PENGARUH DEBIT *SPRAYER* TERHADAP REDUKSI DEBU SILIKA PADA MODEL *SCRUBBER HORIZONTAL SPRAY TOWER*

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :
ARI DWI SYAHRI
NIM. 0910620036 – 62

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2013

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGARUH DEBIT *SPRAYER* TERHADAP REDUKSI DEBU SILIKA PADA MODEL *SCRUBBER HORIZONTAL SPRAY TOWER*

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

ARI DWI SYAHRI
NIM. 0910620036-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

DOSEN PEMBIMBING I	**DOSEN PEMBIMBING II**
Dr.Eng. Eko Siswanto, ST., MT.	**Dr.Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT.**
NIP. 19701017 199802 1 001	**NIP. 19750113 200012 1 001**

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH DEBIT *SPRAYER* TERHADAP REDUKSI DEBU SILIKA PADA MODEL *SCRUBBER HORIZONTAL SPRAY TOWER*

SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

ARI DWI SYAHRI
NIM. 0910620036-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 04 Desember 2013

Majelis Penguji

Skripsi I

Francisca Gayuh U.D., ST., MT
NIK. 820919 06 1 2 0259

Skripsi II

Dr. Eng Lilis Yuliati, ST., MT
NIP. 19750702 200003 2 001

Skripsi III

Prof. Ir. I Nyoman Gede Wardana, M.Eng, Ph.D
NIP. 19590703 198303 1 002

Mengetahui,
An. Ketua
PJS Sekretaris Jurusan Teknik Mesin

Purnami, ST., MT.
NIP. 19770707 200812 1 005

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas berkat rahmat-Nyalah penyusunan skripsi dengan judul " **Pengaruh Debit *Sprayer* terhadap Reduksi Debu Silika pada Model *Scrubber Horizontal Spray Tower***" ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu guna memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan tak lepas dari bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunan skripsi ini, yaitu:

1. Bapak Dr. Eng Eko Siswanto, ST., MT. selaku Pembimbing I serta Bapak Dr. Eng Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT. selaku Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan, serta ilmunya yang membantu dalam terselesaikannya skripsi ini.
2. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Purnami, ST., MT selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Agung Sugeng Widodo ST. MT. PhD. selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konversi Energi.
5. Segenap staff pengajar khususnya dosen-dosen di bidang konversi energi dan jajaran Staf karyawan Jurusan Teknik Mesin dan Fakultas Teknik.
6. Kedua orang tua penulis beserta keluarga, abi Mamat Usman dan umi Estri Sri Wahyuni serta kakak dan adik tercinta Kartini Fajarwati dan Amy Abid Kurniawan. Terima kasih atas doa dan dukungannya.
7. Penyemangat hati dan pikiran, Dita Dewi Masita. Terima kasih atas pengorbanannya selama ini.
8. Seluruh KBMM Universitas Brawijaya khususnya saudara – saudara ku Black Mamba M'09.
9. Serta semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak memungkinkan penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan skripsi ini masih sangat jauh dari sempurna, maka dari itu penulis sangat mengharapkan masukan, saran dan kritik

dari berbagai pihak. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan juga bagi pembaca pada umumya. Tidak ada yang sempurna dalam setiap karya manusia, tapi justru itulah yang membuat manusia berpikir untuk menghasilkan karya yang lebih baik.

Malang, Desember 2013

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

KATA PENGANTAR i
DAFTAR ISI iii
DAFTAR TABEL v
DAFTAR GAMBAR vi
DAFTAR LAMPIRAN vii
RINGKASAN viii

BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Penelitian Sebelumnya 4
2.2 *Scrubber* 4
2.2.1 *Wet Scrubber* 5
2.2.2 *Dry Scrubber* 8
2.3 Debu (*Dust*) 10
2.3.1 Debu Silika 12
2.4 Metode Pengumpulan Partikel 13
2.4.1 *Impaction* 13
2.4.2 *Diffussion* 14
2.4.3 Mekanisme Pengumpulan Lainnya 15
2.5 Fluida 16
2.5.1 Definisi Fluida 16
2.5.2 Klasifikasi Fluida 17
2.5.3 Persamaan Kontinuitas 19
2.6 *Sprayer* 20
2.7 Mekanisme Pembentukan *Droplet* 21
2.7.1 *Jet Breakup Length* 23

2.8 Hipotesa 24

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian 25
3.2 Tempat Penelitian 25
3.3 Variabel Penelitian 25
3.4 Peralatan dan Bahan Penelitian 26
3.4.1 Peralatan Penelitian 26
3.4.2 Bahan Penelitian 28
3.5 Instalasi Penelitian 29
3.6 Prosedur Penelitian 30
3.7 Metode Pengambilan Data 30
3.7.1 Persiapan Penelitian 30
3.7.2 Proses Pengambilan Data 30
3.8 Rancangan Tabel Penelitian 31
3.9 Rencana Analisis Data 31
3.10 Diagram Alir Penelitian 32

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil 33
4.1.1 Data Hasil Pengujian 33
4.1.2 Pengolahan Data 33
4.2 Pembahasan 37
4.2.1 Grafik Hubungan antara Debit *Sprayer* dengan *Jet Breakup Length* 37
4.2.2 Grafik Hubungan antara Debit *Sprayer* terhadap Reduksi Debu Silika 39
4.2.3 Grafik Hubungan antara Debit *Sprayer* dengan *Collecting Efficiency* . 40

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan 42
5.2 Saran 42

DAFTARPUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Tabel Rancangan Pengolahan Data	31
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian	33
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian *Re number* dan *We number*	36
Tabel 4.3	Data Hasil Pengujian *Oh number* dan *Jet breakup length*	36
Tabel 4.4	Data Hasil Pengujian *Collecting Efficiency*	37

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	*Spray Tower*	5
Gambar 2.2	*Cyclonic Spray*	5
Gambar 2.3	*Dynamic Scrubber*	7
Gambar 2.4	*Tray Tower*	8
Gambar 2.5	*Cyclone Separator*	9
Gambar 2.6	*Knockout Box*	9
Gambar 2.7	*Baghouse*	10
Gambar 2.8	*Electrostatic Precipitators*	10
Gambar 2.9	Debu Silika	12
Gambar 2.10	*Impaction*	14
Gambar 2.11	*Difussion*	14
Gambar 2.12	Kurva Hipotesis hubungan ukuran partikel dengan *collecting Efficiency* pada *wet scrubber*	15
Gambar 2.13	Deformasi elemen fluida akibat tegangan geser	16
Gambar 2.14	Fluida Newtonian dan Fluida Non-Newtonian	17
Gambar 2.15	Aliran Laminer	18
Gambar 2.16	Aliran Turbulen	19
Gambar 2.17	Struktur *Nozzle*	20
Gambar 2.18	Mekanisme Pembentukan *Droplet*	21
Gambar 2.19	Proses Pembentukan *Droplet* dari Ligamen	22
Gambar 3.1	*Blower*	26
Gambar 3.2	Anemometer	27
Gambar 3.3	Pompa	27
Gambar 3.4	Timbangan Elektrik	28
Gambar 3.5	Alat Pengguncang Rotap	28
Gambar 3.6	Skema Instalasi Penelitian	29
Gambar 4.1	Grafik Hubungan antara Debit *Sprayer* dengan *Jet Breakup Length*	37
Gambar 4.2	Grafik Hubungan antara Debit *Sprayer* dengan Reduksi Debu Silika	39
Gambar 4.3	Grafik Hubungan antara Debit *Sprayer* dengan *Collecting Efficiency*	40

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel Properti air pada Tekanan atmosfer
Lampiran 2 Gambar *Scrubber Horizontal Spray Tower* tampak samping
Lampiran 3 Gambar *Scrubber Horizontal Spray Tower* tampak atas

repository.ub.ac.id

RINGKASAN

Ari Dwi Syahri, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, November 2013, *Pengaruh Debit Sprayer terhadap Reduksi Debu Silika pada Model Scrubber Horizontal Spray Tower*, Dosen Pembimbing: Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT. dan Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT.

Perkembangan industri yang semakin pesat mengakibatkan dampak positif maupun negatif bagi masyarakat maupun lingkungan. Dampak positifnya dimana masyarakat mendapatkan kesejahteraan ekonomi saat banyak lapangan pekerjaan dikawasan industri, sedangkan dampak negatifnya pencemaran limbah industri terhadap masyarakat ataupun lingkungan sekitar. Salah satu bentuk limbah industri adalah debu silika. Pekerja jika terpapar debu silika dalam waktu lama maka dapat menyebabkan penyakit silikosis, dimana penyakit ini menyerang saluran pernapasan. Salah satu upaya untuk mereduksi debu silika ini dengan menggunakan *scrubber*. *Scrubber* merupakan salah satu alat pengendali polusi debu yang paling efektif. Dalam penelitian ini jenis *scrubber* yang dipakai adalah *Horizontal Spray Tower*. *Scrubber horizontal spray tower* merupakan pengembangan dari *gravitational wet scrubber* atau *vertikal spray tower*, dimana *horizontal spray tower* lebih memiliki efisiensi sistem yang lebih tinggi karena menggunakan *blower* dengan daya yang lebih rendah.

Kemampuan dari *scrubber* dilihat dari seberapa besar *scrubber* tersebut dapat mereduksi partikel-partikel debu, hal ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah debit *sprayer*. Oleh karena itu dalam penelitian yang menggunakan metode studi eksperimental ini diteliti pengaruh debit *sprayer* terhadap reduksi debu silika pada model *scrubber horizontal spray tower*. Debit sprayer yang divariasikan 324 l/jam, 486 l/jam, 648 l/jam, 810 l/jam dan 1053 l/jam dengan ukuran debu silika 50 µm, 70 µm dan 100 µm. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mesin-mesin Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang. Untuk mendapatkan data-data yang dibutuhkan, dilakukan metode bersifat studi eksperimental, selanjutnya hasil eksperimen diolah dengan rumus-rumus yang relevan kemudian dilakukan analisis data.

Data hasil penelitian diperoleh debit sprayer dengan pengumpulan partikel terbanyak adalah debit 810 l/jam dan 1053 l/jam dengan pengumpulan pada ukuran patikel 50 µm sebesar 320 gr, partikel 70 µm sebesar 328 gr, dan pada patikel 100 µm sebesar 339 gr. Debit *sprayer* dengan efisiensi pengumpulan paling optimum yaitu pada debit 810 l/jam dimana efisiensi pada parikel ukuran 50 µm sebesar 93%, partikel 70 µm sebesar 94%, dan pada partikel 100 µm sebesar 98%.

Kata Kunci : *Scrubber horizontal*, *spray tower*, debu silika, debit *sprayer*.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan di bidang industri selain memberikan manfaat bagi perkembangan ekonomi juga menimbulkan potensi dampak negatif terhadap lingkungan hidup. Pencemaran akibat limbah industri mengakibatkan efek buruk tidak saja bagi manusia, tetapi juga bagi lingkungan di sekitarnya. Adanya kandungan bahan kimia dalam limbah gas berupa senyawa organik maupun anorganik dapat menurunkan kualitas lingkungan melalui berbagai cara, contohnya saja kepekatan udara karena debu (*dust*).

Salah satu bahan beracun yang terkandung dalam limbah, khususnya yang dihasilkan dari industri adalah debu. Debu adalah partikel padat yang dihasilkan oleh proses alami maupun proses mekanis seperti pemecahan, penghalusan, penggilingan, pengayakan, maupun peledakan. Debu merupakan partikulat yang kecil dan memiliki beragam ukuran dari 1 sampai 500 mikron.

Pada sektor industri, debu memang keluar dalam jumlah yang kecil, tetapi jika terjadi penumpukan secara terus menerus maka akan terakumulasi diudara dan membahayakan manusia. Debu pada sektor industri ini berdampak besar bagi para pekerja maupun masyarakat sekitar, diantaranya:

1. Gangguan aestetik dan fisik seperti terganggunya pemandangan dan pelunturan warna bangunan.
2. Merusak kehidupan tumbuhan yang terjadi akibat adanya penutupan pori-pori tumbuhan sehingga menggangu jalannya photosintesis.
3. Merubah iklim global regional maupun internasional.
4. Menggangu perhubungan/penerbangan yang akhirnya mengganggu kegiatan sosial ekonomi masyarakat.
5. Mengganggu kesehatan manusia seperti timbulnya iritasi pada mata, alergi, gangguan pernapasan dan kanker pada paru-paru.

Salah satu jenis debu yang berbahaya adalah debu silika. Silika adalah campuran mineral yang terdiri dari satu atom silikon (Si) dan dua atom Oksigen (O_2). Apabila silika tersusun dengan model yang sama maka akan membentuk kristal silika (*Crystalyne Silica*), dengan nama yang berbeda-beda seperti *quartz, cristobalite, tridymite, faujasite, melanophlogite, moganit, coesite, stishovite, seifertite* dll.

Tempat kerja yang diketahui beresiko terpapar debu silika antara lain konstruksi jalan, pondasi terowongan, pabrik semen, keramik, baja, besi, beton, pemotongan batu, pertambangan, dan lain sebagainya. Pajanan debu silika dapat menyebabkan penyakit silikosis. Silikosis merupakan bentuk pneumokoniosis yang paling sering ditemukan karena banyak tempat kerja yang berpotensi mengandung debu silika.

Silikosis telah diketahui sebagai salah satu faktor resiko infeksi TB paru dan juga penyulit kesembuhan TB paru pada pasien dengan riwayat pajanan debu silika dalam jangka waktu lama. Diperkirakan angka kematian dari kondisi yang terkait silikosis, yaitu tuberkolosis dan penyakit paru obstruktif kronik (PPOK) sebesar 13 per 1000 (Mannetje et al). Dengan demikian, debu silika ini perlu menjadi suatu perhatian khusus agar tidak menimbulkan dampak yang lebih besar.

Pada proses pengelolaan limbah dipilih cara yang paling murah, mudah, aman, dan ramah lingkungan. Berdasarkan karakteristik limbah, proses pengolahan dapat digolongkan menjadi 3 proses, yaitu proses kimia, fisika dan biologi ataupun kombinasinya (Kristianto, 2002).

Salah satu metode untuk mengurangi dampak dari debu adalah menggunakan *scrubber*. Cara kerja *scrubber* adalah dengan menyemprotkan atau menginjeksikan cairan (air) atau cairan lainnya kepada debu, sehingga partikel debu dapat tertangakap oleh partikel air dan dapat menghentikan atau mengurangi persebaran dari debu tersebut.

Pada penelitian ini peneliti menskalakan *scrubber* dari *Tail Gas Scrubber* Pabrik Phonska II PT Petrokimia Gresik sebagai model *scrubber* dalam skala laboratorium agar dapat mencari korelasi antara debit *sprayer* dengan pereduksian dust, khususnya debu silika.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana korelasi antara debit *sprayer* terhadap kapasitas partikel *dust* yang tertangkap.
2. Bagaimana hubungan antara debit *sprayer* dengan *Collecting Efficiency*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. *Flow rate* udara dan debu dianggap konstan.

2. Kondisi temperatur, kelembaban dan tekanan diasumsikan pada keadaan atmosfer.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan korelasi antara debit *sprayer* terhadap kapasitas partikel *dust* yang tertangkap.
2. Mendapatkan hubungan antara debit *sprayer* dengan *Collecting Efficiency*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Sebagai bahan masukkan dan pertimbangan bagi dunia industri terhadap pengolahan debu.
2. Dapat menjadi model pengelolaan limbah pada sektor industri.
3. Dengan penelitian ini diharapkan bermanfaat untuk karyawan dan warga sekitar dalam kaitannya dengan kenyamanan tempat kerja dan kesehatan akibat debu.
4. Sebagai referensi dan dasar pendekatan bagi penelitan selanjutnya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan pencarian karakterisktik dari *scrubber spray tower* tipe *vertical* (*gravitational wet scrubber*). Kim, H.T, et al. (2001) melakukan penelitian yang difokuskan untuk pemahaman konsep dasar penghilangan partikel secara *diffusion, interception,* dan *impaction* pada *gravitational wet scrubber*. Hasil dari penelitian ini disebutkan bahwa efisiensi pengumpulan partikel secara difusi meningkat seiring dengan berkurangnya diameter partikel. *Interception* relatif tidak bergantung pada kecepatan aliran droplet. Dan pada *impaction* efisiensi pengumpulan partikel dominan pada partikel berukuran lebih dari 5 µm. Pada teorinya *gravitational wet scrubber* tidak cocok untuk partikel lebih kecil dari 1µm, namun pada penelitian ini menunjukkan bahwa saat dalam kondisi operasional yang optimal *gravitational wet scrubber* mempunyai kemampuan yang cukup untuk menangkap partikel lebih kecil dari 1µm. Dari penelitian ini menunjukan bahwa peranan difusi pada pada *gravitational wet scrubber* cukup berpengaruh.

Dalam penelitian ini juga disebutkan bahwa ukuran *droplet liquid* dan rasio perbandingan *liquid to gas* (L/G) sangat penting untuk menentukan efisiensi pengumpulan partikel. Efisiensi pengumpulan partikel secara keseluruhan meningkat saat ukuran partikel dan ukuran droplet berkurang ataupun meningkatnya rasio *liqud to gas*.

Pada penelitian tersebut diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna untuk berbagai macam aplikasi *scrubber*, oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan penelitian pengaruh debit *sprayer* pada *horizontal spray tower* dengan menggunakan ukuran partikel yang berbeda supaya dapat diketahui karakteristik dari *scrubber* tipe *horizontal spray tower*.

2.2 *Scrubber*

Scrubber merupakan salah satu dari beberapa alat pengendali polusi udara atau emisi pada suatu instalasi yang kontribusinya secara umum adalah untuk mengendalikan jumlah atau konsentrasi partikel-partikel berupa padatan ataupun gas yang sifatnya dapat larut pada air, sehingga pada instalasinya mungkin akan dijumpai beberapa alat pendukung lain yang berhubungan untuk mendistribusikan air.

Secara umum *scrubber* dibedakan menjadi dua, yaitu *wet scrubber* (*scrubber* basah) dan *dry scrubber* (*scrubber* kering). Perbedaan antara kedua tipe ini adalah pada penggunaan fluida cair pada proses kerjanya. Pada *wet scrubber* menggunakan fluida cair yang kegunannya sebagai pengikat partikel berupa *fly ash*, pelarut gas, serta untuk pengendali temperatur. Sedangkan *dry scrubber* lebih dominan hanya untuk partikel-partikel dalam bentuk padat.

2.2.1 *Wet Scrubber*

Wet scrubber adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan variasi alat yang menggunakan *liquid* untuk membuang polutan. Pada wet scrubber, arus gas kotor dibawa menuju kontak dengan cairan pencuci dengan cara menyemprotkan, mengalirkannya atau dengan metode kontak lainnya.

Wet scrubber membuang partikel dengan cara menangkapnya dalam tetesan atau butiran *liquid*. Sedangkan untuk polutan gas proses *wet scrubber* adalah dengan melarutkan atau menyerap polutan ke dalam *liquid*.

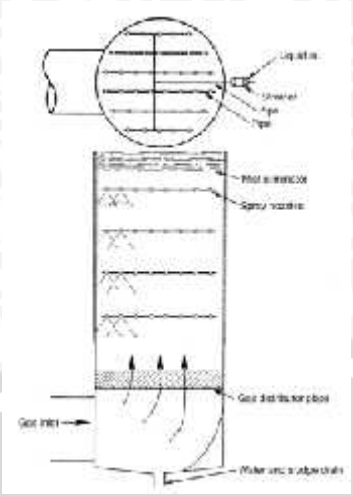
Wet scrubber secara tipikal digunakan bila:

- Partikel yang disisihkan berukuran kecil dan dibutuhkan efisiensi relatif tinggi
- Diperlukan pendinginan atau kelembaban
- Gas bersifat *combustible*
- Polutan gas maupun partikel yang perlu dihilangkan atau direduksi.

Klasifikasi dari tipe *wet scrubber* ini cukup banyak, diantaranya :

1. *Spray Tower*

   Tipe paling sederhana dari *wet scrubber* adalah *spray tower*. Partikel yang ikut mengalir bersama aliran gas disemprot dengan air menggunakan *nozzle*. Konstruksi tipe ini bisa ditempatkan secara horizontal atau vertikal.

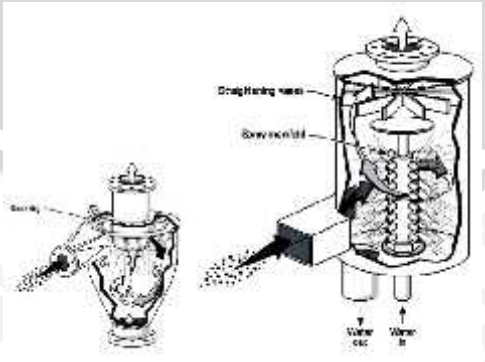


Gambar 2.1 *Spray Tower*
Sumber: Theodore. Louis. (2008)

Efisiensi filtrasi partikel untuk tipe ini berdasarkan ukuran partikel yang ada pada aliran gas. Untuk partikel > 5µm bisa mencapai 90%, 3-5µm antara 60-80%, dan < 3µm dibawah 50%.

2. *Cyclonic Spray*

   Perbedaan antara *cyclonic spray* dengan *spray tower* adalah dari segi konstruksi pada bagian aliran udara masuk ke *scrubber*. *Cyclonic spray* memiliki konstruksi bagian inlet gas yang dibuat pada posisi tangensial terhadap silinder *scrubber*, sehingga gas yang masuk akan mengalami aliran turbulen dan menyebabkan alirannya akan bersinggungan dengan dinding silinder *scrubber*. Hal ini mengakibatkan gas yang mengalir bertambah kecepatan alirannya. Sedangkan air yang disemprotkan berasal dari *nozzle* yang ditempatkan pada bagian tengah atas konstruksi inlet atau dari pipa yang ditempatkan ditengah sepanjang *scrubber*.

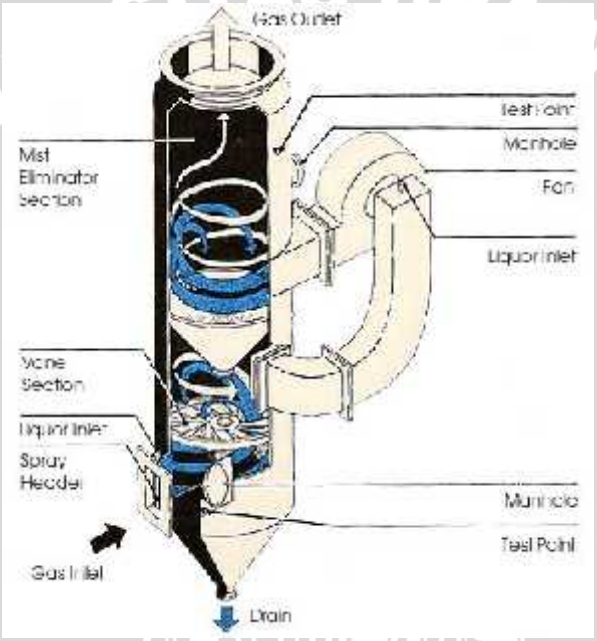


Gambar 2.2 *Cyclonic Spray*
Sumber: Theodore. Louis. (2008)

Efisiensi untuk tipe ini lebih baik dibandingkan dengan *spray tower*. Efisiensinya mencapai 95% untuk partikel >5 µm dan untuk ukuran sub-mikron antara 60-70%.

3. *Dynamic Scrubber*

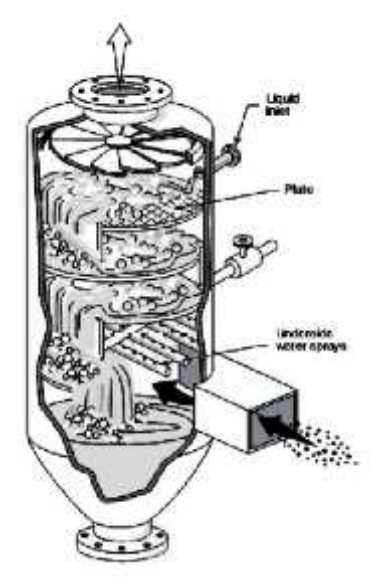
   Dynamic scrubber atau sering disebut dengan *Mecanically-Aided Scrubber* atau *Disintegrator Scrubber* memiliki rotor pada konstruksinya yang berfungsi untuk mengarahkan aliran gas serta partikel hasil filtrasi. Rotor yang ada pada *scrubber* digerakkan oleh motor listrik dengan penempatan rotor bisa ditempatkan diluar atau didalam konstruksi. Tipe ini lebih efisien digunakan untuk filtrasi partikel berukuran < 1µm dan penggunaanya untuk aliran gas 1000-5000 cm.



Gambar 2.3 *Dynamic Scrubber*
Sumber: Anonymous 1 (2013)

4. *Tray Tower*

   Tray *tower scrubber* atau *Plate Tower Scrubber* merupakan *scrubber* vertikal yang dilengkapi dengan beberapa pelat berlubang yang ditempatkan secara horizontal pada bagian dalamnya. Gas yang mengalir dari bagian bawah *scrubber* akan melintasi dari lubang-lubang yang ada pada setiap pelat yang digenangi oleh aloran air yang mengalir dari bagian atas *scrubber*.



Gambar 2.4 *Tray Tower*
Sumber: Theodore. Louis. (2008)

Tipe ini tidak efektif untuk ukuran partikel sub-mikron, tetapi tipe ini memiliki efisiensi tinggi untuk partikel > 5 µm dengan efisiensi mencapai 97%. Desain ini baik digunakan untuk aliran gas 1000-75000 cfm.

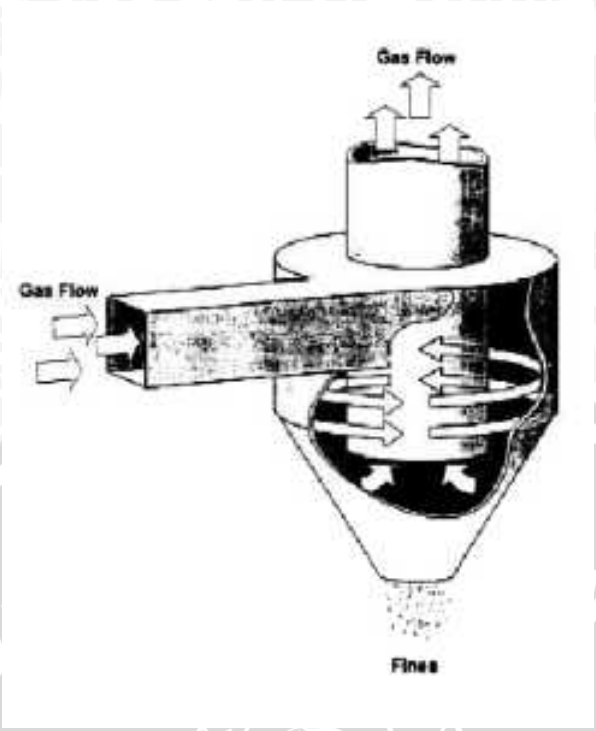
2.2.2 *Dry Scrubber*

Dry scrubber tidak seperti *wet scrubber* yang menjenuhkan aliran gas buang. *Dry scubber* biasanya sering digunakan untuk menghilangkan gas berbau dan korosif dari operasi pabrik pengolahan air limbah. Media yang digunakan biasanya merupakan senyawa alumina aktif yang diresapi dengan bahan untuk menangani gas tertentu seperti hidrogen sulfida. Media yang digunakan dapat dicampur bersama-sama untuk menawarkan berbagai macam *removal* untuk senyawa berbau lain seperti metil merkaptan, aldehida, dan senyawa organik yang mudah menguap, dimetil sulfida, dimetil disulfide. Sistem *dry scrubber* juga dapat digunakan untuk menghilangkan gas asam seperti SO_2 dan HCl terutama dari sumber pembakaran.

Sistem scrubbing kering dapat dikategorikan sebagai injector sorben kering (DSIs) atau sebagai peredam semprot dryer (SDA). Jenis-jenis *dry scrubber* antara lain:

1. *Cyclone Separator*

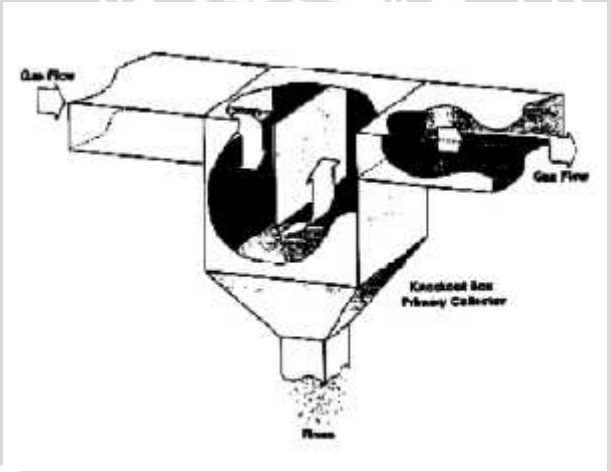
   Cyclone Separator dikenal juga dengan berbagai sebutan, diantaranya *Cyclon Collector, Centrifugal Separator,* atau *Inertial Separator*.



Gambar 2.5 *Cyclone Separator*
Sumber: Theodore. Louis. (2008)

2. *Knockout Box*

   Perbedaan aplikasi ini dengan *Cyclone Separator* adalah penerapannya terhadap aliran gas.



Gambar 2.6 Knockout Box
Sumber: Theodore. Louis. (2008)

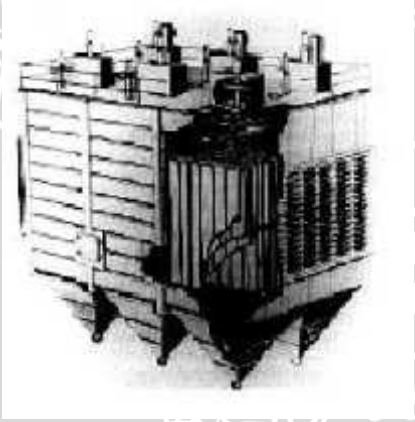
3. *Baghouse*

   Baghouse merupakan aplikasi yang penerapannya berdasarkan pada sistem filtrasi dengan menempatkan komponen filtrasi yang desainnya dibuat pada bebrapa tingkatan atau lapisan.

Gambar 2.7 *Baghouse*
Sumber: Theodore. Louis. (2008)

4. *Electrostatic Precipitators* (ESPs)

   ESPs menerapkan aplikasi elektrostatis untuk mengikat partikel dimana pada konsepnya memanfaatkan tenaga listrik yaitu dengan menghasilkan medan listrik untuk mengikat partikel.



Gambar 2.8 *Electrostatic Precipitators*
Sumber: Theodore. Louis. (2008)

2.3 Debu (*Dust*)

Debu adalah partikel padat yang dihasilkan oleh proses alami maupun mekanis seperti *breaking, grindling, drilling, shaking, cutting* maupun *crushing.* Debu merupakan salah satu bahan yang sering disebut sebagai partikel yang melayang diudara (*Suspend Particular Matter*-SPM) dengan ukuran 1 mikron hingga 500 mikron. debu yang berukuran > 50 mikron dapat terlihat oleh kasat mata. Debu dalam industri dapat terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok bahan kimia organik yang berasal dari

tumbuhan, hewan, atau bahan sintesis. Kelompok yang lain dari kelompok bahan kimia anorganik, yang terdiri dari golongan logam dan golongan non logam.

Penggolongan debu dapat dikelompokkan menjadi berbagai macam berdasarkan sifat, macam dan karakter zatnya sebagai berikut:

1. Berdasarkan sifatnya:
   a. Sifat permukaan basah, yaitu debu yang sifatnya selalu basah karena dilapisi oleh air yang sangat tipis.
   b. Sifat pengendapan, yaitu debu yang cenderung selalu mengendap karena gaya gravitasi bumi.
   c. Sifat penggumpalan, yaitu memiliki sifat yang selalu basah, maka debu satu dengan yang lain cenderung menempel membentuk gumpalan.
   d. Sifat opsis, yaitu partikel yang basah/lembab lainnya dapat memancarkan sinar yang dapat terlihat didalam kamar gelap.
   e. Debu listrik statik, yaitu debu mempunyai sifat listrik statis yang dapat menarik partikel lain yang berlawanan.
2. Berdasarkan macamnya:
   a. Debu fibrogenik, debu ini dapat menyebabkan penyakit seperti pneumokonosis. contoh: debu batu bara, asbes dan silika.
   b. Debu inert, debu ini dianggap tidak berbahaya jika jumlah partikel yang masuk sedikit. Efek penimbunan tergantung jumlah partikel yang masuk.
   c. Debu alergen, debu ini biasanya berasal dari tumbuh-tumbuhan dan garam platina.
   d. Debu iritan, debu ini dapat mengakibatkan iritasi mata dan saluran pernapasan, terutama berasal dari logam berat. Contoh: Cd, Cr, Mn, Ni dan vanadium pentoksida.
   e. Debu toksik, debu yang menyebabkan racun bagi tubuh. Biasanya juga berasal dari logam berat.
   f. Debu karsinogenik, debu yang dapat menyebabkan kanker pada tubuh, diantaranya radiasi ion-ion asbes, As, Cr dan Ni.
3. Berdasarkan karakter zatnya:
   a. Debu fisik, seperti debu tanah, batu mineral, dll.
   b. Debu kimia, terbagi atas debu organik dan anorganik.
   c. Debu biologis, yaitu virus, bakteri, dll.
   d. Debu radioaktif, debu yang dari zat-zat radioaktif.

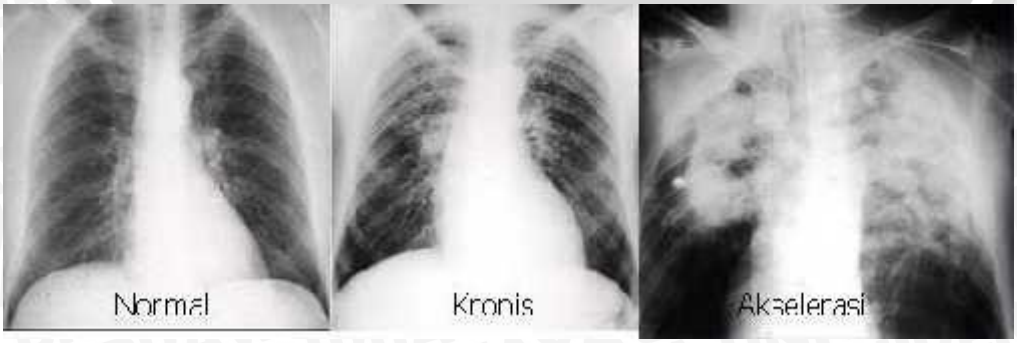
Karena debu merupakan limbah yang berbahaya maka dibutuhkan pengelolaan limbah debu secara tepat. Untuk mengurangi dampak pencemaran dari debu tersebut pencegahan debu dapat dikategorikan menjadi 4 kategori:

1. Pencegahan terhadap sumbernya.
   Isolasi sumber agar tidak mengeluarkan debu diruang kerja dengan *local exhauster* atau dengan melengkapi *water sprayer* pada cerobong asap
2. Pencegahan terhadap media transmisi dan udara ambien.
   Memakai metode basah yaitu penyiraman lantai dan pengeboran basah (*wet Drilling*) dengan alat berupa *scrubber, electropresipitator,* dan ventilasi umum. Ataupun juga dengan penanaman pohon atau reboisasi.
3. Pencegahan terhadap tenaga kerja yang terpapar.
   Dengan menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) berupa masker.
4. Pencegahan terhadap penderita atau orang yang terpapar.
   Melalui pemeriksaan dan pengobatan serta rehabilitasi terhadap korban.

2.3.1 Debu Silika

Silika adalah campuran mineral yang terdiri dari satu atom silikon (Si) dan dua atom Oksigen (O_2). Apabila silika tersusun dengan model yang sama maka akan membentuk kristal silika (*Crystalyne Silica*), dengan nama yang berbeda-beda seperti *quartz, cristobalite, tridymite, faujasite, melanophlogite, moganit, coesite, stishovite, seifertite* dll.

Debu silika sangat berbahaya bagi manusia, karena jika terpapar debu ini secara terus menerus dapat menyebabkan penyakit silikosis. Sifat silika yang tajam (seperti kaca) dapat melukai dinding paru-paru maupun organ lainnya.



Gambar 2.9 Penderita Silikosis
Sumber: Anonymous 2 (2013)

Silika tidak dapat diobati tapi hanya dapat dicegah. Upaya pencegahan silikosis pada tempat kerja ini dapat dilakukan dengan berbagai cara antara lain:

1. Subtitusi

   Ganti material lain yang tidak mengandung kristal silika adalah cara terbaik untuk menghilangkan bahaya.

2. *Dust Containment System*

   Memasang sistem penampung/penyerap debu seperti *bag filter*, *scrubber*, *dust collector*, dll

3. Metode basah

   Pekerjaan pemotongan batu tahan api dapat menimbulkan debu silika, oleh karena itu gunakan metode basah. Basahi *cutting wheel* dan media yang dipotong dengan air untuk mengurangi paparan debu di area kerja.

4. Ventilasi

   Memasang *exhaust ventilation* agar area kerja terbebas dari paparan debu.

5. Alat Pelindung Diri (APD)

   Menggunakan masker atau alat pelindung lainnya dan menggantinya sesuai dengan *life time* alat tersebut.

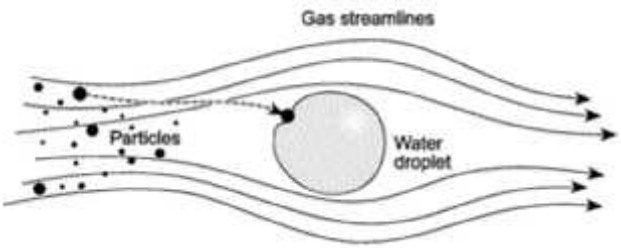
Silika merupakan debu *hydrophobic* yang tidak mudah bercampur dengan air tetapi dapat ditangakap oleh partikel air agar menghentikan persebarannya. Silika (SiO_2) mempunyai densitas 2,648 g/cm^3 dan mempunyai titik lebur 1600-1725˚C.

2.4 Metode Pengumpulan Partikel

Wet scrubber menangkap partikel debu yang kecil relatif terhadap butiran *liquid* yang besar. Dikebanyakan *wet scrubber*, *droplet* yang dihasilkan biasanya adalah lebih dari 50µm. Ada beberapa metode pengumpulan partikel dalam *wet scrubber* diantaranya:

2.4.1 *Impaction*

Pada sistem *wet scrubber*, partikel debu cenderung untuk mengikuti *streamlne* dari arus gas, namun ketika *droplet liquid* diinjeksikan ke dalam arus gas, partikel tidak dapat selalu mengikuti *streamline* tersebut karena partikel akan menyimpang disekitar *droplet*. Massa partikel menyebabkan partikel labil dari *streamline* dan *impact* atau *menabrak droplet*.

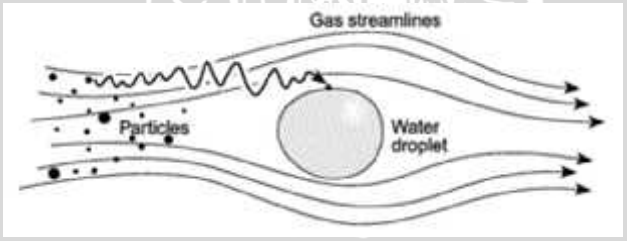


Gambar 2.10 *Impaction*
Sumber: Gerald T. Joseph. (1998)

Impaction adalah mekanisme pengumpulan yang paling dominan untuk *scrubber* yang memiliki kecepatan arus gas lebih dari 0,3 m/s (Perry 1973). *Impaction* juga akan meningkat seiring berkurangnya ukuran *droplet liquid*, karena kehadiran *droplet* yang lebih banyak di dalam *scrubber* akan meningkatkan kecenderungan partikel akan menabrak *droplet*.

2.4.2 *Difussion*

Partikel yang sangat kecil (kurang dari 0,1µm) selalu bergerak secara acak dalam arus gas. Partikel-pratikel tersebut sangat kecil sehingga seperti menyatu dengan molekul gas saat bergerak dalam arus gas. Gerakan tidak beraturan ini dapat menyebabkan partikel bertubrukan dengan *droplet* dan terkumpul. Oleh karena itu, *diffusion* adalah mekanisme pengumpulan utama untuk *wet scrubber* untuk partikel lebih kecil dari 0,1µm.

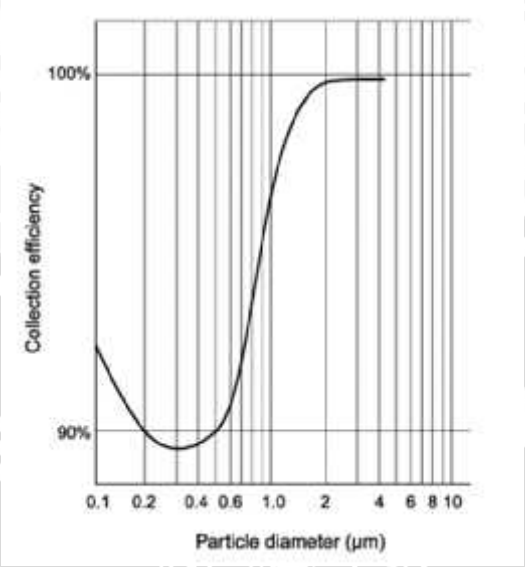


Gambar 2.11 *Difussion*
Sumber: Gerald T. Joseph. (1998)

Laju difusi tergantung pada kecepatan relatif antar partikel dan *droplet*, diameter partikel, dan diameter *droplet*. Untuk *impaction* dan *difussion collection efficiency* meningkat seiring meningkatnya kecepatan relatif (input tekanan *liquid* atau gas) dan penurunan ukuran *liquid-droplet*.

Pengumpulan polutan dengan cara difusi meningkat seiring menurunnya ukuran partikel. Mekanisme ini memungkinkan *scrubber* tertentu untuk secara efektif

membuang partikel yang sangat kecil (< 0,1µm). Dalam range partikel 0,1-1µm, tidak ada mekanisme pengumpulan yang mendominasi baik impaction atau difusi. Hubungan ini digambarkan dalam gambar dibawah ini.



Gambar 2.12 Kurva hipotesis yang menggambarkan hubungan antara ukuran partikel dan *collection efficiency* untuk *wet scrubber*
Sumber: Gerald T. Joseph. (1998)

2.4.3 Mekanisme Pengumpulan Lainnya

Mekanisme pengumpulan lainnya adalah:

1. *Electrostatic attraction*

   Partikel dan *droplet* menjadi saling berlawanan dan tertarik satu sama lain

2. Kondendsasi

   Ketika gas panas menjadi dingin dengan cepat, partikel dalam arus gas dapat bertindak sebagai inti kondensasi, dan akhirnya semakin besar.

3. Gaya sentrifugal

   Bentuk dari sistem yang menyebabkan arus gas berputar dalam gerakan spiral dapat menyebabkan partikel yang besar terlempar ke dinding sistem.

4. Gravitasi

   Partikel yang cukup besar dan bergerak lambat akan jatuh dan terkumpul dengan sendirinya.

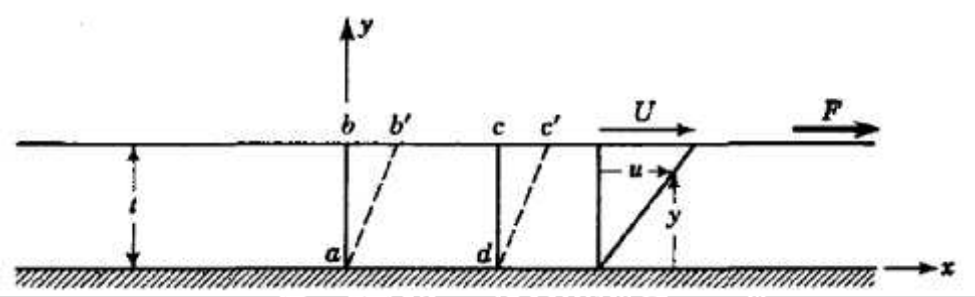
Liquid to Gas Ratio atau rasio perbandingan cairan dan gas (L/G) juga mempengaruhi pengumpulan partikel. Jumlah perbandingan yang tepat antara cairan dan gas akan berpengaruh kepada efisiensi *scrubber*. Kebanyakan *scrubber* beroperasi dengan rasio L/G 0,4-1,3 l/m^3 (Brady and Legatski 1977). Rasio kurang dari 0,4 tidak

cukup untuk mengumpulkan partikel-partikel debu. Namun jika rasio lebih dari 1,3 biasanya tidak mengalami peningkatan yang signifikan dari efisiensi pengumpulan partikel.

2.5 Fluida

2.5.1 Definisi Fluida

Fluida adalah suatu zat yang berubah bentuk secara terus-menerus (kontinyu) bila terkena gaya geser sekecil apapun (Streeter, 1958:4), fluida dapat pula didefinisikan sebagai zat yang dapat mengalir bila terjadi perbedaan tekanan. Gaya geser adalah komponen gaya yang menyinggung permukaan dan jika dibagi dengan luas permukaan tersebut menjadi tegangan geser rata-rata pada permukaan itu.



Gambar 2.13 Deformasi elemen fluida akibat adanya tegangan geser
Sumber : Streeter (1958:4)

Fluida memiliki berbagai sifat atau properties yang sangat penting dalam aplikasinya. Sifat-sifat yang dimiliki fluida diam yaitu kerapatan (ρ), berat jenis (γ), volume jenis (v), *specific gravity* (s) dan kompresibilitas. Sedangkan untuk fluida bergerak ada satu sifat yang penting yaitu viskositas.

Kerapatan suatu zat (ρ) adalah perbandingan massa dan volume zat tersebut, sehingga nilai kerapatan dapat diukur melalui pengukuran massa dan volumenya. Satuannya adalah kg/m^3. Berat jenis (γ) adalah berat zat tiap satuan volume, berat jenis bergantung pada wadah dimana zat tersebut memenuhinya serta besarnya gravitasi. Satuannya adalah N/m^3. Volume jenis (v) adalah volume yang ditempati oleh massa fluida tiap satu satuan massa. *Specific gravity* (s) adalah perbandingan antara massa jenis dari suatu cairan tertentu dengan massa jenis air. Kompresibilitas adalah ukuran perubahan volume suatu benda dikarenakan perubahan tekanan yang dialami benda tersebut.

Viskositas (μ) adalah sifat fluida yang menunjukkan kemampuan fluida tersebut menahan gaya geser. Viskositas terjadi karena adanya interaksi antara molekul-molekul cairan. Hukum viskositas Newton menyatakan bahwa untuk laju perubahan bentuk sudut fluida yang tertentu maka tegangan geser berbanding lurus dengan viskositas. Hukum viskositas Newton dirumuskan pada persamaan berikut :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \qquad \text{(Streeter, 1958:4) (2.1)}$$

Dengan : τ = Tegangan geser (N)

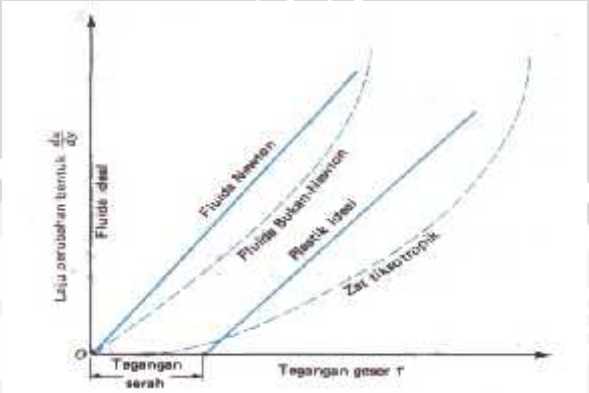
μ = Viskositas (Ns/m^2)

$\frac{du}{dy}$ = Laju perubahan fluida (m^2/s)

Viskositas (μ) disebut juga viskositas mutlak atau viskositas dinamik. Sedangkan viskositas kinematik (ν) merupakan perbandingan antara viskositas dinamik (μ) terhadap massa jenis (ρ) fluida tersebut.

2.5.2 Klasifikasi Fluida

Klasifikasi fluida berdasarkan hukum viskositas Newton dikelompokkan sebagai fluida Newtonian dan fluida non-Newtonian. Dalam fluida Newtonian terdapat hubungan linier antara besarnya tegangan geser yang terjadi dengan laju perubahan bentuk yang diakibatkan viskositas dinamik yang konstan. Contoh dari fluida Newtonian adalah air, oli, dan udara. Sedangkan pada fluida non-Newtonian terdapat hubungan tak linier antara besarnya tegangan geser yang diterapkan dan laju perubahan bentuk. Contoh dari fluida non-Newtonian adalah lumpur, pasta gigi, dan *mayonnaise*.

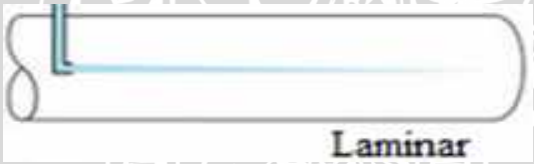


Gambar 2.14 Fluida Newtonian dan fluida Non-Newtonian
Sumber : Streeter (1958 : 5)

Berdasarkan kekentalannya, fluida dibagi menjadi aliran *inviscid* (tidak viskos) dan aliran *viscous* (viskos). Aliran *inviscid* adalah aliran dimana viskositas fluidanya dianggap nol, sehingga fluida tersebut tidak memberikan tahanan sama sekali terhadap tegangan geser yang terjadi padanya. Aliran viskos adalah aliran dimana viskositasnya tidak sama dengan nol. Aliran viskos ini kemudian dibagi menjadi aliran laminar dan turbulen.

Aliran laminar adalah aliran fluida yang memiliki *streamline* teratur dan tidak saling berpotongan antara satu dengan yang lain dan bergerak mengikuti arah kontur dari saluran. Pada aliran laminar lapisan – lapisan fluida bergerak secara lancar dan teratur, dengan tidak ada pencampuran partikel fluida dalam skala besar antara lapisan – lapisan fluida.

Fluida memiliki aliran laminar ketika fluida bergerak dengan kecepatan rendah dan memiliki viskositas yang tinggi. Pada aliran laminar kecenderungan untuk turbulensi diredam oleh gaya viskos yang memberikan tahanan terhadap gerakan relatif lapisan fluida yang berdekatan. Pada laju aliran rendah, aliran laminar tergambar sebagai filamen panjang yang mengalir sepanjang aliran.



Gambar 2.15 Aliran Laminer.
Sumber: Anonymous 3 (2013)

Aliran turbulen adalah aliran fluida dimana *streamline* bergerak secara acak ke segala arah dan saling berpotongan antara satu dan yang lain. Hal ini dikarenakan pada aliran turbulen memilki partikel – partikel fluida yang bergerak secara acak dengan saling bertukar momentum dan partikel antar lapisan fluida yang berdekatan, sehingga fluida bergerak ke segala arah, dan terjadi pembauran aliran fluida. Hal tersebut oleh Osborne Reynold digambarkan sebagai bentuk fluida yang bercampur dalam waktu cepat yang selanjutnya memecah dan menjadi tidak terlihat sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8.

Gambar 2.16 Aliran Turbulen.
Sumber: Anonymous 4 (2013)

Parameter yang menunjukkan ciri – ciri pola aliran adalah bilangan Reynold. Bilangan Reynold merupakan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskos pada aliran fluida. Hal ini dirumuskan dalam persamaan berikut :

$$\mathrm{Re} = \frac{V.D}{\nu} \qquad \text{(Streeter, 1958:165) (2.2)}$$

Dengan : V = Kecepatan aliran fluida (m/s)

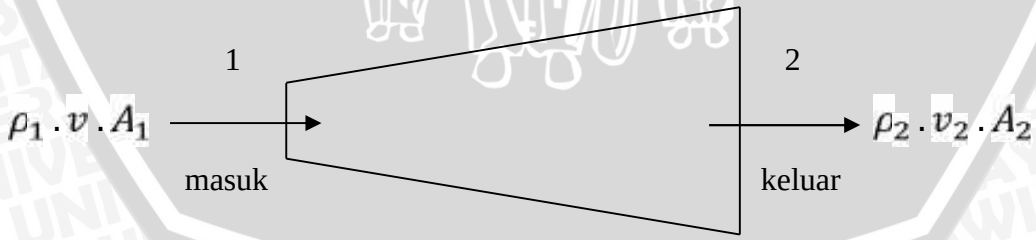
D = Ukuran linier yang mewakili skala panjang dalam aliran (m)

ν = Viskositas kinematik (m^2/s)

Untuk aliran laminar mempunyai bilangan Re kurang dari 2300. Untuk aliran transisi berada pada pada bilangan Re 2300 – 4000 biasa juga disebut sebagai bilangan Reynolds kritis, sedangkan aliran turbulen mempunyai bilangan Re lebih dari 4000.

2.5.3 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas merupakan bentuk turunan dari hukum kekekalan massa. Hukum kontinuitas menyatakan pada kondisi aliran *steady* massa fluida yang melalui semua bagian dalam arus fluida per satuan waktu adalah sama. Hal ini berarti massa fluida per satuan waktu yang mengalir pada sembarang titik adalah konstan.



Maka persamaan kontinuitas dinyatakan dengan rumus :

$$\dot{m} = \rho . v . A$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho_1 . v_1 . A_1 = \rho_2 . v_2 . A_2 \qquad \text{(Streeter, 1958:91) (2.3)}$$

Keterangan :

$\dot{m}$	= Laju aliran massa	(Kg/s)
ρ	= Massa jenis fluida	(Kg/m^3)
v	= Kecepatan aliran	(m/s)
A	= Luas penampang aliran	(m^2)

Untuk fluida – fluida *incompressible*, maka ρ = konstan, jadi persamaan kontinuitas dapat ditulis dalam persamaan berikut :

$$Q = v_1 . A_1 = v_2 . A_2 \qquad \text{(Streeter, 1958:92) (2.4)}$$

Dengan :

Q	= Debit fluida	(m^3/s)
V	= Kecepatan aliran	(m/s)
A	= Luas penampang aliran	(m^2)

Debit fluida merupakan besarnya jumlah fluida yang mengalir per satuan waktu. Dari persamaan kontinuitas dapat disimpulkan bahwa semakin besar debit fluida dengan luas penampang yang tetap, maka kecepatan fluida akan meningkat, begitu juga sebaliknya jika debit fluida semakin kecil dengan luas penampang yang tetap, maka kecepatan aliran fluida akan menurun

2.6 *Sprayer*

Spray nozzle adalah perangkat presisi yang memfasilitasi dispersi cair menjadi spray. Nozel yang digunakan untuk tiga tujuan: untuk mendistribusikan cairan di area, untuk meningkatkan luas permukaan cairan, dan menciptakan gaya dampak pada permukaan padat (Pagcatipunan & Schick, 2005).

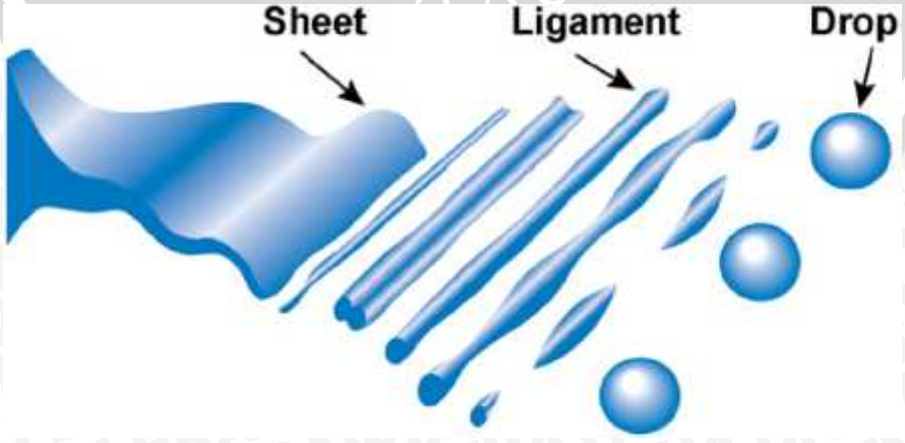
Gambar 2.17 Struktur *nozzle*
Sumber: Deutche & Poole. (1972)

Sprayer dapat menentukan karakteristik semprotan ; yaitu sudut penyemprotan, lebar penutupan, pola semprotan, dan pola penyebaran yang dihasilkan. *Nozzle* dibuat dalam bermacam-macam disain. Setiap tipe butiran cairan yang khas dihasilkan oleh *nozzle* yang khas sesuai dengan kebutuhan. Berikut ini adalah tipe-tipe *nozzle* :

1. Centrifugal *nozzle* yaitu bentuk *nozzle* yang paling banyak dijumpai, dibuat dengan sudut penyemprotan yang lebar dan dengan berbagai model pola penyemprotan dan kapasitas.
2. Flooding *nozzle* yaitu menghasil semprotan dengan model semburan. *Nozzle* ini disebut juga fan spray *nozzle*.
3. Two-fluid atomizer yaitu menghasilkan *droplet* yang sangat halus dan menghindarkan pemborosan cairan, tetapi membutuhkan tenaga yang lebih besar daripada tipe-tipe yang lain.
4. Rotary atomizer yaitu digunakan untuk pekerjaan besar, menyemprotkan cairan dalam jumlah besar dengan gaya sentrifugal dan mempunyai pola penyebaran 360º.

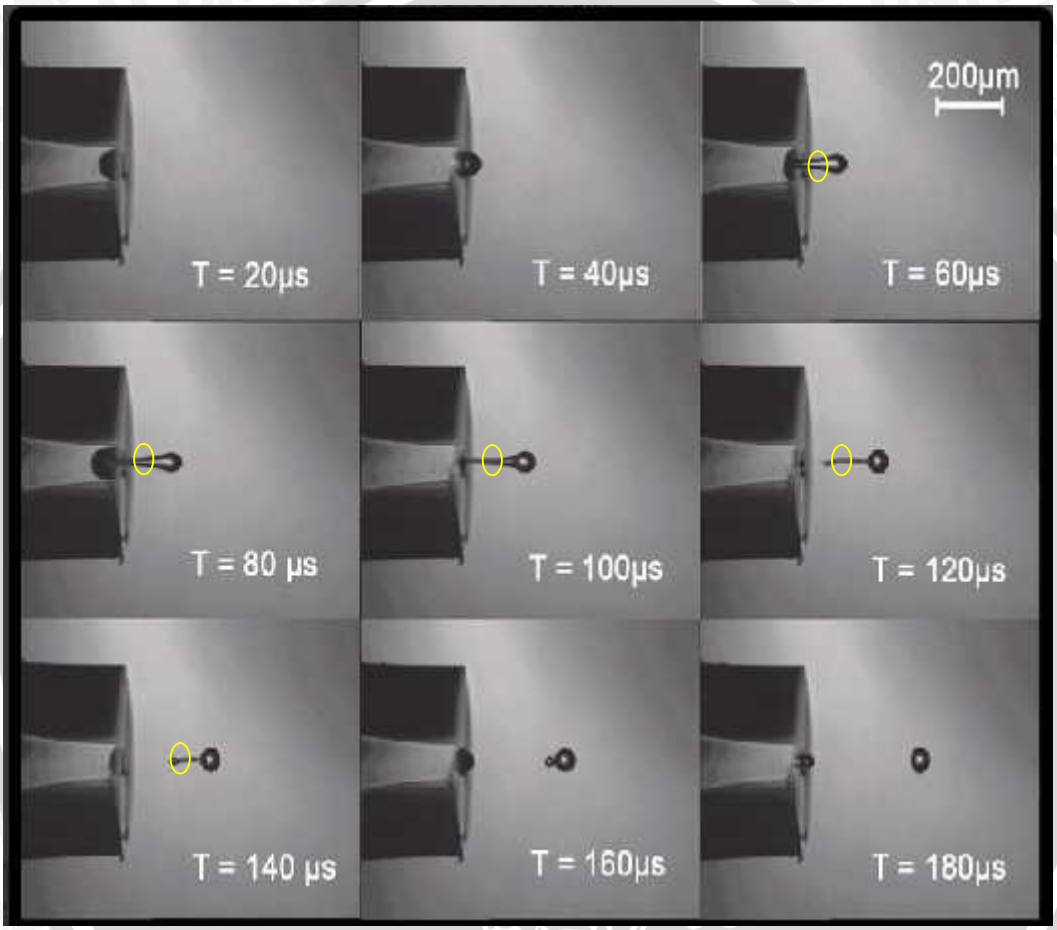
2.7 Mekanisme Pembentukan *Droplet*

Untuk memecahkan aliran fluida menjadi *droplet*, diperlukan energi. Pada *nozzle* biasanya energi ini berbentuk energi tekanan dari pompa. Energi tekanan dikonversikan menjadi energi kecepatan dengan mengalirkan fluida melalui beberapa alur atau slot yang sempit dalam *nozzle*. Fluida keluar dari orifice dalam bentuk *circular jet, flat sheet* atau *conical sheet* tergantung pada design orifice. Selanjutnya muncul gangguan pada *sheet* atau aliran fluida sehingga terbentuk ligamen dalam aliran fluida. Selanjutnya ligamen ini hancur dengan mekanisme *breakup* dan terbentuklah *droplet*.



Gambar 2.18 Mekanisme Pembentuka Droplet
Sumber: *Chemical Engineering Science* (2008:3825)

Pada gambar 2.19 ligamen (lingkaran kuning) mengalami gangguan dan kemudian pecah. Ligamen telah terpecah bergerak menjauhi *nozzle* dan berubah bentuk pada gambar berikutnya. Dari gambar tersebut dapat dikatakan bahwa ligamen adalah lembaran fluida yang sangat tipis. Dari ligamen yang terpecah akan terbentuk *droplet* dengan ukuran besar, selanjutnya *droplet* yang besar akan pecah menjadi *droplet* kecil. Ketebalan dan panjang ligamen akan mempengaruhi ukuran *droplet* (Kurniawan, 2007)



Gambar 2.19 Proses Pembentukan *Droplet* dari ligamen
Sumber: http://www.microdrop.de/microdrop.html

Mekanisme pemnetukan *droplet* ditentukan oleh tiga parameter non dimensional yang terdiri dari *Reynold number, Weber number,* dan *Ohnesorge number*. Persamaan dari tiga bilangan non dimensional dapat dilihat pada persamaan berikut:

1. *Reynold Number* :

$$Re = \frac{\rho v}{\mu} d$$ (Helmut, K.C, 2006 : 3)

Parameter ini penting pada aliran yang dipengaruhi oleh viskositas.

2. *Weber Number* :

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma}$$ (Helmut, K.C, 2006 : 3)

Parameter ini penting pada aliran yang dipengaruhi oleh tegangan permukaan.

3. *Ohnesorge Number* :

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}} = \frac{\sqrt{We}}{Re}$$ (Helmut, K.C, 2006 : 3)

Parameter ini menunjukkan hubungan antara viskositas dengan tegangan permukaan terhadap pola aliran, shingga *ohnesorge number* dapat dijadikan parameter penghubung antara *reynold number* dengan *weber number* dalam bentuk persamaan

$$We = (Oh^2 . Re^2)$$ (Helmut, K.C, 2006 : 3)

Dimana:

ρ : Densitas Fluida (kg/m^3)

V : Kecepatan Fluida (m/s)

μ : Viskositas Dinamik (Ns/m^2)

d : Diameter *orifice* pada *nozzle* (m)

σ : Tegangan Permukaan fluida (N/m^2)^{0,5}

Mekanisme pembentukan *droplet* ini dipengaruhi beberapa hal diantaranya kecepatan jet, diameter orifice, tekanan fluida, dll. Kecepatan jet berpengaruh pada karakter dari ligament, jika semakin cepat maka ligament yang terbentuk akan semakin panjang dan tebal. Ligament yang semakin panjang dan tebal ini semakin susah untuk dipecah sehingga *droplet* yang terbentuk akan semakin besar. Kecepatan ini nantinya berpengaruh pada jenis aliran dalam *sprayer*.

2.7.1 *Jet Breakup length*

Jet breakup adalah salah satu mekanisme pembentukan *droplet* air dimana terjadi fase pecahnya kolom air menjadi ligamen yang kemudian pecah menjadi *droplet* air akibat adanya gangguan dari luar (udara). Kecepatan jet yang keluar dari *nozzle* semakin besar menyebabkan *Jet breakup length* akan semakin panjang hal ini menunjukkan bahwa ligamen menjadi lebih panjang dan tebal sehingga udara luar lebih sulit untuk memecah kestabilan air sehingga droplet yang terbentuk akan semakin besar.

Untuk mencari *jet breakup length* ini dapat dicari dengan perumusan sebagai berikut:

Untuk aliran laminar:

$$L = 19{,}5\, d_0 x\, We_L^{0{,}5}\ 1 + 3O\square^{\ 0{,}85}$$

(Grant. R. P, 1996 : 669-678)

Menentukan titik kritis atas transisi laminar dan turbulen:

$$Re_{Crit} = 3{,}25O\square^{-0{,}28}$$

(Grant. R. P, 1996 : 669-678)

Untuk aliran Turbulen:

$$L = 8.51 d_0 We_L^{0{,}32}$$

(Grant. R. P, 1996 : 669-678)

Dimana:

L : *jet breakup length* (m)

d_0 : *nozzle* diameter (m)

2.8 Hipotesa

Semakin besar debit *sprayer* yang disemprotkan dengan dimensi *sprayer* yang tetap maka semakin tinggi kecepatan *sprayer* yang berakibat *reynold number dan weber number* semakin tinggi. Hal ini menyebabkan panjang *jet breakup* semakin tinggi dan ligament yang terbentuk akan semakin panjang dan tebal sehingga *droplet sprayer* semakin besar. Hal ini mengakibatkan *impaction* pada partikel kepada *droplet* akan meningkat karena *liquid droplet* akan semakin besar dan partikel akan cenderung banyak tertangkap oleh *droplet*. Oleh karena itu kapasitas *dust* yang tertangkap akan semakin banyak.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian yang dilakukan menggunakan metode eksperimen (*True Experimental Research*). Eksperimen yang dilakukan adalah dengan mengamati dan mengolah data dari model fisis guna mengembangkan desain *scrubber* yang lebih optimal.

3.2 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus 2013 sampai November 2013 di Laboratorium Fluida Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Eksperimen pada model *scrubber*

1. Variabel Bebas

   Variabel bebas adalah variabel yang ditetapkan oleh peneliti dan ditentukan sebelum penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah variasi debit sprayer dan ukuran partikel debu silika. Pada penelitian ini debit air pada sprayer divariasikan sebesar 324 l/jam, 486 l/jam, 648 l/jam, 810 l/jam 1053 l/jam. Debit *sprayer* ini didapatkan dari rasio perbandingan *liqud to gas* 0,4 l/m^3, 0,6 l/m^3, 0,8 l/m^3, 1 l/m^3, 1,3 l/m^3. Serta debu silika divariasikan sebesar 50 µm, 70µm dan 100µm.

2. Variabel Terkontrol

   Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dibuat konstan dalam suatu penelitian. Variabel terkontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah *flow rate* udara *Scrubber* sebesar 810 m^3/jam dan *flow rate* debu silika 15 x 10^{-3} m^3/jam.

3. Variabel Terikat

   Variabel terikat adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Pada penelitian ini variabel terikatnya adalah kapasitas *dust* yang tertangkap.

3.4 Peralatan dan Bahan Penelitian

3.4.1 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Blower*

   Alat yang digunakan untuk mengalirkan udara di dalam *scrubber*.

   Spesifikasi motor *blower*:

   Tipe : U 7181 No 7076-2977
   Model : 4C 668A
   Daya : 1/6 Hp
   Putaran *Max* : 1600 RPM
   Voltase : 115/230 V
   Ampere : 2,6 - 1,3

Gambar 3.1 *Blower*

2. Anemometer

   Alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan udara.

   Spesifikasi anemometer:

   Merk : Lutron
   Model : LM-8000
   Measuring range : -10~45°C
   Wind speed measuring range : 0.3~30 m/s
   °C/°F Selection
   Accuracy of temperature : ± 2°C
   Accuracy of wind speed : ± 5%
   Resolution : 0.1 m/s 0.2°C
   Measuring unit : M/s, Ft/min Knots, Km/hr, Mph

Gambar 3.2 Anemometer

3. Pompa

   Alat yang digunakan untuk memompa air menuju *sprayer*.

   Spesifikasi pompa:

   Merk : Interdab

   Model : No XHM/5B

   Debit : 60 l /min

   Hmax : 22 m

   H_s max : 8 m

   n : 2850 rpm

   Frekuensi : 50 Hz

   Daya : 0.75 kW

Gambar 3.3 Pompa

4. Timbangan

   Alat yang digunakan untuk menimbang debu.

Gambar 3.4 Timbangan Elektrik

5. Alat Pengguncang Rotap

   Alat yang digunakan untuk mengayak pasir silika agar sesuai dengan ukuran yang diinginkan.

Gambar 3.5 Alat Pengguncang Rotap

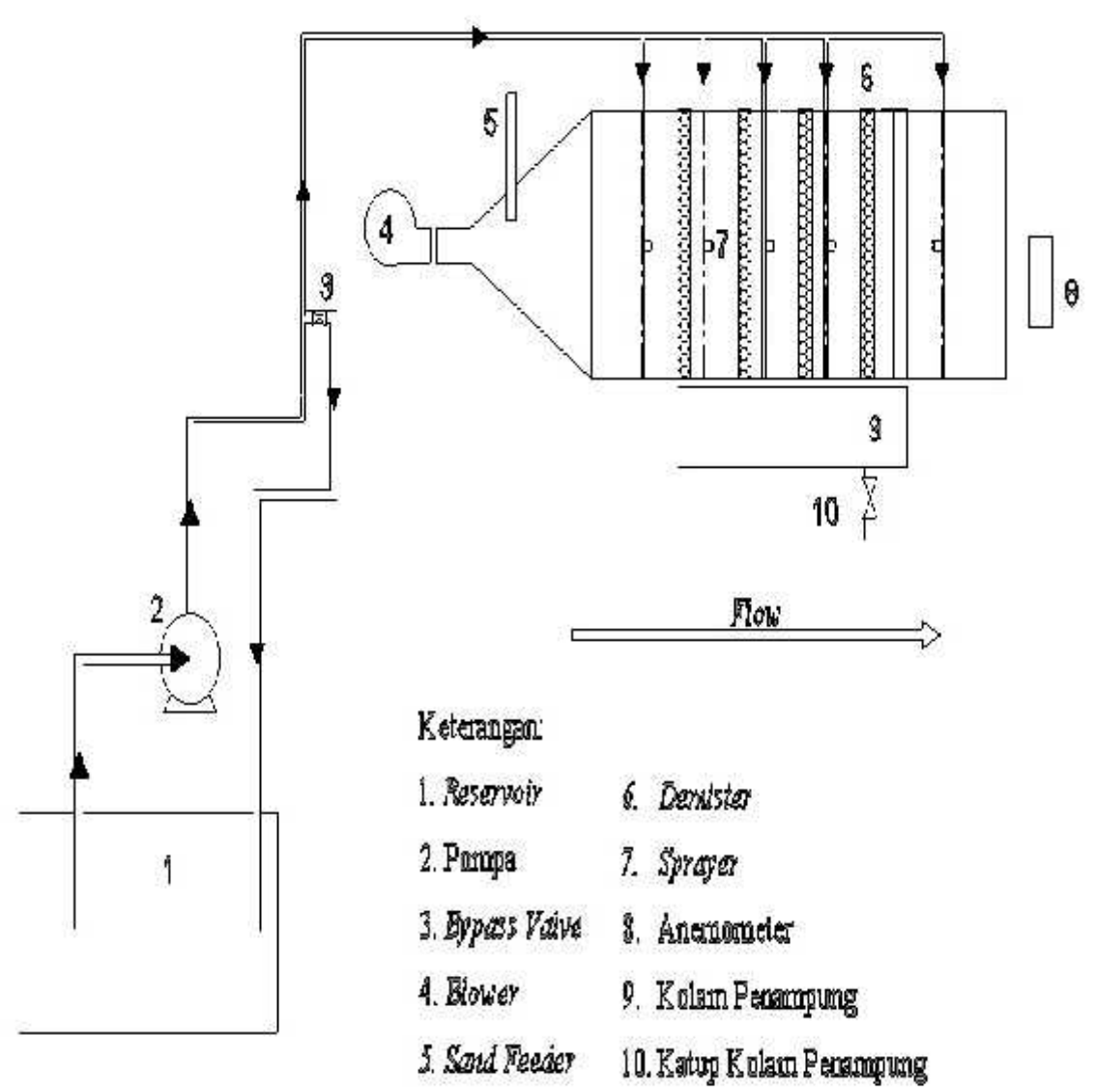
3.4.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Acrylic tebal 3mm
2. Filter (kawat nyamuk)
3. Pipa PVC
4. *ball valve*
5. *Nozzle*
6. Selang
7. Pasir silika (50 µm, 60µm dan 70µm)
8. Lem pipa PVC

9. Lem G
10. Seal tape

3.5 Instalasi Penelitian



Gambar 3.6 Skema Instalasi Penelitian

3.6 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
2. Observasi Lapangan

   Observasi lapangan di Pabrik Phonska II PT. Petrokimia Gresik untuk mendapatkan data-data yang digunakan untuk pembuatan model fisis alat.
3. Pembuatan model fisis *scrubber*

4. Eksperimen dan pengambilan data pada model fisis *scrubber*.
5. Mengolah dan menganalisa data debit *sprayer* dan *dust*.

3.7 Metode Pengambilan Data

3.7.1 Persiapan Penelitian

1. Menyiapkan model fisis alat *Tail Gas Scrubber* dan *dust*
2. Debu di panaskan untuk menghilangkan kadar airnya kemudian melakukan pengujian dengan menggunakan mesin pengguncang rotap agar *dust* sesuai dengan ukuran yang diinginkan.
3. Tahap pertama debu berukuran 50 µm diletakkan pada *sand feeder*. Kemudian berganti 70 µm, dan 100 µm setelah melalui tahap pengujian dengan debit *sprayer* yang berbeda-beda

3.7.2 Proses Pengambilan Data

1. Mengatur debit sprayer sesuai dengan variasi yang dibutuhkan dengan mengatur bukaan katup. Dimulai dari debit 324 l/jam. Perhitungan debit dilakukan dengan menampung air yang keluar pada *sprayer* menggunakan gelas ukur.
2. Nyalakan *blower*. Tunggu sampai alirannya *steady*.
3. Buka katup *sand feeder* sehingga *dust* berukuran 50 µm turun dan dapat dihembuskan oleh *blower*. *Blower* dinyalakan sampai dengan waktu 1 menit dari waktu pembukaan katup *sand feeder*.
4. Setelah selesai tutup katup *sand feeder*, *blower* dan terakhir pompa
5. Pasir yang tersangkut di *demister* dibersihkan agar turun ke kolam penampung. Pasir yang berada pada kolam penampung didiamkan sampai pasir mengendap. Lalu air dikeluarkan dengan meggunakan filter agar pasir tidak ikut keluar.
6. Pasir dipanaskan agar kandungan airnya hilang lalu ditimbang.
7. Mengulangi langkah 1 sampai 5 dengan variasi ukuran *dust* yang berbeda.
8. Mengulangi langkah 1 sampai 6 dengan variasi debit sprayer yang berbeda
9. Pengolahan data berat *dust* untuk mendapatkan pengaruhnya dengan debit sprayer

3.8 Rancangan Tabel Penelitian

Rancangan tabel penelitian pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

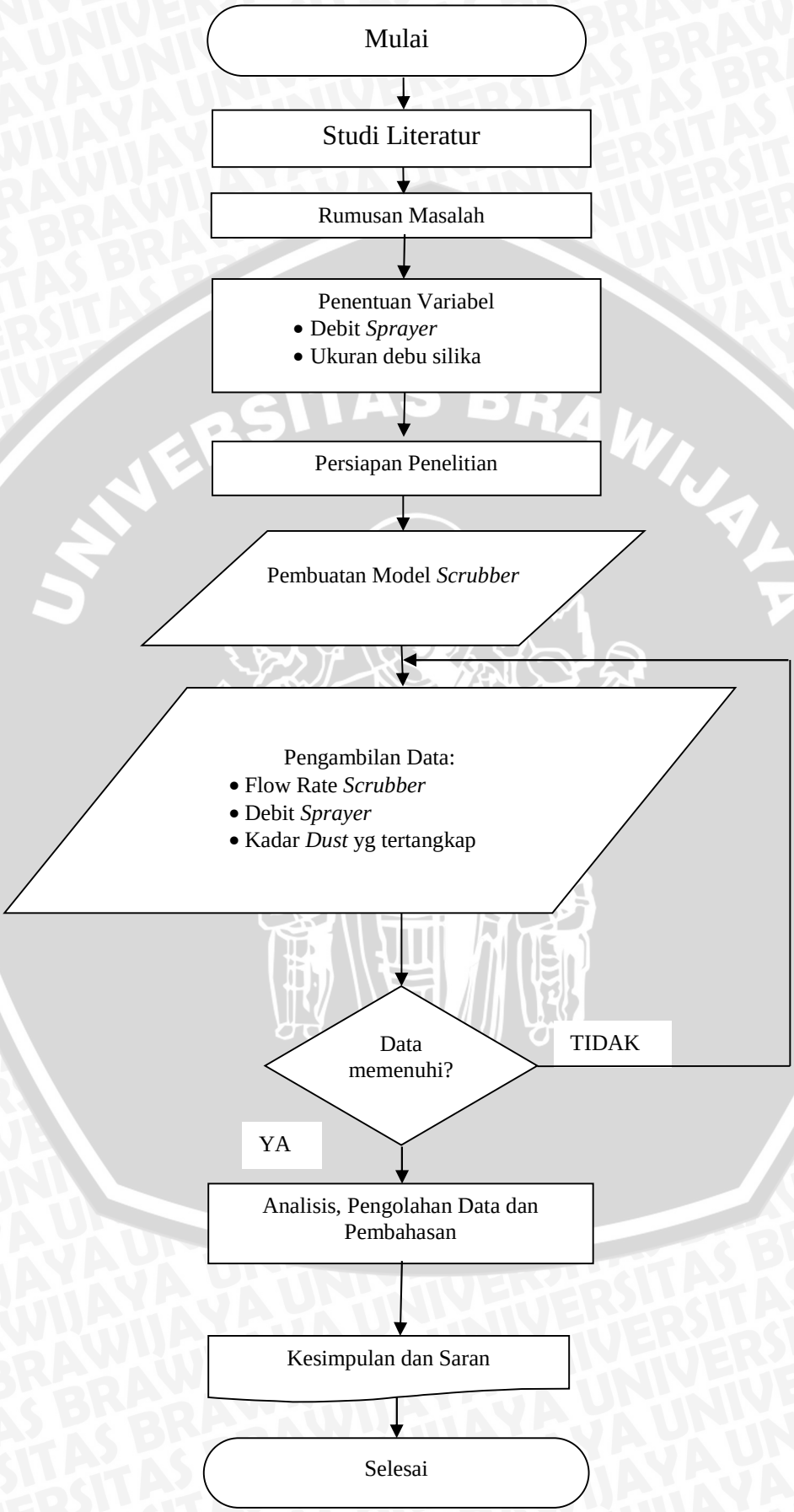
Tabel 3.1 Tabel rancangan pengolahan data

NO	Debit Sprayer (l/jam)	Ukuran Debu Silika yang Direduksi (gram)		
		50 µm	60 µm	70 µm
1	324			
2	486			
3	648			
4	810			
5	1053			

3.9 Rencana Analisis Data

1. Mendapatkan model *scrubber*.
2. Melakukan eksperimen pada model *scrubber*.
3. Analisa grafik hubungan antara debit *sprayer* dengan kapasitas *dust* yang tertangkap.

3.10 Diagram Alir Penelitian



BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Data hasil Pengujian

Data hasil pengujian pengaruh debit sprayer 324 l/jam, 486 l/jam, 648l/jam, 810l/jam, dan 1053 l/jam dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian

NO	Debit Sprayer (l/jam)	Ukuran Debu Silika yang Direduksi (gram)		
		50 µm	70 µm	100 µm
1	324	268	276	280
2	486	294	297	320
3	648	316	320	336
4	810	320	328	338
5	1053	320	328	339

Pengujian ini menggunakan debit debu (Q) 4,14 x 10^{-6} m^3/s. Data ini didapat dari:

$$Q = \frac{Volume\ sand\ feeder}{waktu\ pengujian} = \frac{\pi\, r^2\, t}{60\ s}$$

$$Q = \frac{3.14\ x\ 4{,}45^2 cm\ x\ 4\ cm}{60\ s} = 4{,}14\ x\ 10^{-6}\frac{m^3}{s} = 15\ x\ 10^{-3}\frac{m^3}{jam}$$

Dan massa alirnya (ṁ) adalah 5,761 x 10^{-3} kg/s. Data ini didapatkan dari:

$$\dot{m} = Qx\rho$$

$$\dot{m} = 4{,}14\ x\ 10^{-6}\frac{m^3}{s}\ x\ 1390\ \frac{kg}{m^3} = 5{,}761\ x\ 10^{-3} kg/s$$

massa debu silika

$$m = \rho\ x\ V$$

$$m = 1390\ x\ 0{,}000248 = 0{,}345\ kg = 345\ gram$$

4.1.2 Pengolahan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari *Re number*, *We number*, *Oh number*, dan *jet breakup length* (L) . Berikut ini adalah contoh perhitungan data hasil penelitian untuk debit air 648 l/jam atau ratio L/G 0,8 l /m^3

Data-data penelitian:

- Ratio L/G : 0.8 l/m^3
- Densitas air (ρ) 27˚C : 996.4 kg/m^3 (lampiran 1)
- Viskositas dinamik air (μ_a) 27˚C : 0,8622 x 10^{-3} Ns/m^2 (lampiran 1)
- Tegangan permukaan air (σ_a) 27˚C : 0,072 N/m (lampiran 1)
- Kecepatan udara blower (V_b) : 10 m/s
- Luas penampang blower (A_b) : 0,0225 m^2
- Diameter *orifice* pada *sprayer* (d_s) : 0.001 m

Contoh Perhitungan data:

a. Debit Blower (Q_b)

$$Q = V \, x \, A$$

$$Q = 10 \, x \, 0{,}0225$$

$$Q = 0{,}225 \frac{m^3}{s} = 810 \; m^3/jam$$

b. Debit Sprayer (Q_a)

Berdasarkan rasio L/G = 0,8 l/m^3

$$\frac{L}{G} = \frac{Q_a}{Q_b}$$

$$0{,}8 \; l/m^3 = \frac{Q_a}{810 \; m^3/jam}$$

$$Q_a = 810 \, x \, 0{,}8$$

$$Q_a = 648 \frac{l}{jam} = 0.648 \; m^3/jam$$

Ada 10 *sprayer*, sehingga debit tiap sprayer = 0.0648 m^3/jam atau 1,8 x 10^{-5} m^3/s

c. Luas penampang *orifice* pada *sprayer* (A_s)

$$A_s = \pi \, x \, r^2$$

$$A_s = 3{,}14 \, x \, 0{,}0005^2$$

$$A_s = 0{,}0785 \, x \, 10^{-5} \, m^2$$

d. Kecepatan air (V_a)

$$V_a = \frac{Q_a}{A_s}$$

$$V_a = \frac{1{,}8\ x\ 10^{-5}}{0{,}0785\ x\ 10^{-5}}$$

$$V_a = 22{,}93\ m/s$$

e. *Reynold Number* air (*Re*)

$$Re = \frac{\rho V}{\mu}\ d$$

$$Re = \frac{996{,}4\ x\ 22{,}93}{0{,}8622\ x\ 10^{-3}}\ 0{,}001$$

$$Re = 26498{,}94$$

f. *Weber Number* air (*We*)

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma}$$

$$We = \frac{996{,}4\ x\ 22.91^2 x\ 0{,}001}{0{,}072}$$

$$We = 7276{,}24$$

g. *Ohnesorge Number* air (*Oh*)

$$O = \frac{We^{0{,}5}}{Re}$$

$$O = \frac{7276{,}24^{0{,}5}}{26498{,}94}$$

$$O = 0{,}00322$$

h. *Re critical point* (transisi antara laminar dan turbulen)

$$Re_{crit} = 3{,}25O^{-0{,}28}$$

$$Re_{crit} = 3{,}25\ x\ 0{,}00322^{-0{,}28}$$

$$Re_{crit} = 16{,}206$$

i. *Jet breakup length* (L) *turbulent flow*

$$L = 8{,}51\ x\ d\ x\ We^{0{,}32}$$

$$L = 8{,}51\ x\ 0{,}001\ x\ 7276{,}24^{0{,}32}$$

$$L = 0{,}14\ m$$

j. *Collecting Efficiency* (η)

$$\eta = \frac{m\ output}{m\ input}\ x\ 100\ \%$$

$$\eta\ 50\mu m = \frac{326}{345}\ x\ 100\% = 94\%$$

$$\eta\ 70\mu m = \frac{310}{345}\ x\ 100\% = 89\%$$

$$\eta\ 100\mu m = \frac{338}{345}\ x\ 100\% = 97\%$$

Tabel 4.2 Data hasil Pengujian *Re number* dan *We number*

NO	Debit (l/jam)	Debit (m^3/s)	Kecepatan (V) (m/s)	Re	We
1	324	0,000009	11,46	13249,47	1819,06
2	486	0,000013	16,56	19138,13	3795,32
3	648	0,000018	22,93	26498,94	7276,24
4	810	0,000022	28,03	32387,60	10869,44
5	1053	0,000029	36,94	42692,74	18886,78

Tabel 4.3 Datahasil pengujian Oh number dan *jet breakup length*

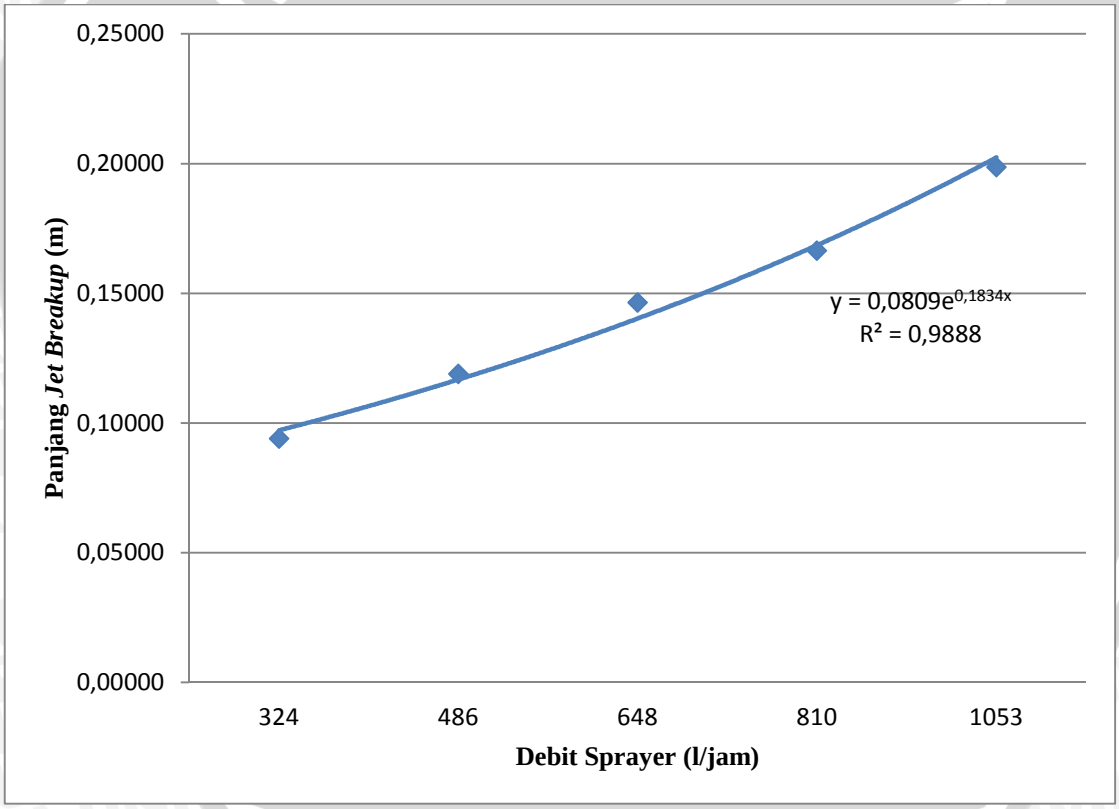
NO	Debit (l/jam)	Oh	L (m)
1	324	0.00322	0.09399
2	486	0.00322	0.11893
3	648	0.00322	0.14647
4	810	0.00322	0.16654
5	1053	0.00322	0.19875

Tabel 4.4 Data hasil pengujian *Collecting Efficiency*

NO	Debit (l/jam)	*COLLECTING EFFICIENCY*(η)		
		50 µm	70 µm	100 µm
1	324	78	80	81
2	486	85	86	93
3	648	92	93	97
4	810	93	94	98
5	1053	93	94	98

4.2 Pembahasan

4.2.1 Grafik Hubungan Antara Debit Sprayer Dengan *Jet Breakup Length* (L)



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara debit *sprayer* dengan *jet breakup length* (L)

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa dengan bertambahnya debit *sprayer* akan mempengaruhi panjang *jet breakup*. Hal ini terjadi karena debit *sprayer* yang bertambah dan dimensi *sprayer* yang tetap mengakibatkan kecepatan *sprayer* juga semakin meningkat. Karena kecepatan yang semakin meningkat ini menyebabkan fluida yang

keluar dari *sprayer* dalam bentuk *liquid sheet* (lembaran tipis) yang semakin panjang dan tebal. *Liquid sheet* yang semakin panjang ini mengindikasikan *jet breakup length* juga semakin panjang.

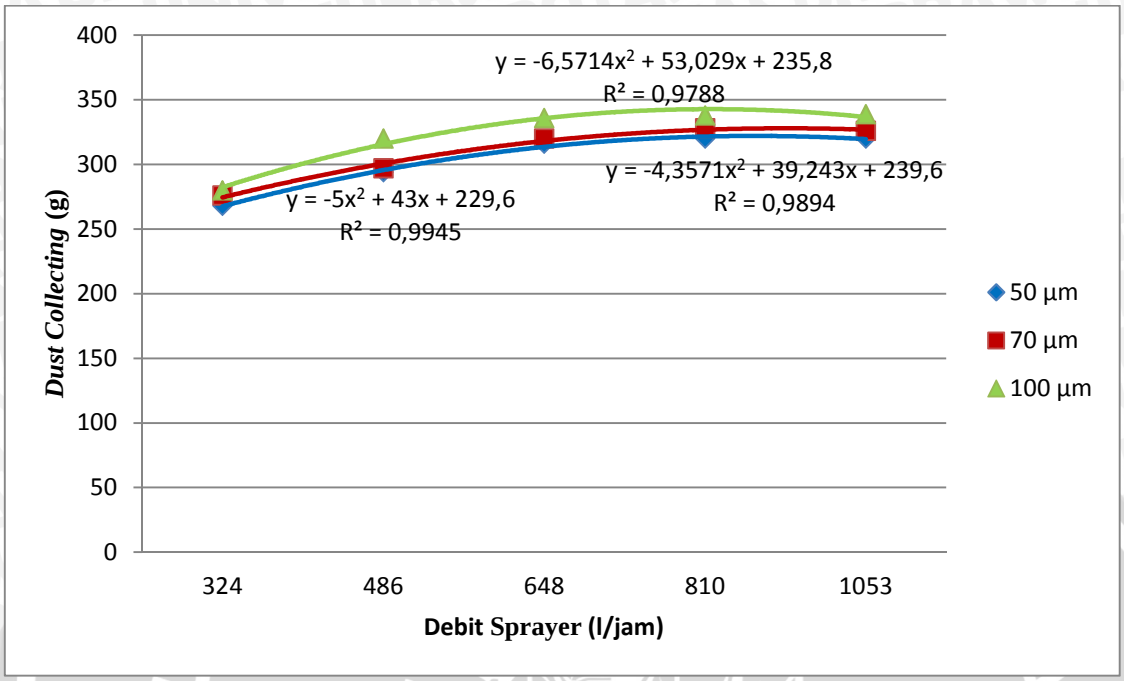
Panjang dari *jet breakup* ini digunakan sebagai parameter yang mempengaruhi ukuran *droplet*, dimana semakin besar nilai dari panjang *jet breakup* semakin lama dan sulit untuk pecah menjadi *droplet* sehingga ukuran dari *droplet* akan semakin besar. Sebaliknya jika semakin kecil nilai dari panjang *jet breakup*, maka karakter *liquid sheet* yang tebentuk semakin tipis dan pendek sehingga semakin mudah pecah dan menghasilkan ukuran droplet yang kecil. Berdasarkan grafik diatas debit 324 l/jam memiliki panjang *jet breakup* paling pendek yaitu 0,09399 m, sedangkan panjang *jet breakup* yang paling panjang ada pada debit sprayer 1053 l/jam yaitu 0,19875 m. Besarnya nilai panjang *jet breakup* ini dipengaruhi oleh nilai kecepatan yang ada dalam *weber number* yang memiliki hubungan sesuai dengan persamaan

$$L = 8{,}51\, x\, d\, x\, We^{0{,}32}$$

$$We = \frac{\rho v^2 d}{\sigma}$$

Dimana kecepatan berbanding lurus dengan *weber number*. *Weber number* itu sendiri berbanding lurus dengan *jet breakup length* (L) sehingga pengaruh utama pada penelitian ini untuk *jet breakup length* adalah kecepatan. Faktor lain penyebab besar-kecilnya *jet breakup length* adalah diameter orifice dan tegangan permukaan fluida.

4.2.2 Grafik Hubungan Debit Sprayer terhadap Reduksi Debu Silika



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara debit *sprayer* dengan reduksi debu silika

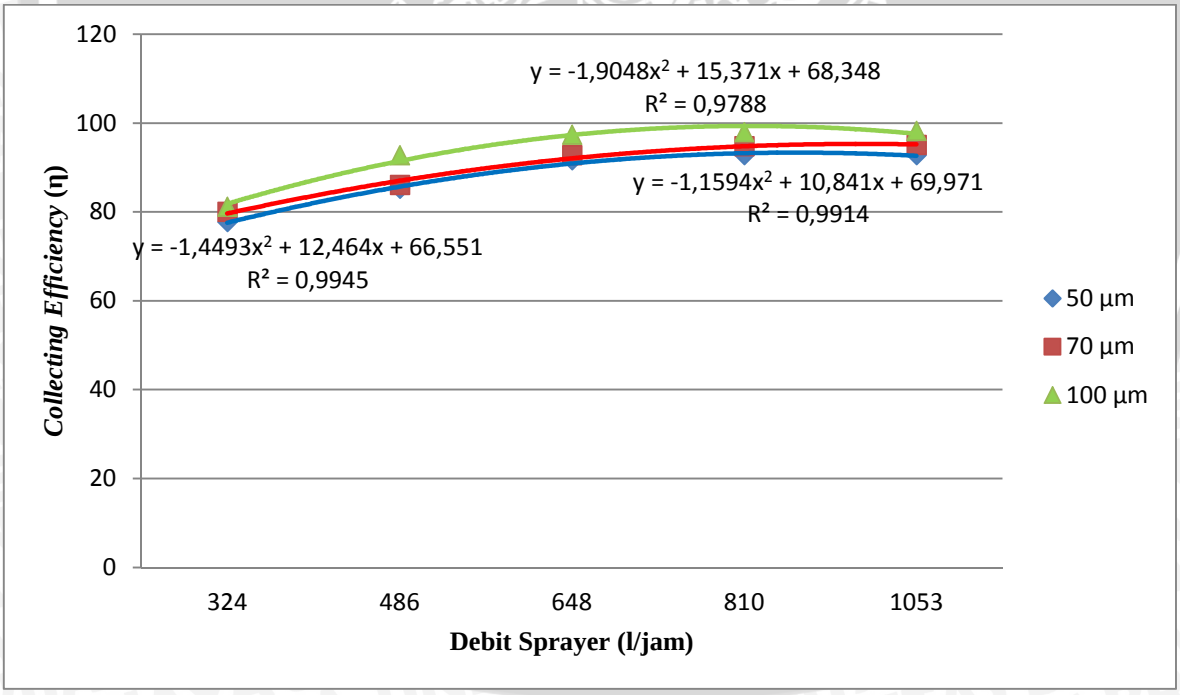
Hubungan antara debit sprayer terhadap reduksi debu silika diatas memperlihatkan bahwa debit sprayer yang semakin tinggi mengakibatkan partikel partikel debu yang ter reduksi semakin banyak. Pada *sprayer*, energi tekanan yang diberikan pompa dikonversikan menjadi energi kecepatan dengan mengalirkan fluida melalui beberapa alur yang sempit dalam nosel. Perbedaan ukuran luas penampang yang signifikan ini mengakibatkan peningkatan kecepatan yang signifikan pula. Semakin besar debit yang masuk, maka semakin besar energi tekan fluida yang dikonversikan menjadi energi kinetik. Hal ini berarti fluida akan lebih cepat melewati hambatan yang berupa *orifice* sehingga debit yang keluar akan semakin banyak pula yang berpengaruh pada *liquid sheet* yang terbentuk akan semakin tebal dan panjang. Semakin tebal dan panjang *liquid sheet* ini menyebabkan kestabilan air akan sulit dipecah. Sehingga deformasi yang terjadi pada air akan semakin kecil dan menyebabkan *droplet* yang dihasilkan semakin besar. Karena *droplet* air yang semakin besar ini dapat lebih banyak menangkap partikel-partikel debu yang bergerak.

Pada grafik diatas bisa dilihat peningkatan masa debu yang tertangkap pada ukuran 50 µm, 70 µm dan 100 µm seiring dengan bertambahnya debit *sprayer*. Pada debit 324 l/jam partikel yang dapat direduksi pada ukuran 50 µm, 70 µm dan 100 µm adalah 268 gr, 276 gr, 280 gr. Pada debit 486 l/jam untuk ukuran 50 µm, 70 µm, 100 µm secara berurutan

294 gr, 297, 320gr. Pada debit 648 l/jam partikel yang dapat direduksi 316 gr, 320 gr, 336 gr. Pada debit 810 l/jam 320 gr, 328 gr, 338 gr. Dan pada debit 1053 l/jam 320 gr, 328 gr, 339 gr.

Pada sistem *wet scrubber*, partikel debu cenderung untuk mengikuti *streamline* dari arus gas. Namun, ketika *droplet liquid* diinjeksikan ke dalam arus gas, *droplet* akan mengganggu *streamline* dari gas itu sendiri sehingga partikel akan menyimpang disekitar *droplet*. Massa partikel menyebabkan partikel menjadi labil dari *streamline* sehingga akan bergerak menabrak *droplet* air dan terjadilah *impaction*. Untuk ukuran partikel 100 µm terlihat bahwa seiring bertambahnya debit, partikel debu yang tertangkap lebih banyak daripada ukuran 50 µm maupun 70 µm. Hal ini disebabkan karena ukuran partikel yang semakin besar cenderung lebih berat, sehingga partikel debu semakin susah mengikuti *streamline* dari aliran gas dan mengakibatkan semakin banyak partikel debu yang menabrak *droplet*.

4.2.3 Grafik Hubungan antara Debit *Sprayer* dengan *Collecting Efficiency* (η)



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara debit *sprayer* dengan *Collecting Efficiency* (η)

Debit sprayer semakin meningkat maka akan meningkatkan rasio L/G (*liquid-gas ratio*). Penentuan rasio L/G ini dapat meningkatkan efisiensi pengumpulan partikel. Yang nantinya bisa dihubungkan dengan efisiensi keseluruhan sistem. Pada grafik diatas

ditunjukkan bahwa efisiensi pengumpulan partikel untuk debit 324 l/jam untuk partikel 50 µm sebesar 78%, untuk partikel 70 µm 80% dan partikel 100 µm 81%. Pada debit 486 l/jam efisiensinya berurutan dari partikel 50 µm, 70 µm, 100 µm adalah 85%, 86%, 93%. Pada debit 648 l/jam efisiensinya 92%, 93% 97%. Pada debit 810 l/jam dan 1053 l/jam efisiensinya sama 93%, 94%, dan 98%.

Pada gambar 4.3 menjelaskan bahwa semakin tinggi debit *sprayer* atau semakin tinggi rasio liquid/gas, maka efisiensi pengumpulan partikel juga akan semakin meningkat. Dan juga semakin besar ukuran partikel maka efisiensi pengumpulan partikel juga akan semakin meningkat sampai efisiensi optimumnya. Efisiensi pengumpulan partikel ini menggunakan perbandingan massa debu sesudah dan sebelum pengujian, sehingga dapat dirumuskan:

$$\eta = \frac{W_d\ output}{W_d\ input}\ x\ 100\%$$

Efisiensi pengumpulan partikel meningkat seiring dengan penambahan debit *sprayer* sampai pada debit 810 l/jam. Setelah itu efisiensi pengumpulan partikel cenderung konstan hal ini terjadi karena pada debit 810 l/jam debit air sudah mencukupi untuk menangkap partikel-partikel debu. Dan pada debit 1053 l/jam *droplet* air cenderung lebih besar dari debit lainnya. Sehingga karena massa dari droplet yang besar menyebabkan droplet lebih mudah jatuh, sehingga persebaran dropletnya kurang merata dan terbuang percuma. *Collecting efficiency scrubber* pada acuan model *scrubber* penelitan ini yaitu gas *scrubber* di Pabrik Phonska II PT. Petrokimia Gresik mencapai 95%.

Rasio L/G yang optimum pada model *scrubber horizontal spray tower* ini pada rasio 1 l/m^3 atau pada debit 810 l/jam. Pemilihan rasio liquid/gas yang tepat sangat diperlukan karena nantinya akan berhubungan dengan efisiensi sistem keseluruhan. Dan juga sangat berpengaruh pada *cost* apabila membutuhkan pompa ataupun blower dengan spesifikasi yang lebih besar.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa debit *sprayer* yang semakin bertambah maka partikel debu yang tertangkap akan semakin besar dimana:

- Partikel debu yang tereduksi paling banyak ada pada debit 810 l/jam dan 1053 l/jam atau pada rasio L/G 1 l/m^3 dan 1,3 l/m^3. Sebanding dengan efisiensi pengumpulan partikel 93% untuk partikel berukuran 50 µm, 94% untuk partikel berukuran 70 µm, dan 98% untuk partikel berukuran 100 µm
- Rasio L/G yang optimal adalah 1 l/m^3
- Semakin besar ukuran suatu partikel, maka efisiensi pengumpulan partikel akan semakin tinggi.

5.2 Saran

Penelitian ini masih menggunakan pendekatan secara geometri sebagai acuan model *scrubber*. Diharapkan pada penelitian selanjutnya pendekatan dengan menggunakan similaritas geometri, similaritas dinamik, maupun similaritas kinematik agar model *scrubber* dapat dijadikan sarana untuk mengoptimalkan kinerja *scrubber* aslinya.

Diharapkan juga penelitian selanjutnya menggunakan variasi debu yang bersifat *hydrophilic* mengingat variasi debu pada penelitian ini hanya menggunakan debu yang bersifat *hydrophobic* saja agar mendapatkan karakteristik *scrubber* yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

Brady, J. D., and L. K. Legatski. 1977. *Venturi scrubbers*. In P. N. Cheremisinoff and R. A. Young (Eds.), *Air Pollution Control and Design Handbook*. Part 2. New York: Marcel Dekker.

Ciezki, K., Helmut. 2006. *Some Aspects of the Atomization of Newtonian Fluids with an Jet Injector*, Space Propulsion institute. Germany.

Deutche & Poole. 1972. *Manual of Pesticide Application Equipment*. International Plant Protection Center, Dept. Of Agronomy. Oregon State University

Gerald T. Joseph.1998. *Scrubber System Operation Review Self-instructional manual*, North Caroline State University

Grant, R. P., and Middleman, S. 1996 Newtonian Jet Stability, *AIChE J.*,12(4):669–678

Khairuzman, Panji 2008. *Studi Eksperimental Implementasi Metodologi*. Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kim, H.T. Et al. 2001. *Particle Removal Efficiency Of Gravitational Wet Scrubber Considering Diffusion, Interception, And Impaction*. Departement Of Environmental Science And Engineering Kwangju Institute Of Science And Technology

Kristianto, P. 2002. *Ekologi Industri*. Penerbit ANDI. Yogyakarta.

Kurniawan, Aris. 2007. *Pengaruh Variasi Luas Penampang Orifice Terhadap Karakteristik Spray pada Swirl Nozzle*, Teknik Mesin Universitas Brawijaya, Malang.

Mannetje, A. Et al. 2002. *Exposure-Response Analysis And Risk Assesment For Silica And Silicosis Mortality In A Pooled Analysis Of Six Cohort.* Occup and environ Med

Pagcatipunan, C., Schick, R., *Maximize the Performance of Spray Nozzle Systems*, Chem. Engr. Progr., December 2005

Perry, J. H.1984. *Perry's Chemical Engineers Handbook 7th Edition*. Mc Graw Hill, Inc. New York

Reitz, Rolf, D. 2004. *Fluid Mechanics*. Prentice-Hall. Inc. United State Of America.

Streeter, Victor Lyle.1966.*Fluid Mechanics*.McGraw Hill Book Company, New York

Theodore, Louis.2008. *Air Pollution Control Equipment Calculations*. Wiley. Canada

White, Frank M. 1986. *Fluid Mechanics 2nd Edition*. McGraw Hill Book Company, New York

Lampiran 1

Tabel properti air

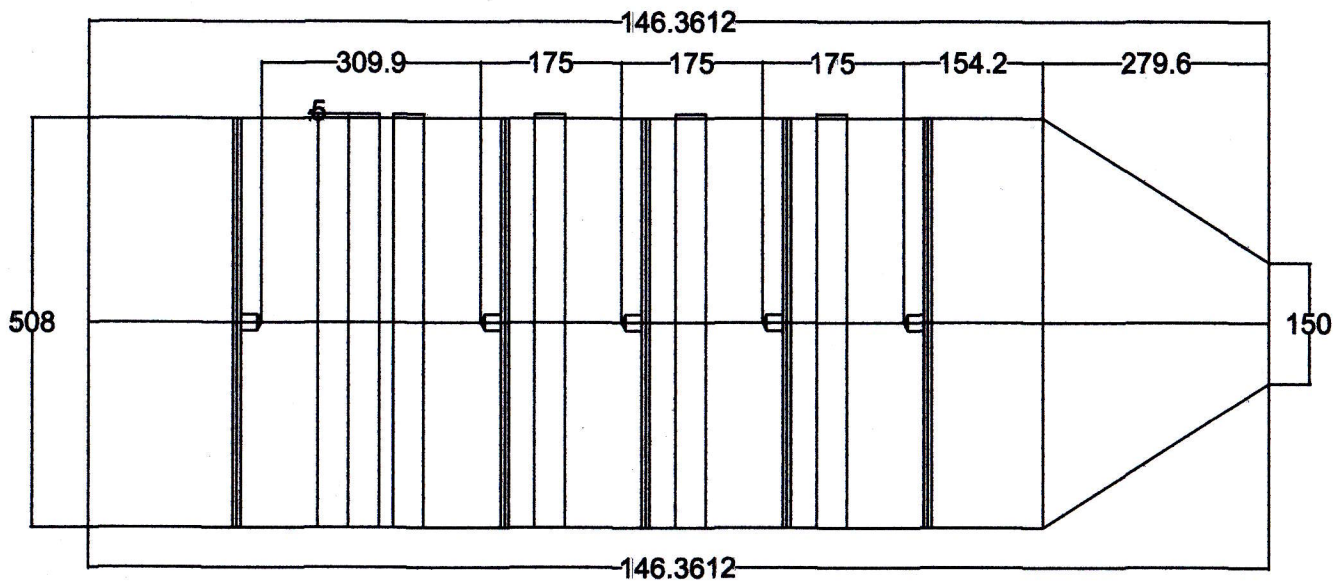
Properties of Water

Temperature, (°C)	Density ρ, (kg/m³)	Specific Weight γ, (N/m³)	Viscosity μ, (N · s/m²)	Kinematic viscosity ν, (m²/s)	Bulk modulus B, (Pa)	Surface tension σ, (N/m)	Vapor pressure (kPa)
0	999.9	9809	1.792×10^{-3}	1.792×10^{-6}	204×10^{7}	7.62×10^{-2}	0.610
5	1000.0	9810	1.519	1.519	206	7.54	0.872
10	999.7	9807	1.308	1.308	211	7.48	1.13
15	999.1	9801	1.140	1.141	214	7.41	1.60
20	998.2	9792	1.005	1.007	220	7.36	2.34
30	995.7	9768	0.801	0.804	223	7.18	4.24
40	992.2	9733	0.656	0.661	227	7.01	7.38
50	988.1	9693	0.549	0.556	230	6.82	12.3
60	983.2	9645	0.469	0.477	228	6.68	19.9
70	977.8	9592	0.406	0.415	225	6.50	31.2
80	971.8	9533	0.357	0.367	221	6.30	47.3
90	965.3	9470	0.317	0.328	216	6.12	70.1
100	958.4	9402	0.284×10^{-3}	0.296×10^{-6}	207×10^{7}	5.94×10^{-2}	101.3

(Streeter.L.V, Wylie.E.B, 1993)

Lampiran 2

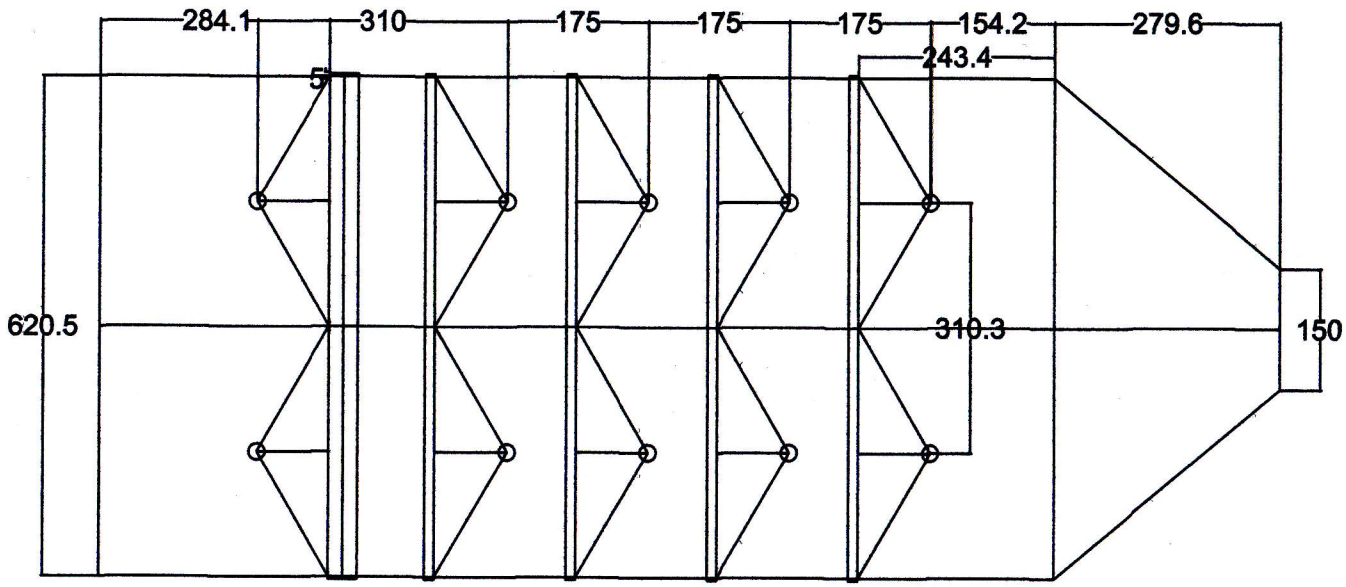
LEFT VIEW



Satuan : mm	Digambar : Ari Dwi Syahri	Keterangan:	
Skala : 1:10	N I M : 0910620036		
Tanggal : 14-11-2013	Diperiksa : Dr. Eng. Eko S, ST., MT		
FT - UB	Tampak Samping Model *Scrubber Horizontal Spray Tower*	No: 1	A4

Lampiran 3

TOP VIEW



Satuan : mm	Digambar : Ari Dwi Syahri	Keterangan:	
Skala : 1:10	N I M : 0910620036		
Tanggal : 14-11-2013	Diperiksa : Dr. Eng. Eko S, ST., MT		
FT - UB	Tampak Atas Model *Scrubber Horizontal Spray Tower*	No: 2	A4