fakultas. Pasca Sarjana, ITB-1997.
5. Leith, D. & Licht, W. , "Air Pollution and It's Control", *A.I.Ch.E. Symp. Series Vol.68*, 1972
6. Muschelknautz, E. & Brunner, K., *Chemical Engineering Technology Vol.39-no.9/10*, 1967.
7. Stairmand, J.C., "The Design and Performance of Cyclone Separators", *Trans. Inst. Chemical Engineers Vol.29*, 1951.
8. Svarovsky, L. "Solid-Gas Separation", *Handbook of Powder Technology, Vol.3*, Elsevier, 1981.
9. Tholchah, A. "Kaji Eksperimental Siklon Separator", Tugas Akhir Sarjana, Jurusan Teknik Mesin-ITB, 1995.
10. Trefz, M. & Muchelknautz, E. "Extended Cyclone Theory for Gas Flows with High Solid Concentration", *Chem. Eng. Tech. Vol.16*, 1993.

# CATATAN SINGKAT

## REFRIGERAN HIDROKARBON:

### *Refrigeran Ramah Lingkungan dan Hemat Energi*

#### LATAR BELAKANG

Sejak ditemukan pada tahun 1930, refrigeran (*bahan pendingin*) senyawa CFC (*Chloro-Fluoro-Carbon*) merupakan refrigeran utama. Refrigeran senyawa CFC yang paling umum digunakan adalah CFC-12 (R-12), yang umum dikenal sebagai *Freon*.

Namun, pada tahun 1974 para ilmuwan mengetahui bahwa senyawa CFC berdampak negatif terhadap lingkungan. Senyawa CFC yang terlepas ke atmosfer menyebabkan perusakan lapisan ozon di stratosfir (salah satu lapisan atmosfer), sehingga terjadi peningkatan radiasi ultra-ungu di permukaan bumi. Radiasi ultra-ungu yang berlebih ini dapat mengganggu ekosistem dan dapat menimbulkan katarak serta kanker kulit pada manusia.

Untuk mengatasi masalah perusakan lapisan ozon tersebut, telah diadakan berbagai kesepakatan internasional, seperti *Protokol Montreal* dan *Konvensi Wina*, untuk mengadakan penghapusan penggunaan senyawa CFC, termasuk R-12. Melalui KEPPRES RI No 23 tahun 1992, Indonesia meratifikasi kesepakatan tersebut, dan melalui Keputusan MENPERINDAG RI No 110/MPP/Kep/1/1998, Indonesia telah melarang produksi dan impor CFC, termasuk R-12, mulai Januari 1998.

Sementara itu, sebagian besar mesin pendingin yang beroperasi pada saat ini menggunakan R-12. Dengan dilarangnya impor CFC ke Indonesia, refrigeran pengganti R-12 sangat diperlukan.

#### PENGGANTI R-12

Pada saat ini, pengganti R-12 yang umum ditawarkan di Indonesia adalah refrigeran R-134a. Namun dalam kenyataannya, R-134a mengalami beberapa kendala dalam penerapannya, yaitu:

1. Tidak dapat diterapkan langsung pada sistem yang dirancang untuk R-12
2. Merupakan barang impor sehingga sangat mahal
3. Memerlukan pelumas khusus (sintetik) yang mahal
4. Tidak efisien sehingga boros energi
5. Walau tidak merusak ozon, namun masih tidak ramah lingkungan karena memiliki potensi efek pemanasan global
6. Sangat higroskopik sehingga memerlukan penanganan khusus.

Selain R-134a, ada bahan lain yang dapat menggantikan R-12, yaitu refrigeran hidrokarbon

(HC). Memang refrigeran hidrokarbon masih relatif baru di Indonesia dan belum memasyarakat, namun sebenarnya refrigeran hidrokarbon mempunyai masa depan yang sangat cerah.

#### KEUNGGULAN REFRIGERAN HIDROKARBON

Walaupun belum banyak dikenal dan belum banyak digunakan di Indonesia, sebenarnya refrigeran hidrokarbon sangat potensial untuk diterapkan di Indonesia. Ada beberapa alasan utama mengapa refrigeran tersebut sangat potensial, yaitu:

1. Refrigeran hidrokarbon benar-benar ramah lingkungan, karena tidak merusak lapisan ozon maupun menimbulkan pemanasan global
  2. Merupakan pengganti langsung R-12, artinya refrigeran ini dapat dipakai langsung pada mesin yang dirancang untuk R-12 tanpa disertai penggantian komponen
  3. Hasil pengujian di laboratorium dan di lapangan menunjukkan bahwa refrigeran ini bekerja 5 sampai 30 persen lebih efisien dibanding R-134a maupun R-12, sehingga dapat menghemat pemakaian energi
  4. Jumlah refrigeran yang diperlukan lebih irit sampai 60%, dibanding dengan R-12
  5. Bahan baku dan teknologi pembuatan refrigeran ini tersedia di Indonesia, sehingga sangat potensial untuk diproduksi di dalam negeri, bahkan juga berpotensi untuk menjadi komoditi ekspor
2. Refrigeran ini sangat ekonomis karena harga refrigeran yang relatif murah dan hemat energi.

#### LINGKUP PENERAPAN

Refrigeran hidrokarbon mempunyai lingkup penerapan yang sangat luas, bahkan dapat dianggap mencakup semua mesin pendingin yang bekerja dengan daur pendingin kompresi uap. Refrigeran ini dapat diterapkan pada berbagai mesin pendingin dari yang berkapasitas kecil seperti lemari es, AC rumah tangga dan AC kendaraan, berkapasitas menengah seperti pada mesin pendingin sayur, ikan, daging dan susu, sampai yang berkapasitas besar seperti pada mesin-mesin pendingin di industri, misalnya industri tekstil dan gula.

#### PROGRAM TERKAIT

Ada beberapa kegiatan dan usaha yang dilakukan dalam kaitannya dengan masalah refrigeran hidrokarbon, yaitu:

1. Kegiatan penelitian dan pengembangan refrigeran hidrokarbon, yang bertujuan mengetahui berbagai aspek pembuatan dan

penerapan refrigeran hidrokarbon, sehingga dapat diperoleh refrigeran yang baik berikut cara-cara penerapan yang tepat

2. Kegiatan seminar dan konferensi, baik dalam tingkat nasional maupun internasional, untuk mempresentasikan hasil penelitian dan pengembangan yang telah dicapai. Kegiatan ini dapat berupa seminar/penyuluhan untuk masyarakat dalam rangka pemasyarakatan refrigeran hidrokarbon, maupun seminar ilmiah dalam rangka untuk memperoleh masukan yang berguna dari para pakar teknik pendingin.
3. Pelatihan dalam rangka menyediakan teknisi mesin pendingin yang trampil dalam penerapan refrigeran hidrokarbon. Pelatihan ini telah beberapa kali dilaksanakan, dan hingga saat ini telah dilatih lebih dari 300 orang teknisi mesin pendingin yang berasal dari seluruh Indonesia.
3. Penerapan lapangan. Pada saat ini, penerapan lapangan yang dilakukan lebih berkaitan dengan proses pelatihan atau pemasyarakatan refrigeran hidrokarbon itu sendiri. Telah dilakukan penerapan refrigeran hidrokarbon pada AC kendaraan, mesin-mesin pendingin di beberapa KUD susu, seperti di Ujungberung, Tangjungsari, Pasuruan dan Sukabumi, serta pada beberapa industri.

#### **INSTANSI TERKAIT**

Berbagai program yang diutarakan di atas telah dilakukan melalui suatu jaringan kerjasama antar beberapa instansi terkait, yaitu:

1. Berbagai instansi di lingkungan Departemen Koperasi dan Pengusaha Kecil, seperti:
  - Gabungan Koperasi Susu Indonesia (GKSI).
  - KUD Persusuan
2. PERTAMINA.
3. Instansi di lingkungan Departemen Tenaga Kerja:
  - Balai Latihan Kerja (BLK).
4. Instansi di lingkungan Departemen Pendidikan dan Kebudayaan:

- Pusat Penelitian Antar Universitas - Ilmu Rekayasa, Institut Teknologi Bandung (PPAU-IR ITB).
  - Politeknik Institut Teknologi Bandung.
5. Kantor Lingkungan Hidup
  6. Technise Universiteit Delft, Belanda.
  7. Berbagai Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM), seperti:
    - Swisscontact Small and Medium Enterprise Promotion (SC-SMEP).
    - Perhimpunan Peternak Sapi dan Kerbau Indonesia (PPSKI).
    - ECOZONE, Belanda.
  8. Beberapa perusahaan swasta, seperti:
    - Lembaga Pengembangan Tenaga Kerja (LEMBANGTEK).
    - CV. Arion Teknik.
    - PT. Citra Total Buana Biru.

#### **KENDALA YANG DIHADAPI**

Walaupun refrigeran hidrokarbon sangat potensial untuk diterapkan di Indonesia, dan pada saat ini cukup banyak teknisi mesin pendingin yang telah dibekali pengetahuan dan keahlian dalam menangani refrigeran ini, namun penerapan refrigeran ini masih sukar untuk diterapkan karena adanya beberapa kendala, yaitu:

1. Belum tersedianya refrigeran hidrokarbon di Indonesia. Sebenarnya ada beberapa perusahaan swasta yang tertarik untuk membuat refrigeran hidrokarbon di Indonesia, namun mereka masih terbentur dengan masalah penyediaan bahan baku refrigeran hidrokarbon ini.
2. Dukungan pemerintah terhadap penerapan refrigeran hidrokarbon ini masih dirasakan kurang, misalnya dana Protokol Montreal yang ada tersalurkan ke berbagai perusahaan yang menerapkan teknologi R-134a, tetapi tidak/belum ada dana untuk pengembangan dan penerapan refrigeran hidrokarbon.