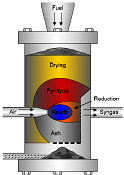
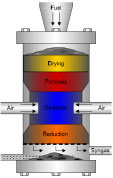
**II. TINJAUAN PUSTAKA**

* 1. **Gasifikasi**

Gasifikasi secara bahasa dapat diartikan sebagai pembuatan gas. Secara definisi yang sebenarnya, gasifikasi adalah proses konversi energi dari bahan bakar yang mengandung karbon (padat ataupun cair) menjadi gas yang disebut *syngas* (*synthesis gas*) atau gas sintetis dimana gas tersebut memiliki nilai bakar dengan cara oksidasi parsial pada temperatur tinggi. Tetapi sejauh ini teknologi ini umumnya masih stagnan pada skala penelitian karena konsumsi energinya yang terlalu besar. Namun ada beberapa negara yang telah menerapkan teknologi ini pada bidang pembangkit listrik, dimana gas yang dihasilkan oleh reaktor gasifikasi dipakai untuk menggerakkan generator. Terdapat berbagai macam tipe *gasifier* di dunia ini dan beberapanya dapat dibedakan berdasarkan :

* + Mode fluidisasi
  + Arah aliran
  + Gas yang perlukan untuk proses gasifikasi

Berdasarkan mode fluidisasinya, jenis *gasifier* dapat dibedakan menjadi 3 jenis. Gasifier tersebut adalah: gasifikasi unggun tetap (*fixed bed gasification*), gasifikasi unggun bergerak (*moving bed gasification*), gasifikasi unggun terfluidisasi (*fluidized bed gasification*), dan *entrained bed*. Berdasarkan arah aliran, *gasifier* dapat dibedakan menjadi gasifikasi aliran searah (*downdraft gasification*), gasifikasi aliran berlawanan (*updraft gasification*) dan gasifikasi aliran menyilang (*crossdraft gasification*). Pada gasifikasi *downdraft*, arah aliran gas dan arah aliran padatan adalah sama - sama ke bawah. Pada gasifikasi *updraft*, arah aliran padatan ke bawah sedangkan arah aliran gas mengalir ke atas. Sedangkan gasifikasi *crossdraft* arah aliran gas dijaga mengalir mendatar dengan aliran padatan ke bawah.



1. *Updraft Gasifiers* b. *Downdraft Gasifiers* c. *Crossdraft gasifiers*

**Gambar 2.1** Jenis gasifikasi unggun bergerak(*gasifers moving or fixed bed*)

Berdasarkan *gasifying* yang diperlukan untuk proses gasifikasi, terdapat gasifikasi udara dan gasifikasi oksigen/uap. Gasifikasi udara adalah metode dimana gas yang digunakan untuk proses gasifikasi adalah udara. Sedangkan pada gasifikasi uap, gas yang digunakan pada proses yang terjadi adalah uap. Pada eksperimen ini menggunakan *gasifier downdraft*, dengan *gasifying agent* udara, karena kemampuan dan kelebihannya meskipun memiliki beberapa kekurangan. Adapun kelebihan dan kekurangan yang dimiliki sistem gasifikasi dengan metode arah aliran *downdraft* sebagai berikut:

* Kelebihan

1. Biaya pembuatan lebih murah;
2. Gas yang dihasilkan lebih panas dibandingkan pada *system* *updraft*;
3. Lebih mudah untuk dilanjutkan ke proses pembakaran;
4. Teknik pembersihan gas lebih sederhana karena tar yang relatif rendah.

* Kekurangan:

1. *Producer gas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi memiliki temperatur yang sangat tinggi (sekitar 400º C), sehingga membutuhkan sistem *secondary heat recovery* agar tidak merusak komponen di sekitarnya;
2. Hanya dapat digunakan oleh bahan bakar (*biomass*) tertentu karena sangat sensitif terhadap kelembaban biomassa, umumnya *gasifier* tipe ini dapat bekerja dengan efektif bila kandungan *moisture* biomassanya yang sangat rendah (<20%).
3. Kadar karbon pada abu relatif lebih tinggi daripada *system updraft*.
   1. **Faktor Yang Mempengaruhi Proses Gasifikasi**

Proses gasifikasi memiliki beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses dan kandungan *producer gas* yang dihasilkannya. Adapun faktor-faktor tersebut adalah:

* + 1. **Properti Biomassa**

Apabila ada anggapan bahwa semua jenis biomassa dapat dijadikan bahan baku gasifikasi, anggapan tersebut merupakan hal yang naif. Nyatanya tidak semua biomassa dapat dikonversikan dengan proses gasifikasi karena ada beberapa klarifikasi dalam mendefinisikan bahan baku yang dipakai pada sistem gasifikasi berdasarkan kandungan dan sifat yang dimilikinya. Pendefinisian bahan baku gasifikasi ini dimaksudkan untuk membedakan antara bahan baku yang baik dan yang kurang baik. Adapun beberapa parameter yang dipakai untuk mengklarifikasikannya yaitu :

* + - 1. **Kandungan energi**

Semakin tinggi kandungan energi yang dimiliki biomassa maka *producer gas* hasil gasifikasi biomassa tersebut semakin tinggi karena energi yang dapat dikonversi juga semakin tinggi.

**2.2.1.2 Moisture**

Bahan baku yang digunakan untuk proses gasifikasi umumnya diharapkan bermoistur rendah. Apabila kandungan *moisture* yang tinggi menyebabkan *heat loss* yang berlebihan. Selain itu, kandungan *moisture* yang tinggi juga menyebabkan beban pendinginan semakin tinggi karena *pressure drop* yang terjadi meningkat. Idealnya kandungan *moisture* yang sesuai untuk bahan baku gasifikasi kurang dari 20 %.

* + - 1. **Debu**

Semua bahan baku gasifikasi menghasilkan *dust* (debu). Adanya *dust* ini sangat mengganggu karena berpotensi menyumbat saluran sehingga membutuhkan *maintenance* lebih. Desain *gasifier* yang baik setidaknya menghasilkan kandungan *dust* yang tidak lebih dari 2 – 6 g/m³.

* + - 1. **Tar**

Tar merupakan salah satu kandungan yang paling merugikan dan harus di-

hindari karena sifatnya yang korosif. Sesungguhnya tar adalah cairan hitam kental yang terbentuk dari destilasi destruktif pada material organik. Selain itu, tar memiliki bau yang tajam dan dapat mengganggu pernapasan. Pada reaktor gasifikasi terbentuknya tar, yang memiliki bentuk *approximate atomic* CH1.2O0.5, terjadi pada temperatur pirolisis yang kemudian terkondensasi dalam bentuk asap, namun pada beberapa kejadian tar dapat berupa zat cair pada temperatur yang lebih rendah. Apabila hasil gas yang mengandung tar relatif tinggi dipakai pada kendaraan bermotor, dapat menimbulkan deposit pada karburator dan *intake valve* sehingga menyebabkan gangguan. Desain *gasifier* yang baik setidaknya meng-hasilkan tar tidak lebih dari 1 g/m³. Batas kandungan pengotor tar pada *engine* yaitu < 100 mg/Nm3. Untuk tipe *gasifiers* *fixed bed updraft* diperkirakan tar yang terbentuk mencapai 150 g/Nm3. Sehingga *producer gas raw* pada *gasifier* masih perlu dilakukan *treatment* penghilangan tar **[18]**. Ketika diaplikasi ke mesin IC polutan dari *producer gas* harus di-*treatment* agar memenuhi batas kandungan polutan untuk mesin IC. Polutan yang terbawa dari *producer gas* sangat banyak, begitu pula dengan tar, bila tidak dilakukan *treatment* maka akan merusak mesin **[2]**.

* + - 1. **Ash dan Slagging**

Ash adalah kandungan mineral yang terdapat pada bahan baku yang tetap berupa oksida setelah proses pembakaran. Sedangkan slag adalah kumpulan ash yang lebih tebal. Pengaruh adanya ash dan slag pada *gasifier* adalah **[19]** :

1. Menimbulkan penyumbatan pada *gasifier*;
2. Pada titik tertentu mengurangi respon pereaksian bahan baku .
   * 1. **Desain Reaktor**

Terdapat berbagai macam bentuk *gasifier* yang pernah dibuat untuk proses gasifikasi. Untuk *gasifier* bertipe *imbert* yang memiliki *neck* di dalam reaktornya, ukuran dan dimensi *neck* amat mempengaruhi proses pirolisis, percampuran, *heatloss* dan nantinya akan mempengaruhi kandungan gas yang dihasilkannya**[17]**. Jenis reaktor yang dijelaskan dimana konstruksi dari reaktor kondisi kerja zona oksidasi suhu yang dihasilkan sangat besar, berbeda sekali dengan jenis reaktor *open core*. Adapun parameter teknis dan kondisi operasional beberapa reaktor dapat terlihat pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Parameter teknis dan operasional beberapa jenis *gasifier* **[20,21]**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Uraian | Jenis *Gasifier* | | | | | | |
| *Downdraft* | *Updraft* | | *Open core* | | *Crossdraft* | |
| Kapasitas komersial maksimum (kWe) | 350 | | 4.000 | | 200 | | 150 |
| Waktu penyetelan (min) | 10-20 | | 15-60 | | 15-60 | | 10-20 |
| Sensitifitas bahan bakar | Sensitif | | Tidak sensitif | | Sangat sensitif | | Sensitif |
| Ukuran dan volume bagian pembersih gas | Kecil | | Besar | | Besar | | Kecil |
| Sensititas fluktuasi beban | Sensitif | | Tidak sensitif | | Tidak sensitif | | Sensitif |
| HG *full load* (%) 1 | 85-90 | | 90-95 | | 70-80 | |  |
| CG full load (%) 2 | 65-75 | | 40-60 | | 35-50 | |  |
| LHV *syngas* (kJ/Nm3) | 4,5-5,0 | | 5,0-6,0 | | 5,5-6,0 | |  |
| 1 HG (Efisiensi gas panas), jika diaplikasikan untuk aplikasi pembangkit panas | | | | | | | |
| 2 CG (Efisiensi gas dingin), jika gas diaplikasikan setelah didinginkan sampai temperatur lingkungan untuk  aplikasi pembangkit daya | | | | | | | |

Pemilihan jenis reaktor akan sangat berpengaruh terhadap karakteristik *producer gas*  yang diproduksi termasuk didalamnya temperatur dan jumlah kandungan tar, serta keberadaan partikulat. Sehingga perlu diperhatikan pemilihan jenis reaktor terhadap karakteristik penggunaan *producer gas* tersebut. Representasi tingkatan tar dan partikulat untuk beberapa jenis *gasifier* secara umum tersaji dalam tabel 2.2

**Tabel 2.2** Kandungan tar dan partikulat pada tipe *gasifier* **[22]**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tipe *gasifier* | Tar (mg/ Nm3) | Partikulat (mg/Nm3) |
| *Updraft* | 10.000-100.000 | 100-1000 |
| *Downdraft* | 50-500 | 100-8000 |
| *Fluidized* | 2000-10.000 | 100-8000 |
| *Entrained* | 8000-30.000 | 30.000-100.000 |

**2.2.3 Jenis *Gasifying Agent***

Jenis *gasifying agent* yang digunakan dalam gasifikasi umumnya adalah udara dan kombinasi oksigen dan uap. Penggunaan jenis *gasifying agent* mempengaruhi kandungan gas yang dimiliki oleh *producer gas*. Berdasarkan penelitian **[23]**, perbedaan kandungan *producer gas* yang mencolok terlihat pada kandungan nitrogen pada *producer gas* dan mempengaruhi besar nilai kalor yang dikandungnya. Penggunaan udara bebas menghasilkan senyawa nitrogen yang pekat di dalam *producer gas*, berlawanan dengan penggunaan oksigen/uap yang memiliki kandungan nitrogen yang relatif sedikit. Sehingga penggunaan *gasifying agent* oksigen/uap memiliki nilai kalor *producer gas* yang lebih baik dibandingkan *gasifying agent* udara.

**2.2.4 Rasio Bahan Bakar dan Udara**

Perbandingan bahan bakar dan udara dalam proses Perbandingan bahan bakar dan udara dalam proses gasifikasi mempengaruhi reaksi yang terjadi dan tentu saja pada kandungan *producer gas* yang dihasilkan. Kebutuhan udara pada proses gasifikasi berada di antara batas konversi energi pirolisis dan pembakaran. Karena itu dibutuhkan rasio yang tepat jika menginginkan hasil *producer gas* yang maksimal. Pada gasifikasi biomassa rasio yang tepat untuk proses gasifikasi berkisar pada angka 1,25 - 1,5 **[9]**. Nilai panas bersih (LHV), kandungan *moisture*, kandungan abu dari beberapa biomassa tersaji dalam tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Karakteristik tipikal umpan reaktor untuk pembangkitan energi **[20,21]**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Jenis | LHV  (kJ/kg) | Kandungan *moisture* (%) | Kandungan abu (%) |
| Ampas tebu | 7.700-8.000 | 40-60 | 1,7-3,8 |
| Kulit ari coklat | 13.000-16.000 | 7-9 | 7-14 |
| Kulit kelapa | 18.000 | 8 | 4 |
| Kulit ari kopi | 16.000 | 10 | 0,6 |
| Residu kapas |  |  |  |
| - Tangkai | 16.000 | 10 | 0,1 |
| - Sampah biji | 14.000 | 9 | 12 |
| Gambut | 14.000 | 9 | 19 |
| **Sekam padi** | **12.000** | **10** | **4,4** |
| Arang | 25.000-32.000 | 1-10 | 0,5-6 |

Penyiapan umpan biomassa perlu diperhatikan karena hampir semua jenis umpan memiliki variasi karakteristik fisik, kimia, dan morfologi yang berbeda. Pengolahan awal bahan baku juga dipengaruhi pada karakteristik *gasifier*, seperti kapasitas dan jenis reaktor, sebagai contoh *gasifier* tipe *downdraft* lebih meng-haruskan keseragaman biomassa dibanding tipe *updraft.* Persyaratan bahan baku tersaji dalam tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Persyaratan bahan bakar untuk beberapa tipe *gasifier* **[20]**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Keterangan | Jenis *Gasifier* | | | |
| *Downdraft* | *Updraft* | *Open core* | *Crossdraft* |
| Ukuran (mm) | 20-100 | 5-100 | 1-3 | 1-3 |
| Kadar *moisture* (%) | < 15-20 | <50 | <12 | <7 |
| Kadar abu (%) | <5 | <15 | <12 | <7 |
| Morfologi | Seragam | Hampir seragam | Seragam | Seragam |
| Densitas *bulk* (kg/m3) | > 500 | >400 | >100 | >400 |
| Titik leleh abu | >1.250 | >1.250 | >1.000 | >1.250 |

* 1. **Pengkondisian dan Pemurnian *Producer Gas***

Pemurnian *producer gas* diperlukan untuk mengkondisikan *producer gas* sebelum diumpankan kemesin pembakaran dalam, dimana diperlukan pembersihan dari partikulat dan tar. *Producer gas* yang belum dimurnikan, didalamnya terdapat kandungan tar diatas 50-100 mg/Nm3. Kemudian keberadaan partikulat seperti char dan abu juga memiliki potensi merusak komponen yang bergerak. Tar yang terkondensasi dapat menyumbat sistem perpipaan pada *heat* *exchanger* dan bisa menjadi masalah jika *producer gas* tersebut di alirkan ke *intake valve* mesin **[24]**. Untuk diaplikasikan pada mesin pembakaran internal parameter kualitas *syngas* tersaji pada tabel 2.5 **[10]**.

**Tabel 2.5** Parameter kualitas syngas untuk pembangkit daya **[10,25]**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Komponen | Satuan | *IC engine* | *Gas turbine* | *Methanol synthesis* |
| Partikel | mg/Nm3 | < 50 | < 30 | <0,02 |
| Ukuran partikel | µm | < 10 | < 5 |  |
| Tar | mg/Nm3 | < 100 |  | < 0,1 |
| Alkali | mg/Nm3 |  | 0,24 |  |
| NH3 | mg/Nm3 |  |  | < 0,1 |
| H2S dan CO | mg/Nm3 |  |  | < 1 |
| Cl | mg/Nm3 |  |  | < 0,1 |
| LHV gas | kJ/Nm3 | >2.500 |  |  |

Konsentrasi dari partikulat pada *producer gas* biasanya bergantung pada desain *gasifier*, dimana umumnya *gasifier fixed bed* menghasilkan partikulat yang lebih rendah dibanding *gasifier fluidised bed*. Pembersihan dari partikulat dilakukan dengan teknologi *dry gas collectors* seperti siklon separator, *barrier filters*, dan *electorstatic precipitator* **[26]**. Siklon beroperasi pada 100-900oC dan didesain untuk menangkap partikel solid dengan ukuran diatas 5 μm dengan kemampuan penyaringan mencapai 90%. Dikarenakan 60-65% komposisi *producer gas* merupakan partikel dengan ukuran diatas 60 μm, maka siklon merupakan perangkat yang sangat baik untuk sistem pembersihan partikulat **[27]**.

Adapun partikulat, tar, dan pengotor lainnya hendaknya perlu dilakukan *treatment* sebelum digunakan baik di mesin *engine* maupun turbin, dan sistem *cleaning* *gas*-nya pun tergantung dari jenis *gasifier* apa yang digunakan. Berikut ini *methods tar removal* terlihat pada tabel 2.6 **[1]**.

**Tabel 2.6** Metode menghilangkan tar, partikulat dan pengotor **[ 1]**

|  |  |
| --- | --- |
| ***Chemical Methods*** | ***Physical Methods*** |
| *Catalytic cracking* | *Cyclone* |
| *Thermal cracking* | *Filter (Baffle, fabric, ceramic, granular beds* |
| *Plasma reactor (Pyroare, corona, glidare)* | *Electrical preciperator* |
| *Use of catalytic bed materials* | *Scrubber* |

Selain itu juga, perlu dipertimbangan mengenai temperatur operasi untuk masing-masing alat sistem *cleaning* tersebut. Berikut ini tabel parameter operasi untuk masing-masing alat *cleaning* gas tipe *wet scrubber*.

**Tabel 2.7** Parameter kondisi kerja pada jenis *Wet Scrubber* **[10]**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tipe | Temperatur  (°C) | Reduksi Partikel  (%) | Reduksi Tar  (%) |
| *Sand bed filter* | 10-20 | 70-99 | 50-97 |
| *Wash tower/* | 50-60 | 0-99 | 10-25 |
| *Venturi Scrubber* | n/a | n/a | n/a |
| *Rotanional atomizer* | < 100 | 95-99 | n/a |
| *Wet electrostatic preciperator* | 40-50 | <99 | 0-60 |
| *Fabric filter* | 130 | 70-95 | 0-50 |
| *Rotational particle separator* | 130 | 85-90 | 30-70 |
| *Fixed bed tar adsorber* | 80 | n/a | 50 |
| *Catalic tar cracker* | 900 | n/a | >95 |

Saat ini teknologi pembersihan tar dilakukan melalui proses kondensasi gas melalui beberapa teknologi seperti *heat exchanger* dan pendinginan kontak langsung yaitu *scrubber*. Dalam operasi untuk pembangkit daya, *producer gas* keluar dari *gasifier downdraft* berada pada temperatur 400-700oC, lalu didinginkan untuk meningkatkan densitas energi *producer gas* menggunakan *Integrate Gas Cleaning Sistem.* Dalam sistem ini *producer gas* dilewatkan kedalam *scrubber* untuk pembersihan kandungan tar dan mengkondisikan gas pada temperatur operasi mesin berkisar 30-40oC **[28]**.

Beberapa jenis *wet* *scrubber* dengan fluida kerja seperti air atau minyak banyak dipakai untuk teknik kondensasi tar dan pembersihan partikulat **[29]**. Beberapa diantaranya: *Spray tower* dimana paling sederhana, dan sangat baik untuk menghilangkan partikulat besar dengan efisiensi 60-98% dan efisiensi reduksi tar 10-25%. *Centrifugal spray tower* sangat efisien untuk menghilangkan partikulat 1µm dimana efisiensinya 85-90%, sedangkan kemampuan reduksi tar mencapai 30-70%. *Ventury scrubber* memiliki efisiensi pembersihan tar paling besar mencapai 50-90% **[30,31]**.

* 1. **Parameter Desain *Wet Scrubber***

Pada penelitian ini beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam perancangan karakteristik *wet scrubber.* Parameter yang menpengaruhi performa *wet* *scrubber* secara keseluruhan adalah **[32]**:

* + 1. ***Waste* *Gas Flow Rate*, *Temperature* dan *Humidity***

Laju alir arus gas produser adalah parameter untuk pengukuran dimensi

yang paling penting pada *wet* *scrubber*. Makin tinggi laju aliran gas, makin besar

sistem *venturi* dan volume *scrubbing* *liquid* yang dibutuhkan untuk membersihkan gas. *Wet* *scrubber* beroperasi pada laju alir gas lebih kecil dari pada *baghouse* atau ESPs karena injeksi *liquid*.

Temperatur gas produser dan humiditas juga berpengaruh pada desain venturi. ketika udara melewati *wet* *scrubber*, air menguap dan menyebabkan humiditas meningkat dan mendinginkan arus gas. Jumlah penguapan ditentukan oleh temperatur *inlet* dan humiditas. Laju penguapan yang tinggi akan meningkatkan konsumsi air yang dibutuhkan atau *liquid-to-gas ratio*. Untuk aplikasi pembuangan partikel*, wet scrubber* secara umum terbatas pada *range* temperatur 50 F - 700 F karena penguapan *quencher* mungkin dibutuhkan untuk aplikasi temperatur lebih tinggi. Temperatur tinggi mempengaruhi material yang digunakan untuk membuat *scrubber*.

* + 1. **Kecepatan Gas****dan *Pressure Drop***

Menigkatkan kecepatan relatif antara gas dan *droplet liquid* dapat menigkatkan momentum partikel, menyebakan partikel lebih kecil untuk terkumpul oleh mekanisme *impaction*. Kecepatan relatif dapat ditingkatkan dengan cara memperkuat *throat*, menginjeksikan *liquid counter-current* ke aliran gas atau menyemprot *liquid*  ke *throat* . Namun, meningkatkan kecepatan relatif biasanya meningkatkan *pressure drop*, kebutuhan energi dan biaya operasi *scrubber.*

* + 1. ***Liquid-To-Gas* (L/G) *Ratio***

*Liquid-to-gas ratio* (L/G) adalah volume yang dinjeksikan per volume gas

masuk. Secara umum, L/G *ratio* meningkatkan *collection efficiency* karena *density*

*droplet* disepanjang area permkuaan tertentu pada *scrubber* lebih tinggi. Laju alir antara 7 dan 10 gal/1000ft3 memberikan performa maksimal. L/G *ratio* pada *range* ini menghasilkan *collection* *efficiency* cukup konstan pada *pressure* *drop* yang konstan. Walaupun meningkatkan L/G ratio akan meningkatkan *collection* *efficiency* samapai batas tertentu, hal ini akan meningkatkan biaya operasi karena pengunaan *scrubbing* *liquid* yang besar dan pengunaan pompa.

* + 1. ***Residence Time***

Menambah panjang *throat* dan bagian *diverging*, meningkatkan waktu kontak antara *liquid* dan partikel pengotor dalam arus gas. Untuk sistem energi tinggi, direkomendasikan panjang bagian *diverging* dari *throat* minimal 4 kali lebar agar memenuhi waktu kontak yang cukup.

* + 1. ***Droplet Size***

Terdapat ukuran *droplet* optimum untuk memaksimalkan pengumpulan partikel. *Droplet* lebih kecil memiliki permukaan lebih besar terhadap rasio volume, maka akan menangkap partikel lebih banyak per volume yang diinjeksikan. Bagaimanapun juga, jika ukuran *droplet* yang akan menurunkan kecepatan relatif antara *droplet* dan *partikel*. Sedangkan kecepatan relatif rendah menghasilkan *collection* *efficiency* yang rendah pula.

* + 1. **Persamaan *Pressure Drop***

Persamaan *pressure drop* yang paling banyak dipakai untuk *venturi* *scrubber* adalah:



. . . (1)

Keterangan:

*∆P* = *Pressure* *drop* di sepanjang *venturi* (in H2O)

*v* = Kecepatan di throat (ft/s)

*ρg* = *Density* gas (lb/ft3)

*L/G* = Rasio liquid gas (gal/1000 ft3)

*k* = Faktor korelasi untuk *scrubber* tertentu

Persamaan lain yang lebih luas diterima untuk memperkirakan *pressure drop* di sepanjang *venturi scrubber* diperkenalkan oleh Calvert:

* 1. **Metode Pengumpulan Partikel**

*Wet scrubber* dapat menangkap partikel debu yang relatif kecil terhadap butiran *liquid* yang besar. Kebanyakan jenis *wet* *scrubber*, *droplet* yang dihasilkan biasanya adalah lebih dari 50 µm (dalam *range* 150 - 250 µm) sebagai tolak ukur, ukuran diameter rambut manusia berkisar antara 50 sampai 100 µm. Distribusi ukuran partikel yang akan dibuang sistem yang akan dibuang dalam sistem tergantung dari sumber. Contoh, partikel yang dihasilkan dari peralatan mekanik (*crush* atau *grind*) cenderung besar (diatas 10 µm); sedangkan partikel yang kecil kurang berasal dari *combustion* atau reaksi kimia akan memiliki partikel yang kecil (kurang 5 µm ) atau berukuran submikrometer. Ukuran partikel yang paling kritis adalah antara 0,1 - 0,5 µm karena partikel dengan ukuran tersebut adalah yang paling sulit dikumpulkan atau dibuang oleh *wet scrubber.*

*Droplet* atau butiran air yang dihasilkan dengan beberapa metode sebagai berikut:

1. Injeksi *liquid* pada tekanan tinggi melalui nozzle yang didesain khusus.
2. Mengalirkan arus gas menuju kolam liquid.
3. Membenamkan rotor yang berputar dalam kolam liquid.

*Droplet – droplet* tersebut mengumpulkan partikel dangan mengunakan satu atau lebih mekanisme pengumpulan. Mekanisme tersebut adalah *impaction*, *diffusion*, *electrostatic* *attaraction*, *direct interception, condensation*, *centrifugal* *force*, dan *gravity* yang akan dijelaskan pada tabel 2.8 di bawah ini.

**Tabel 2.8** Mekanisme pengumpulan partikel **[33]**

|  |  |
| --- | --- |
| Mekanisme | Penjelasan |
| *Impaction* | Partikel yang besar untuk mengalir disepanjang arus *streamline* gas di sekitar *droplet* akan bertubrukan dengannya. |
| Difusi | Partikel yang sangat kecil bergerak secara acak bertubrukan dengan *droplet* karena mereka terkurung dalam ruang yang terbatas |
| *Electrostatic*  *attaraction* | Partikel dan *droplet* menjadi saling berlawanan dan tertarik satu sama lain. |
| *Direct Interception* | Kelanjutan dari mekanisme *impaction*. Titik pusat partikel mengikuti *streamline* disekitar *droplet*, namun peleburan terjadi jika jarak antara partikel dan *droplet* kurang dari radius pertikel. |
| *Kondensasi* | Ketika gas panas menjadi dingin bertindak sebagai inti kondensasi, dan akhirnya semakin besar. |
| *Gaya sentrifugal* | Bentuk atau kurvatur dari sistem menyebabkan arus gas berputar dalam gerakan spiral, melemparkan partikel besar ke dinding sistem. |
| Gravitasi | Partikel yang cukup besar dan bergerak lambat kan jatuh dan dikumpulkan. |

* 1. **Perancangan *Integrated Gas Cleaning System* (IGCS)**

Pada peneltian ini akan dirancang sebuah *gas cleaning system* yang diintegrasikan dengan instalasi *gasifier downdraft* dalam satu unit yang telah dibuat oleh Rachmat Cahaya Putra, “ Perancangan, pembuatan, dan pengujian pembangkit listrik energi biomassa, 2013”. Sedangkan perangkat yang dirancang dalam penelitian ini meliputi: *cyclone separator*, *venturi scrubber*, *rotary separator*, dan sistem injeksi air sebagai fluida pencuci gas yang mengalir melalui *venturi scrubber*.

* + 1. **Perancangan *Cyclone Separator***

Siklon ini adalah teknik yang paling banyak digunakan untuk memisahkan produser gas dari debu dan abu *entrained* dalam aliran gas. Prinsip dasar pemisah siklon adalah dengan menggunakan gaya sentrifugal untuk membuatnya mungkin untuk memisahkan partikel debu dari aliran gas **[34]**. Bagian kerucut menyebabkan diameter *vortex* menurun sampai gas membalikkan pada dirinya sendiri dan berputar ke atas pusat ke pipa *outlet* atau pencari *vortex*. Bentuk kerucut menginduksi aliran berputar, menciptakan pusaran. Partikel yang lebih besar atau lebih padat dipaksa ke luar ke dinding siklon dimana hambatan dari udara berputar serta gaya gravitasi menyebabkan mereka jatuh ke bawah sisi kerucut ke stopkontak **[35,36]** Efisiensi pemisahan siklon biasanya dinyatakan sebagai ukuran partikel yang akan dipisahkan dengan efisiensi 50% **[37]** .

Perancangan siklon memakai pendekatan metode Perry’S, dimana langkah awalnya adalah menentukan distribusi ukuran padatan yang diproses. Dengan mendapat data awal distribusi padatan, penentuan efisiensi siklon dapat dilakukan. Penentuan efisiensi yang diinginkan, menggunakan korelasi perbandingan pada efisiensi siklon dengan ukuran partikel. Kecepatan dari distribusi padatan gas hasil pembakaran yang keluar *gasifier* yang masuk siklon harus diketahui. Karena Kecepatan distribusi padatan (*Ns*) digunakan untuk menentukan jumlah putaran distribusi padatan didalam siklon, menggunakan korelasi perbandingan pada kecepatan distribusi padatan dengan kecepatan masuk.

Dalam menentukan dimensi siklon, *step* pertama adalah menentukan diameter siklon. Diameter siklon bisa ditetapkan dengan perbandingan *V* standar (15 m/s) = *Dc*standar (203 mm). Diameter partikel minimum teoritis yang dapat terendapkan (*Dp,th*) bisa dihitung apabila *Dc* sudah ditentukan. Disamping itu, karakteristik partikel perlu diketahui guna mencari diameter partikel minimum yang mampu terendapkan (*Dp,th*), meliputi densitas padatan (*ρp*), densitas gas (*ρf*), dan viskositas gas (*μ*). Persamaan yang dipakai adalah untuk menghitung *Dp,th* adalah **[38]**:



. . . (2)

Keterangan :

*Dp,th* = Diameter partikel minimum teoritas yang terendapkan (m)

*Vin* = Kecepatan gas masuk (m/s) (*range* : 8-30 m/s, diambil 15 m/s)

*Ns*= Jumlah putaran gas dalam siklon

*Bc* = Lebar *inlet* (m)

*μ* = Viskositas gas (kg/ms)

*ρp*= Densitas padatan (kg/m3)

*ρf*= Densitas gas (kg/m3)

Dalam memudahkan proses desain, sifat fisis abu yang terkandung pada *producer gas* gasifikasi biomassa (sekam padi) harus ditentukan terlebih dahulu seperti pada tabel 2.9

**Tabel 2.9** Sifat fisis abu sekam padi **[39]**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Properties* | Nilai | Satuan |
| *Mean particle size* | 856 | μm |
| *Apparent density* | 389 | kg/m3 |
| *Porosity* | 0,81 | - |
| *Sphericity* | 0,44 | - |

Untuk membandingkan apakah penentuan Dc sudah memenuhi efisiensi yang diharapkan, diperlukanlah perhitungan efisiensi teoritis menggunakan persamaan 3 seperti dibawah ini **[38]** :



. . . (3)

Keterangan :

*Dpi*  = diameter partikel *inlet*,

*Dp,th*= diameter partikel minimum teoritis yang dapat terendapkan.

Efisiensi teoritis dihitung untuk membandingkan apakah penentuan *Dc* sudah bisa memenuhi efisiensi yang diharapkan. Dengan menghitung efisiensi teoritis, bisa memudahkan merancang siklon sesuai dengan yang diharapkan. Apabila efisiensi teoritis masih lebih kecil dari efisiensi rancangan, kemungkinan penentuan *Dc* terlalu besar. Supaya pembuatan siklon sesuai yang diinginkan, maka harus kembali menentukan *Dc* kembali. Jika *Dc* sudah diketahui, bagian lain dari siklon dapat ditentukan melalui ketetapan geometri seperti pada gambar 2.2

Keterangan :

*Dc* = Diameter siklon (m)

Dimensi bagian lain dari siklon dapat ditentukan menggunakan

B

c

A

A

L

c

Z

c

L

c

H

c

D

e

J

c

Dust

Out

**Section A-A**

Gas

In

Gas

out

Bc = Dc/4 Jc = Dc/4

De = Dc/2 Sc = Dc/8

Hc = Dc/2 Lc = 1 x Dc

Zc = 2 x Dc

**Gambar 2.2**. Dimensi *proportions* siklon efisien tinggi

* + 1. **Perancangan *Venturi Scrubber***

Venturi yang dirancang berjenis *rectangular throat* atau venturi persegi, karena tipe tersebut mampu mengatasi laju aliran gas yang relatif lebih tinggi dibandingkan *venturi round throat* atau venturi lingkaran. Data awal yang harus diketahui dalam merancang *venturi scrubber* adalah mengetahui karakteristik *producer gas* yang akan dibersihkan. Selain itu, data yang harus ditentukan untuk perancangan yaitu **[32]** :

**Volume flowrate** (Q ) :

*Flowrate* dihitung dengan menentukan kecepatan *producer gas* masuk ke dalam venturi dimana :

. . . (4)



Pada bagian *inlet venturi properties producer gas* antara lain :

**Volume flowrate** (Q ) :

*Flowrate* pada temperatur standar dihitung dengan menggunakan hukum gas ideal seperti yang ditunjukan dalam persamaan 5 yaitu :

. . . (5)



Keterangan

*Q* = *Flow rate* (ft3/min)

*T* = Temperatur (°F)

2  = Kondisi luaran pada tempertur standar

***Mass flow* udara kering dan uap air**

Dengan menggunakan persamaan 6, besarnya *mass flow* kedua data diatas adalah :



. . . (6)

Dimana:

*MWwv*  = Berat molekul uap air = 18

*MWa*  = Berat molekul udara kering = 29

*Vmole*= Volume lb-mol udara = 385 ft3

** = Kandungan kelembapan (%)

***Humidity ratio***

*Humidity ratio* pada temperatur standar dihitung dengan persamaan 7



. . . (7)

Pada bagian *outlet* *venturi* gas sudah berada dalam keadaan jenuh (RH 100%), dengan bantuan *psychometric chart* dapat ditentukan nilai *humidity ratio* untuk mengetahui besarnya air yang menguap saat berkontak dengan gas panas. Dengan mengetahui banyaknya air yang menguap, kebutuhan *makeup water* dapat disediakan guna menutupi kekurangan air (*scrubbing liquid*) pada venturi **[32]**.

***Mass flow* uap air sisi luaran**

. . . (8)



****



***Mass flow* uap air yang terevaporasi**

. . . (9)



Keterangan:



**Banyaknya *makeup water***



. . . (10)



Langkah berikut adalah merancang ukuran *venturi*, dimana metode yang digunakan adalah *Calvert Cut Diameter*. Dengan konstanta B=2,0 untuk venturi. Parameter awal yang mesti dicari yaitu ukuran partikel berikut standar deviasinya. Ukuran rata-rata partikel dapat dilihat dari persentil diameter aerodinamis partikel ke-50 (Disebut pula diameter partikel massa median). Standar deviasi dari distribusi tersebut adalah rasio kumulatif fraksi massa partikel ke-84 dan ke-50 yang dihitung menggunakan persamaan 11 dimana **[32]**:



…(11)

Keterangan :

*σ* = Deviasi standar

*d*50 = Fraksi massa dari ukuran partikel ke-50

*d*84 = Fraksi massa dari ukuran partikel ke-84

Nilai tersebut diketahui dengan membaca grafik pada gambar 2.3 Langkah selanjutnya menentukan *dcut* melalui bantuan gambar 2.4 dan efisiensi koleksi *ηd* untuk setiap ukuran partikel tercantum pada tabel 2.10.



**Gambar 2.3** Grafik relasi distribusi ukuran partikel terhadap massa

kumulatif partikel.



**Gambar 2.4** Grafik diameter cut terhadap standar deviasi

**Tabel 2.10** Kebutuhan koleksi efisiensi **[32]**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Range ukuran partikel (µm) | Fraksi Massa | Koleksi efisiensi yang dibutuhkan | Koleksi efisiensi fraksional |
| 0-1 | 0,005 | 0,900 | 0,0045 |
| 1-2,5 | 0,195 | 0,950 | 0,185 |
| 2,5-4,5 | 0,400 | 0,980 | 0,392 |
| 4,5-7 | 0,300 | 0,990 | 0,297 |
| 7-12 | 0,080 | 1,000 | 0,080 |
| >12 | 0,020 | 1,000 | 0,020 |
| Koleksi efisiensi keseluruhan | | | 0,979 |

Nilai *dcut*kemudian dicocokkan terhadap garis *gas atomized spray* pada grafik di gambar 3.11. Kemudian untuk mengetahui *scrubber power*, *pressure drop*, dan asumsi penggunaan air atau L/G *ratio* pada grafik gambar 3.12. Selanjutnya menentukan luas permukaan *throat* melalui persamaan 12 **[32]** :



. . . (12)

Dimana:

Δ*P* = *Pressure drop* *venturi* (in H2O)

*v* = Kecepatan aliran di *throat* (ft/s)

*ρg* = Densitas gas (lb/ft3) and = 1/*w*

L/G = Liquid to gas ratio (gal/1000 ft3)

* + 1. **Perancangan *Rotary Separator***

*Rotary separator* digunakan untuk memisahlan butiran dari *producer gas* beserta tar yang tersisa saat dilewati *venturi* *scrubber*. Prinsip kerjanya serupa dengan siklon. Gas dengan kecepatan *V*, diumpankan secara tangensial kedalam vessel. Ketika memasuki *vessel*, gas akan berotasi dan partikel berdiameter *Dp*yang terkandung dalam gas akan menabrak dinding akibat gaya sentrifugal yang bekerja. Fenomena gaya sentrifugal cenderung melempar partikel kearah luar dinding, lalu partikel bergerak turun terpisah dari arus gas dan terkumpul dalam *vessel*. Fenomena tersebut dituangkan dalam persamaan kecepatan *settling sentrifugal* yang menyatakan hubungan antara parameter kerja diatas **[38]**. Parameter yang di desain antara lain kecepatan masuk gas, diameter tabung separator, terkait ukuran butiran yang ingin dipisahkan.

. . . (13)



Dimana :

*Vt* = Kecepatan *settling setrifugal* (m/s)

*Ain*= Luasan saluran masuk (m2)

*do* = Diameter inlet (m)

*ρf* = Massa jenis fluida (kg/m3)

*g* = Percepatan gravitasi (kg m/s2)

*D* = Diameter *separator* (m)

*Z* = Tinggi *separator* (m)

Diameter partikel yang dapat tertangkap *separator* ditentukan dari persamaan *stokes* dibawah **[38]**:



. . . (14)

Dimana :

*dp* = Diameter partikel (m)

*µ*= Viskositas dinamik fluida (N/sm2)

*do* = Diameter *inlet* (m)

*ρp* = Massa jenis padatan (kg/m3)