

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

Dalam penelitian tugas akhir ini akan dilakukan studi literatur yang merupakan pencarian referensi yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang akan diselesaikan dari buku, artikel dan jurnal yang berkaitan. Penelitian tentang konversi termokimia gasifikasi serta perancangan pembangkitnya telah dilakukan beberapa Universitas yang ada di Indonesia maupun di luar Indonesia.

Gemini (2017) dengan penelitian yang berjudul analisa perancangan pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBG) skala rumah tangga dari sampah organik perumahan sebagai sumber energi listrik. Penelitian ini menganalisa perancangan, teknis, dan ekonomi pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBG) dalam penelitian ini menggunakan konversi biokimia dalam menghasilkan biogas untuk dijadikan bahan bakar pembangkit listrik. Pada analisa teknis didapat jumlah sampah organik sebesar 113. Kg/hari dapat menghasilkan potensi energi listrik sebesar 58kWh/hari dan potensi tersebut mempunyai daya listrik sebesar 2.4 kW, berdasarkan analisa ekonomi nilai NPV yang di dapat sebesar 2.006.276.992,-, IRR sebesar 10,79% dan *payback period* selama 6.43 tahun dari aspek ekonomi proyek pembangunan PLTBG dapat dikatakan layak.

Fadli (2016) dengan penelitian yang berjudul studi kelayakan pembangkit listrik tenaga biogas (PLTGB) *on-grid* dari sampah organik di kota Pekanbaru. Penelitian ini menganalisa kelayakan dari pembangunan pembangkit biogas analisa terdiri dari analisa teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan, penelitian ini menggunakan konversi biokimia dalam memproses sampah organik menjadi gas dan dijadikan bahan bakar untuk pembangkit listrik, dari potensi sampah organik di kota Pekanbaru 367.745 Kg/hari mampu menghasilkan biogas sebesar 51.025,99 m³/hari dan dapat di konversi menjadi listrik dengan daya listrik sebesar 5.756,60 kw, berdasarkan analisa ekonomi di dapat nilai NPV sebesar Rp. 10.634.412.256.277,-, IRR sebesar 10,7% lebih besar dari suku bunga yang digunakan yaitu sebesar 8% dan *Payback Period* selama 6,9 tahun maka proyek dapat dikatakan layak secara finansial, dari analisa lingkungan gas metana dari sampah anorganik yang digunakan sebagai bahan bakar PLTGB mampu mereduksi emisi karbon mencapai 158.491,4 tCO₂/tahun.

Widyawidura dkk (2016) dengan penelitian yang berjudul potensi waste to energy sampah perkotaan untuk kapasitas 1 MW di propinsi DIY, penelitian ini membandingkan energi yang dihasilkan dari total sampah 150 ton perhari yang di produksi warga DIY, dengan 50 ton/hari di konversi menggunakan konversi termokimia gasifikasi dan menghasilkan energi sebesar 1093,95 kW dan 100 ton/hari sisanya dikoversi menggunakan konversi biokimia anaerobic digestion dan menghasilkan energi sebesar 502,02 kW.

Kivumbi (2015) pada penelitian yang berjudul “ *Techno-economic assessment of municipal solid waste gasification for electricity generation: a case study of Kampala City, Uganda*” . Pada penelitian ini melakukan analisa dari aspek tekni dan ekonomi pembangunan pembangkit listrik tenaga sampah di kota kampala Uganda. Penelitian tersebut menyebutkan bahwa dari total sampah 523 ton/hari dapat menghasilkan energi listrik sebesar 2,97 GWh/tahun analisa ekonomi menunjukkan pembangunan pembangkit dapat dikatakan layak karena menghasilkan *NPV* sebesar 887333USD dengan *Payback Period* selama 6,57 tahun dan *Internal Rate Ratio* sebesar 6%

Faridha dkk (2015) pada penelitian yang berjudul potensi pemanfaatan sampah menjadi listrik di TPA ciliwong kota serang provinsi banten dengan jumlah timbunan sampah sebesar 120 ton perhari. Penelitian ini mebandingkan mengkonversi sampah menjadi listrik dengan melauai konversi termokimia dan konversi biokimia hasil dari penelitian ini yaitu apabila sampah di TPA ciliwong dikonversi melalui konversi termokimia maka potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan sebesar 2,19 MW dan apabila dikonversi dengan biokimia potensi energi listrik yang dapat dihasilkan sebesar 1,09 MW.

Tsunatu dkk (2015) dengan penelitian berjudul *municipal solid waste as alternative source of energy generation : a case study of jalingo metropolis – tarabaka state*. Penelitian ini menghitung potensi MSW pada jalingo metropolis untuk dijadikan sumber energi alternative, jumlah sampah yang diproduksi penduduk kota tersebut sebesar 18.144ton/tahun dan yang hanya 15.930,43 ton/tahun yang tersedia untuk dikonversi menjadi sumber energi alternative, pada penelitian ini melakukan perhitungan potensi melalui konversi termokimia dan biokimia dan mendapatkan hasil pada konversi biokimia energi yang dihasilkan sebesar 62.596,80 kW dan melauai konversi termokimia sebesar 151.016,14 kW.

Ojolo dkk (2012) dengan penelitian yang berjudul *development of a laboratory scale updraft gasifier*. penelitian ini bertujuan mendesain updraft gasifier dengan kapasitas 11,19 kW skala laboratorium dan dengan membandingkan 2 feedstock sebagai bahan bakarnya yaitu serbuk gergaji dan tempurung kelapa, hasil dari analisa proximate dan ultimate dari feedstock ini menunjukkan bahwa kandungan air sebesar 9,9 dan 12%, fixed carbon 4 dan 3%, volatile matter 82 dan 55% serta ash 4 dan 30% hasil itu pada saat keadaan kering. Kandungan HHV sebesar 23,4 dan 15,8 MJ kg⁻¹ serta LHV sebesar 22,2 dan 15,0 MJ kg⁻¹. Kandungan lainnya yaitu carbon sebesar 66 dan 45%, hidrogen 5 dan 3%, nitrogen 0,88 dan 0,55% dan oksigen 12,6 dan 18,4%, besar energi input yang dihasilkan yaitu 7,18 dan 8,79 kW, energi outputnya sebesar 5,47 dan 6,15 kW dan efficiency gasifier sebesar 93 dan 67%, .

Dari penelitian-penelitian sebelumnya terdapat beberapa kekurangan dan kelebihan serta hanya terfokus terhadap analisa potensi dan pada perancangan PLTSa memanfaatkan sampah organik dengan sistem konversi biokimia. Penelitian ini memiliki kelebihan yaitu melakukan perancangan PLTSa yang memanfaatkan sampah anorganik dengan sistem konversi termokimia gasifikasi , pemilihan sistem konversi ini berdasarkan teori dari penelitian sebelumnya yang menyebutkan konversi termokimia dapat menghasilkan daya yang lebih maksimal di bandingkan konversi biokimia, serta pada penelitian sebelumnya hanya menganalisa aspek teknis oleh karena itu pada penelitian kali ini peneliti akan menganalisa aspek teknis serta aspek ekonomi dari perancangan PLTSa.

- Hak cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.2 Landasan Teori

2.2.1. Pengertian Gasifikasi

Teknologi gasifikasi merupakan suatu bentuk peningkatan pendayagunaan energi yang terkandung di dalam bahan biomassa melalui suatu konversi dari bahan padat menjadi gas dengan menggunakan proses degradasi termal material-material organik pada temperatur tinggi di dalam pembakaran yang tidak sempurna. Proses ini berlangsung di dalam suatu alat yang disebut *gasifier*. Ke dalam alat ini dimasukkan bahan bakar biomassa untuk dibakar di dalam reaktor (ruang bakar) secara tidak sempurna. Dengan kata lain, proses gasifikasi merupakan proses pembakaran parsial bahan baku padat, melibatkan reaksi antara oksigen dengan bahan bakar padat. Uap air dan karbon dioksida hasil pembakaran direduksi menjadi gas yang mudah terbakar, yaitu karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂) dan metan (CH₄). Gas-gas ini dapat dipakai sebagai pengganti BBM guna berbagai keperluan seperti menggerakkan mesin tenaga penggerak (diesel atau bensin), yang selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik, menggerakkan pompa, mesin giling maupun alat-alat mekanik lainnya. Selain itu gas ini juga dapat dibakar langsung untuk tanur pembakaran, mesin pengering, oven dan sebagainya yang biasanya memerlukan pembakaran yang bersih.

Gasifikasi adalah suatu proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (CO, CH₄, dan H₂) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas (20%-40% udara stoikiometri). Proses gasifikasi merupakan suatu proses kimia untuk mengubah material berkarbon menjadi gas mampu bakar. Berdasarkan definisi tersebut, maka bahan bakar yang digunakan untuk proses gasifikasi menggunakan material yang mengandung hidrokarbon seperti batubara, *petcoke* (*petroleum coke*), dan biomassa. Keseluruhan proses gasifikasi terjadi di dalam reaktor gasifikasi yang dikenal dengan nama *gasifier*. Di dalam *gasifier* inilah terjadi suatu proses pemanasan sampai temperatur reaksi tertentu dan selanjutnya bahan bakar tersebut melalui proses pembakaran dengan bereaksi terhadap oksigen untuk kemudian dihasilkan gas mampu bakar dan sisa hasil pembakaran lainnya (Guswendar, 2012).

Dengan pemanasan dalam *gasifier*, bahan baku biomassa/batubara akan terurai menjadi gas hidrogen, metana, karbon dioksida, karbon monoksida, nitrogen, polutan, abu. Komponen syngas yang dimanfaatkan sebagai penghasil energi adalah hidrogen, metana dan karbon monoksida. Selama proses gasifikasi reaksi kimia utama yang terjadi adalah endotermis (diperlukan panas dari luar selama proses berlangsung). Produk yang

dihasilkan pada gasifikasi dapat dikategorikan menjadi 3 bagian utama, yaitu padatan, cairan (termasuk gas yang dikondensasikan) dan gas permanen. Pada umumnya udara dan uap digunakan sebagai media pada proses gasifikasi. Gasifikasi dengan pembakaran merupakan proses termokimia yang terkait erat, tetapi memiliki perbedaan mendasar. Dimana gasifikasi menyatukan energi menjadi satu ikatan kimia, sedangkan pembakaran hanya memecah ikatan kimia tersebut untuk melepaskan energi. Selain itu, Gas yang dihasilkan dari gasifikasi mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas yang dihasilkan dari pembakaran pada umumnya (Prabir,2010).

2.2.2 Jenis-Jenis Reaktor gasifikas

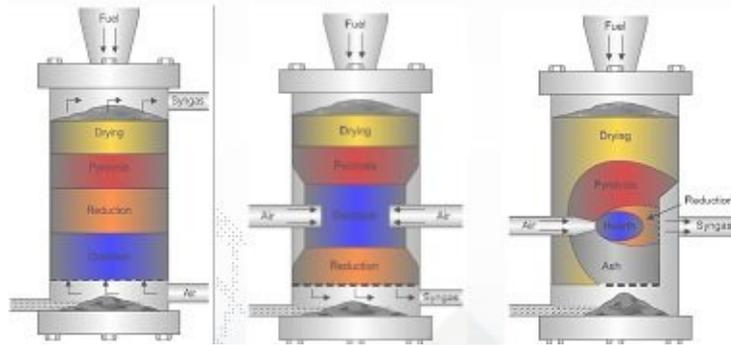
Teknologi gasifikasi yang terus berkembang mengarahkan klasifikasi teknologi sesuai dengan sifat fisik maupun sistem yang berlangsung dalam menciptakan proses gasifikasi. Beberapa kategori alat gasifikasi tersebut antara lain adalah :

2.2.2.1 Berdasarkan mode fluidisasi

Berdasarkan mode fluidisasi, alat gasifikasi dibagi menjadi tiga (Guswendar,2012), yaitu :

a. Gasifikasi unggun bergerak (*moving bed gasifier*)

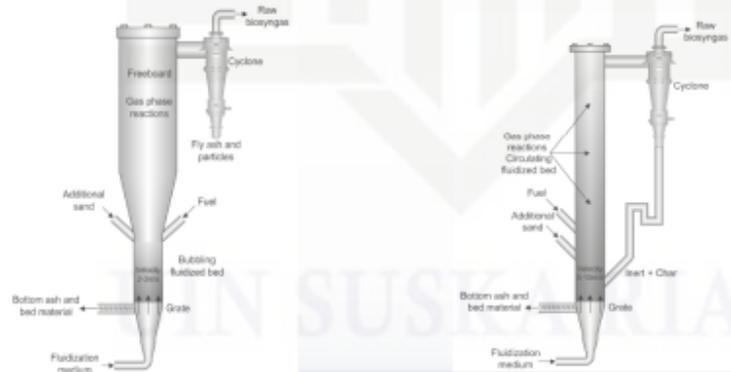
Pada alat gasifikasi ini, umumnya proses memasukkan bahan bakar terjadi dari atas reaktor dan di isi sampai penuh. Setelah proses *feeding* dilakukan, maka selanjutnya adalah pemberian hembusan oksigen pada bagian bawah reaktor untuk proses oksidasi. Antara bahan bakar dan masuknya udara terdapat sekat pemisah agar udara tidak tetutup sisa pembakaran sehingga dapat terus mengalir. Saat oksidasi terjadi, jumlah bahan bakar di dalam reaktor semakin menipis seiring dengan perubahan fase padatan bahan bakar menjadi gas mampu bakar. Sisa bahan bakar yang tidak menjadi gas akan berubah fase menjadi air maupun tar dan abu dimana air dan tar dapat keluar pada celah atau sambungan pada reaktor dan juga saling mengikat hingga menempel pada dinding reaktor sedangkan abu akan turun ke bawah sebagai akibat dari berat jenis abu dan gaya gravitasi yang mempengaruhinya. Contoh gasifikasi tipe ini adalah gasifikasi updraft dan downdraft (Guswendar, 2012)



Gambar 2.1 *Moving bed gasifier : (a) Updraft gasifier, (b) Downdraft gasifier, (c) Crossdraft gasifier*
(sumber :Guswendar, 2012)

b. Gasifikasi unggun terfluidisasi (*fluidized bed gasification*)

Gasifikasi tipe ini membutuhkan ukuran bahan bakar yang kecil dengan ukuran maksimal adalah 10 mm dengan partikel pemanas yang juga kecil (biasanya pasir). Tujuannya adalah agar bahan bakar dan partikel tersebut dapat mendapatkan panas dengan cepat dan dapat melayang dalam reaktor sehingga dapat terjadi perpindahan panas melalui kontak antara bahan bakar dan partikel pemanas tersebut. Alat gasifikasi ini beroperasi pada temperatur 800-1000°C untuk menghindari pembentukan gumpalan abu (Guswendar, 2012)



(a)

(b)

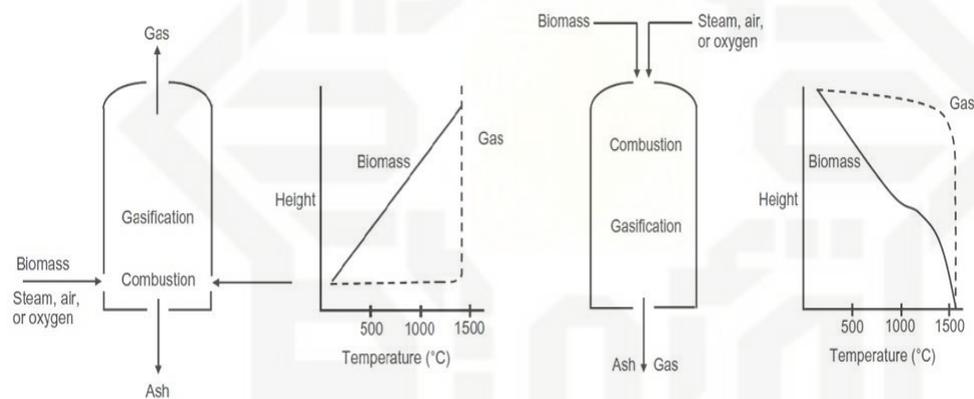
Gambar 2.2 *Fluidized bed gasifier : (a) Bubbling fluidized bed gasifier dan (b) Circulating fluidized bed gasifier*

(sumber :Guswendar, 2012)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

c. *Entrained flow reactor*

Gasifikasi ini menggunakan siklus gabungan dan memiliki hasil gas yang bersih dengan sedikit tar. Reaktor sistem ini menggunakan temperatur yang cukup tinggi yaitu sekitar 1400°C dengan tekanan 20-70 bar dengan ukuran bahan bakar yang lebih kecil dari gasifikasi unggun terfluidisasi yaitu sekitar kurang dari 75 mikrometer. Bahan bakar dan oksigen serta uap dimasukkan ke dalam reaktor secara bersamaan. Uap dalam sistem ini digunakan untuk memberi kandungan air pada bahan bakar dalam bentuk bubuk hingga terbentuk bubuk agar mudah dimasukkan ke dalam reaktor. Kandungan uap air dalam bahan bakar inilah yang harus dibayar dengan peningkatan konsumsi energi yang besar. Dua jenis reaktor sistem ini diklasifikasikan berdasarkan cara *feeding* bahan bakarnya. Jenis reaktor tersebut adalah dari jenis *side-feed entrained flow reactor* dan *top-feed entrained flow reactor* (Guswendar, 2012)

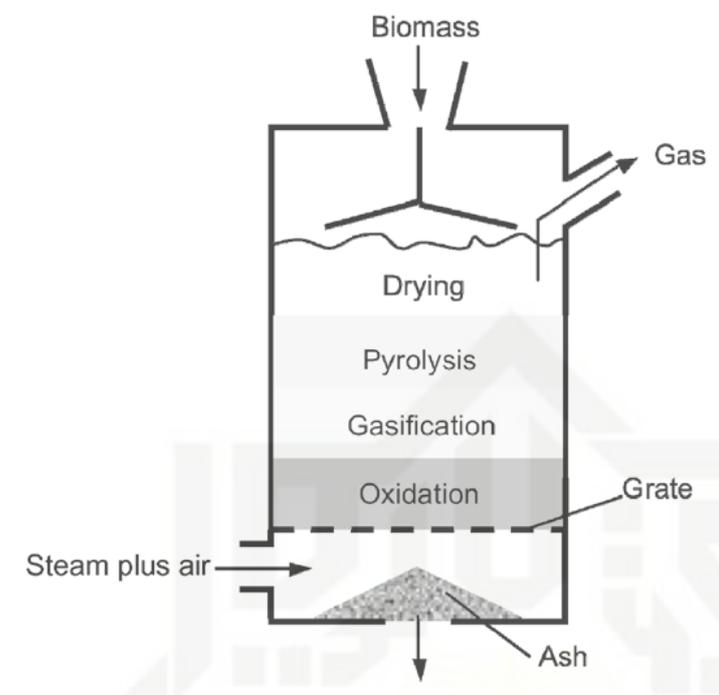


Gambar 2.3 *Entrained flow gasifier* : (a) *side-feed entrained flow reactor* dan (b) *top feed entrained flow reactor*
(Sumber :Gusendar, 2017)

2.2.2.2 Berdasarkan arah aliran

Arah aliran fluida gas di dalam reaktor gasifikasi menjadi bahan pertimbangan klasifikasi alat gasifikasi berdasarkan arah aliran(Guswendar,2012). Adapun jenis alat gasifikasi tersebut adalah :

a. Gasifikasi Updraft



Gambar 2.4 Reaktor gasifikasi updraft (sumber:Prabir, 2010)

Gasifikasi updraft merupakan reaktor gasifikasi yang umum digunakan secara luas. Ciri khas dari reaktor gasifikasi ini adalah aliran udara dari *blower* masuk melalui bagian bawah reaktor melalui *grate* sedangkan aliran bahan bakar masuk dari bagian atas reaktor sehingga arah aliran udara dan bahan bakar memiliki prinsip yang berlawanan (*counter current*).

Produksi gas dikeluarkan melalui bagian atas dari reaktor sedangkan abu pembakaran jatuh ke bagian bawah *gasifier* karena pengaruh gaya gravitasi dan berat jenis abu. Di dalam reaktor, terjadi zonafikasi area pembakaran berdasarkan pada distribusi temperatur reaktor gasifikasi. Zona pembakaran terjadi di dekat *grate* yang dilanjutkan dengan zona reduksi yang akan menghasilkan gas dengan temperatur yang tinggi. Gas hasil reaksi tersebut akan bergerak menuju bagian atas dari reaktor yang memiliki temperatur lebih rendah dan gas tersebut akan kontak dengan bahan bakar yang bergerak turun sehingga terjadi proses pirolisis dan pertukaran panas antara gas dengan temperatur tinggi terhadap bahan bakar yang memiliki temperatur lebih rendah. (Guswendar, 2012)

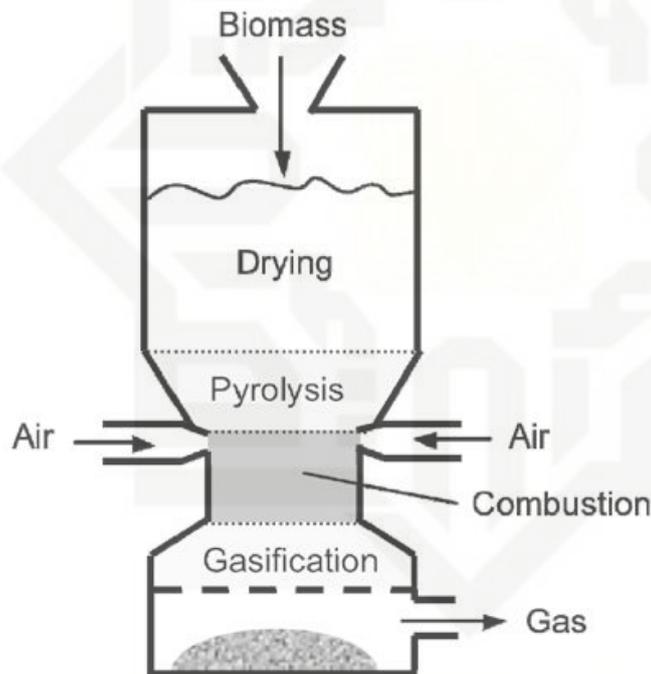
Panas *sensible* yang diberikan gas digunakan bahan bakar untuk pemanasan awal dan pengeringan bahan bakar. Kedua proses tersebut yaitu proses pirolisis dan proses pengeringan terjadi pada bagian teratas dari reaktor gasifikasi.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak cipta milik UIN Suska Riau

Kelebihan dari reaktor gasifikasi updraft adalah mekanisme kerja yang dimiliki oleh reaktor tipe ini jauh lebih sederhana dibandingkan dengan tipe yang lain, sedangkan dengan mekanisme kerja yang lebih sederhana tersebut, ternyata tingkat toleransi reaktor terhadap tingkat kekasaran bahan bakar lebih baik. Selain itu jenis reaktor ini memiliki kemampuan untuk mengolah bahan bakar kualitas rendah dengan temperatur gas keluaran relatif rendah dan memiliki efisiensi yang tinggi akibat dari panas gas keluar reaktor memiliki temperatur yang relatif rendah. Sedangkan kelemahan reaktor gasifikasi updraft adalah tingkat kadar tar dalam *syngas* hasil reaksi relatif cukup tinggi sehingga mempengaruhi kualitas dari gas yang dihasilkan serta kemampuan muatan reaktor yang relatif rendah.

b. Gasifikasi Downdraft



Gambar 2.5 Reaktor gasifikasi downdraft
(sumber :Prabir, 2010)

Pada *downdraft gasifier*, arah aliran udara dan bahan baku menuju ke bawah. Gasifikasi jenis ini menghasilkan tar yang lebih rendah dibandingkan jenis *updraft*. Hal ini dikarenakan tar hasil pirolisis terbawa bersama gas dan kemudian masuk ke daerah gasifikasi dan pembakaran yang memiliki temperatur tinggi. Pada daerah gasifikasi dan pembakaran inilah, tar kemudian akan terurai. Hasil gas dari gasifikasi sistem *downdraft* ini setelah disaring dan didinginkan dapat langsung dimasukkan ke dalam mesin

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

pembakaran dalam ataupun ditampung dalam suatu wadah untuk diuji atau dianalisis kandungan komposisinya.(Ardianto,2011)

Dari Gambar 2.5 diatas mengindikasikan proses distribusi temperatur pada *downdraft gasifier* ketika sedang dioperasikan. Pada fase *drying* atau pengeringan biomassa, reaksi yang terjadi adalah reaksi endoterm atau menghilangkan kandungan air dengan temperatur operasi kurang dari 120°C.(Zobaa, 2011) Pada fase pirolisis terjadi penguraian kandungan *volatile* dengan reaksi endoterm atau menyerap panas pada temperatur operasi berkisar 200°C - 600°C.[8] Pada fase oksidasi parsial dimana pada fase inilah proses pembakaran biomassa terjadi dengan reaksi eksoterm atau menghasilkan panas pada temperatur operasi >900°C.(Zobaa, 2011) Pada fase terakhir yaitu reduksi dimana fase ini akan mengurangi kandungan CO2 dengan temperatur operasi normal berkisar 400°C - 900°C.[8] Dimana jika temperatur lebih rendah, akan menghasilkan nilai kalor yang terkandung pada gas hasil lebih rendah pula.(Zobaa,2011)

Pada penjelasan tentang macam-macam gasifier di atas dapat disimpulkan pada tabel berikut

Tabel 2.1 Pengoperasian, keuntungan dan kerugian dari macam-macam *gasifier*

	Tipe-tipe Gasifier		
	Downdraft	Updraft	Crossflow
Pengoperasian	Biomassa bergerak dari atas ke bawah. Oksidator (udara) berada pada bagian atas dan mengalir ke bawah. Syngas diekstraksi di bagian bawah pada tingkat parut.	Pergerakan biomassa dari atas dan bergerak ke bawah. Oksidator terjadi di bagian bawah dan mengalir ke atas. Beberapa pengeringan terjadi. Syngas diekstraksi di bagian atas.	Pergerakan biomassa dari atas dan bergerak ke bawah. Oksidator terjadi di bagian bawah dan mengalir melintasi bed. Syngas diekstraksi berlawanan dengan nosel udara di perapian.
Kelebihan	Tars di syngas lebih rendah, pilihan terbaik dalam penggunaan mesin gas..	Dapat menangani biomassa dengan kadar air yang lebih tinggi. Temperatur yang lebih tinggi dapat menghancurkan beberapa racun dan	Desainnya paling sederhana. Sirkulasi yang lebih kuat di zona panas. Suhu yang lebih rendah memungkinkan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang © Hak cipta milik UIN Suska Riau		mineral terak dan logam. Kandungan tar yang lebih tinggi menambah nilai pemanasan.	penggunaan bahan pada desain reactor yang lebih murah
Kekurangan	Biomassa harus sangat kering (<20 persen kadar air). Syngas yang panas harus didinginkan pada kompresi atau unit pembersihan gas yang ekstensif diperlukan.	Kandungan tar yang lebih tinggi bisa merusak mesin atau kompresor. Pada Grate terkena suhu tinggi dan harus didinginkan atau dilindungi	Pengiperasian yang rumit. permasalahan dengan slagging. Tingginya kadar karbon (33%) pada abu

(Sumber: Susan Wickwire,2007)

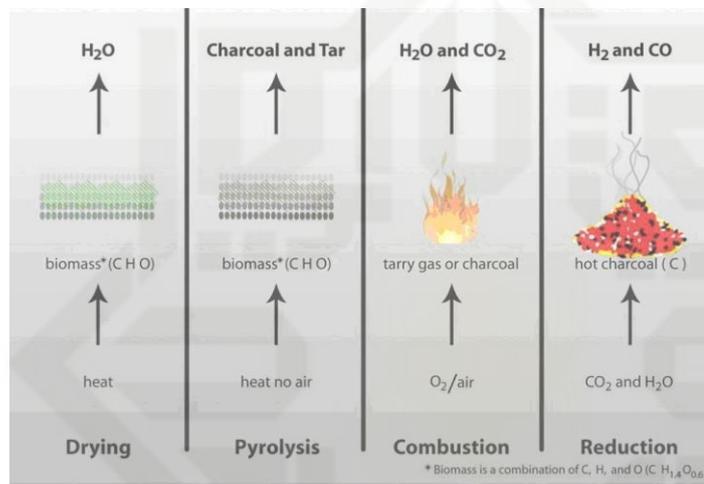
2.2.3 Proses-Proses Pada Reaktor Gasifikasi

Gasifikasi secara sederhana dapat dijelaskan sebagai proses pembakaran bertahap. Hal ini dilakukan dengan membakar bahan bakar padat dengan ketersediaan oksigen yang terbatas sehingga gas yang terbentuk dari hasil pembakaran masih memiliki potensi untuk terbakar. Bahan bakar gasifikasi dapat berupa material padatan berkarbon yang merupakan senyawa organik. Semua senyawa organik mengandung atom karbon, hidrogen, dan oksigen dalam wujud molekul kompleks yang bervariasi. Gasifikasi itu sendiri memiliki tujuan untuk memutuskan ikatan dari molekul kompleks tersebut menjadi gas sederhana mampu bakar yaitu H₂ dan CO. Kedua gas tersebut mudah terbakar dan memiliki kerapatan energi dan densitas yang tinggi. Keduanya merupakan gas yang sangat bersih dimana hanya memerlukan satu atom oksigen untuk dibakar menghasilkan karbon dioksida dan air. Hal inilah yang menyebabkan gasifikasi memiliki emisi yang relatif bersih karena tujuan dari gasifikasi adalah untuk mengendalikan proses termal secara terpisah yang biasanya tercampur dalam proses pembakaran sederhana dan diatur untuk menghasilkan produk yang diinginkan.

Gasifikasi terdiri dari empat tahapan terpisah yang terdiri dari proses pengeringan, pirolisis, oksidasi/pembakaran, dan reduksi. Keempat tahapan ini terjadi secara alamiah dalam suatu proses pembakaran. Dalam gasifikasi, keempat tahapan ini dilalui secara terpisah sedemikian hingga dapat menginterupsi api dan mempertahankan gas mampu bakar tersebut dalam bentuk gas dan mengalirkan *syngas* tersebut ke tempat lain. Proses

zonafikasi tersebut terjadi pada rentang temperatur yang berbeda dan menjadi karakteristik dari masing-masing daerah tersebut. Proses pengeringan terjadi pada temperatur kurang dari 150°C,

proses pirolisis terjadi pada temperatur antara 150 °C sampai 300 °C, daerah reduksi terjadi pada temperatur antara 500 °C sampai 1000 °C, sedangkan daerah oksidasi terjadi pada temperatur antara 700 °C sampai 1500 °C. Proses pengeringan, pirolisis, dan reduksi bersifat menyerap panas (endotermik) sedangkan proses oksidasi bersifat melepas panas (eksotermik).



Gambar 2.6 4 Tahapan pada proses gasifikasi (sumber:Guswendar, 2012)

2.2.3.1 Proses Pengeringan (*Drying*)

Proses Drying dilakukan untuk mengurangi kadar air (moisture) yang terkandung di dalam biomassa bahkan sebisa mungkin kandungan air tersebut hilang. Temperatur pada zona ini berkisar kurang dari 120°C. Kadar air pada biomassa dihilangkan melalui proses konveksi karena pada reaktor terjadi pemanasan dan udara yang bergerak memiliki kelembaban yang relatif rendah sehingga dapat mengeluarkan kandungan air biomassa. Semakin tinggi temperatur pemanasan akan mampu mempercepat proses difusi dari kadar air yang terkandung di dalam biomassa sehingga proses *drying* akan berlangsung lebih cepat. Reaksi oksidasi, yang terdapat beberapa tingkat di bawah zona *drying*, yang bersifat eksoterm menghasilkan energi panas yang cukup besar dan menyebar ke seluruh bagian reaktor. Disamping itu kecepatan gerak media pengering turut mempengaruhi proses *drying* yang terjadi (Azmi dkk, 2014)

2.2.3.2 Proses Pirolisis

Pada pirolisis, pemisahan *volatile matters* (uap air, cairan organik, dan gas yang tidak terkondensasi) dari padatan karbon bahan bakar menggunakan panas yang diserap dari proses oksidasi sehingga pirolisis (devolatilisasi) disebut juga gasifikasi parsial. Suatu rangkaian proses fisik dan kimia terjadi selama proses pirolisis. Komposisi produk yang tersusun merupakan fungsi dari temperatur, tekanan, dan komposisi gas selama proses pirolisis berlangsung. Produk cair yang menguap akibat dari fenomena penguapan komponen yang tidak stabil secara termal mengandung tar dan *polyaromatic hydrocarbon*. Produk pirolisis terdiri atas gas ringan, tar, dan arang.

Pirolisis adalah proses pemecahan struktur bahan bakar dengan menggunakan sedikit oksigen melalui pemanasan menjadi gas. Proses pirolisis pada bahan bakar kayu terbentuk pada temperatur antara 150 °C sampai 300 °C di dalam reaktor. Proses pirolisis menghasilkan produk berupa arang atau karbon, tar, gas (CO₂, H₂O, CO, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, dan C₆H₆). Ketika temperatur pada zona pirolisis rendah, maka akan dihasilkan banyak arang dan sedikit cairan (air, hidrokarbon, dan tar). Sebaliknya, apabila temperatur pirolisis tinggi maka arang yang dihasilkan sedikit tetapi banyak mengandung cairan. Untuk mendapatkan produk dari reaksi pirolisis terdapat berbagai cara, yaitu :

- a. Untuk mendapatkan cairan yang banyak, maka harus dilakukan pemanasan yang sedang (450 °C -600 °C) dengan gas yang rendah pada waktu residen
- b. Untuk mendapatkan gas yang efektif maka pemanasan dilakukan pada temperatur rendah (700 °C-900 °C) dengan gas yang tinggi pada waktu residen

2.2.3.3 Proses Oksidasi (Pembakaran)

Proses pembakaran mengoksidasi kandungan karbon dan hidrogen yang terdapat dalam bahan bakar dengan reaksi eksotermik, sedangkan gasifikasi mereduksi hasil pembakaran menjadi gas bakar dengan reaksi endotermik. Oksidasi merupakan reaksi terpenting di dalam reaktor gasifikasi karena reaksi ini menyediakan seluruh energi panas yang dibutuhkan pada reaksi endotermik. Oksigen yang dipasok ke dalam reaktor bereaksi dengan substansi yang mudah terbakar yang menghasilkan produk berupa CO₂ dan H₂O yang secara berurutan

direduksi ketika kontak dengan arang yang diproduksi pada proses pirolisis. Produk lain yang dihasilkan dalam reaksi oksidasi berupa air, panas, cahaya, N₂ dan gas lainnya (SO₂, CO, NO₂, dan lain-lain).

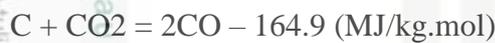
Untuk melakukan reaksi pembakaran, terdapat tiga elemen penting yang saling mengisi satu sama lain yaitu panas (*heat*), bahan bakar (*fuel*), dan udara. Reaksi pembakaran sangat berkaitan dengan keberadaan ketiga elemen tersebut. Hal ini dapat diartikan bahwa apabila salah satu dari ketiga elemen tersebut tidak ada, maka hampir dapat dipastikan tidak akan terjadi proses pembakaran. Bahan bakar merupakan elemen sensitif apabila direaksikan dengan oksigen dan dapat menghasilkan energi panas dan cahaya. Sedangkan udara merupakan elemen pereaksi yang terdapat bebas di lingkungan. Di dalam udara tidak hanya terkandung oksigen tetapi juga nitrogen yang mampu menyerap panas ketika terjadi proses pembakaran. Nitrogen dianggap sebagai racun udara apabila terikat dengan oksigen dan juga sebagai pengencer penurunan temperatur yang harus ada untuk mencapai oksigen yang dibutuhkan dalam proses pembakaran. Nitrogen juga berpengaruh terhadap terbentuknya cairan pada gas buang dari reaksi pembakaran sehingga dapat menurunkan efisiensi pembakaran. Selain itu, panas adalah salah satu hasil dan tujuan reaksi pembakaran. Energi yang dibutuhkan untuk menciptakan panas tidak selalu sama dan tergantung dengan kondisi lingkungan, sifat bahan bakar, dan juga elemen penyusun bahan bakar.

2.2.3.4 Proses Reduksi

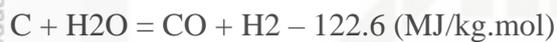
Proses reduksi adalah reaksi penyerapan panas (endoterm), yang mana temperatur keluar dari gas yang dihasilkan harus diperhatikan. Pada proses ini terjadi beberapa reaksi kimia. Di antaranya adalah *Bourdouar reaction*, *steam-carbon reaction*, *water-gas shift reaction*, dan *CO methanation* yang merupakan proses penting terbentuknya senyawa – senyawa yang berguna untuk menghasilkan *flammable gas*, seperti hidrogen dan karbon monoksida. Proses ini terjadi pada kisaran temperatur 400°C – 900°C.(Zobaa, 2011)

Berikut adalah reaksi kimia yang terjadi pada zona tersebut menurut literature buku :

Bourdouar reaction :



Steam-carbon reaction :



Water-gas shift reaction :



CO methanation :



Dapat dikatakan bahwa pada proses reduksi ini gas yang dapat terbakar seperti senyawa CO, CH₄ dan H₂ mulai terbentuk. Sehingga pada bagian ini disebut sebagai *producer gas*.(Zobaa, 2011).

2.2.4. Komponen Utama PLTSa

2.4.4.1 Sistem transportasi bahan baku

Bahan baku memerlukan sistem transportasi untuk mengangkut bahan dari tempat penyimpanan bahan baku ke sistem pengumpan, unit pengangkut atau transporasi bahan baku dapat berupa konveyor ataupun manual lori. Sistem pengumpann bahan baku kedalam reaktor biasanya berjalan memalui pengaturan sistem keseluruhan. Bahan baku dimasukan ke saluran yang sangat rapat agar mencegah kebocoran gas dan masuknya udara berlebihan kedalam reaktor. Sistem dapat berupa konveyor yang dilengkapi sistem buka dan tutup(Rislina,2011)

2.2.4.2 Unit Pembersih Gas

Tujuan dari sistem pembersih gas yaitu untuk menjaga konstanta kualitas gas producer terhadap perubahan-perubahan yang disebabkan oleh proses yang tidak berkesinambungan dan proses pengumpanan. Pembersih gas berfungsi untuk menghilangkan debu dan tar yang terbawa oleh gas sistem pembersih gas bisa berupa rangkaian siklon dan filter (Rislina,2011)

1. Cyclone

Cyclone adalah alat yang menggunakan prinsip gaya sentrifugal dan tekanan rendah karena adanya perputaran untuk proses pemisahan gas dan material padat berdasarkan perbedaan massa jenis, ukuran, dan bentuk yang ikut terhisap sehingga gas yang keluar tidak mengandung material padat.

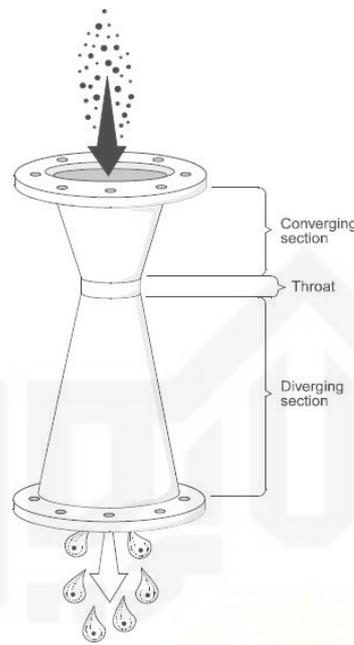


Gambar 2.7. Cyclone (pemisah)

(sumber: Panji, 2008)

Endapan dari material padat berupa tar akan jatuh ke sisi kerucut menuju tempat pengeluaran karena pengaruh gravitasi dan dikeluarkan langsung melalui *valve* pembuka.

mengukur aliran fluida (Johnstone,1949) .

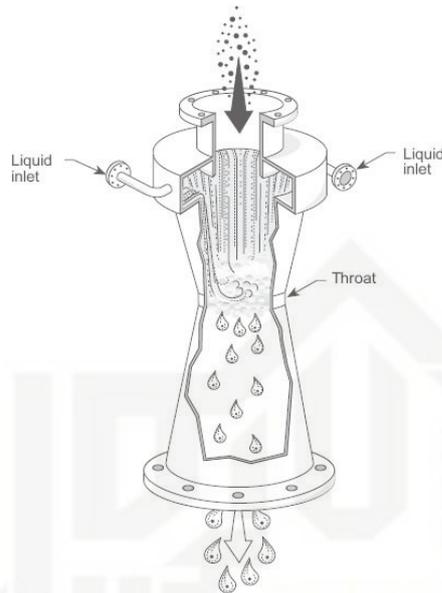


Gambar 2.8 Konfigurasi venturi
(sumber :Panji, 2008)

Sebuah venturi scrubber terdiri dari 3 bagian : bagian *converging*, *throat*, dan *diverging*. Gas exhaust masuk menuju bagian *converging* dan seiring luas area mengecil maka kecepatan meningkat. Liquid pencuci gas dimasukkan pada bagian *throat* atau pintu masuk menuju bagian *converging*. Gas exhaust, yang dipaksa masuk dengan kecepatan sangat tinggi pada bagian *throat* yang sangat kecil, menyemprot liquid pada dinding venturi dan menghasilkan droplet sangat kecil dalam jumlah sangat banyak. Pemisahan partikel dan gas terjadi pada bagian *throat* dimana gas exhaust bercampur dengan kabut droplet dari scrubbing liquid. Gas exhaust kemudian keluar menuju bagian *diverging* dimana gas dipaksa untuk melambat. Venturi dapat digunakan untuk memisahkan partikel dan gas, namun lebih efektif untuk memisahkan partikel daripada gas.

Liquid dapat diinjeksikan pada bagian *converging* atau *throat*. Gambar 2.5 menunjukkan liquid diinjeksikan pada bagian *converging*. Lalu liquid melapisi *throat* venturi dan me mbuat venturi sangat efektif mengatasi gas exhaust yang panas, kering dang mengandung debu. Kalau tidak, debu akan memiliki kecenderungan untuk menumpuk atau mengabrasi *throat* yang kering. Venturi seperti ini terkadang disebut

memiliki pendekatan basah atau *wetted approach*.



Gambar 2.9 Venturi scrubber dengan throat basah
(sumber :Panji, 2008)

2.2.4.3 Gas Engine

Gas engine termasuk mesin pembakaran dalam yang berkerja dengan bahan bakar gas seperti gas alam atau biogas. setelah kandungan pengotor pada gas diturunkan hingga kadar tertentu, gas kemudian dialirkan ke *gas engine* untuk menghasilkan listrik. Bergantung pada spesifikasi *gas engine* yang digunakan. *Gas engine* mengubah energi yang terkandung dalam biogas menjadi energi mekanik untuk menggerakkan generator yang akan menghasilkan listrik. Biasanya *gas engine* memiliki efisiensi listrik antara 36-42% (Seadi, 2008).

2.2.4.4 Generator Set

Genset (generator set) adalah sebuah perangkat yang berfungsi menghasilkan daya listrik. Disebut sebagai generator set dengan pengertian adalah satu set peralatan gabungan dari dua perangkat berbeda yaitu engine dan generator atau alternator. Gas engine termasuk mesin pembakaran dalam yang berkerja dengan bahan bakar gas seperti gas alam atau biogas. setelah kandungan pengotor pada gas diturunkan hingga kadar tertentu, gas kemudian dialirkan ke gas engine untuk menghasilkan listrik. Bergantung pada spesifikasi gas engine yang digunakan, gas engine berbahan bakar gas umumnya memerlukan gas dengan kadar air dibawah 80%. Gas

engine mengubah energi yang terkandung dalam gas menjadi energi mekanik untuk menggerakkan generator yang akan menghasilkan listrik (Ismatullah, 2017)

2.2.5 Biomass

Biomassa merupakan bahan organik yang berasal dari hewan, tumbuhan, dan manusia. Yang dapat digolongkan sebagai biomassa antara lain yaitu tumbuh-tumbuhan, pepohonan, limbah di sektor pertanian, limbah yang berasal dari hutan, tinja (feses) serta kotoran hewan ternak. Biomassa juga banyak dimanfaatkan sebagai sumber energi (bahan bakar) alternatif yang sedang dikembangkan.

Biomassa pada umumnya mempunyai kadar *volatile* yang relatif tinggi, dengan kadar karbon (C) tetap yang rendah dan kadar abu (*ash*) yang lebih rendah dibandingkan dengan batubara. Kadar *volatile* yang tinggi ini berkisar \pm 60-80% dibandingkan kadar *volatile* batubara, sehingga biomassa lebih reaktif dibandingkan dengan batubara (Putri, 2009).

Keuntungan biomassa yaitu merupakan bahan energi yang dapat diperbaharui karena dapat diproduksi dalam waktu yang relatif cepat. Proses fotosintesis yang melibatkan matahari yang terjadi pada biomassa jenis tumbuh-tumbuhan dan pepohonan, merupakan sumber energi yang paling utama. Keuntungan lain menggunakan biomassa sebagai bahan penghasil energi yaitu potensinya yang dapat mengurangi efek *global warming* yang merupakan hasil dari emisi gas rumah kaca. Meskipun dengan menggunakan biomassa dapat menghasilkan kadar karbon dioksida (CO₂) dengan jumlah yang hampir sama besarnya dengan yang dihasilkan oleh bahan bakar fosil, namun karbon dioksida (CO₂) ini dapat dimanfaatkan untuk pertumbuhan tanaman baru (Ardianto 2011).

2.2.5.1 Pengertian Sampah

Sampah merupakan material sisa yang tidak diinginkan setelah berakhirnya suatu proses. Sampah didefinisikan oleh manusia menurut derajat keterpakaiannya, dalam proses-proses alam sebenarnya tidak ada konsep sampah, yang ada hanya produk-produk yang dihasilkan setelah dan selama proses alam tersebut berlangsung. Sampah adalah suatu bahan yang terbuang atau dibuang dari sumber hasil aktivitas manusia maupun proses alam yang belum memiliki nilai ekonomis. Berangkat dari pandangan tersebut sehingga sampah dapat dirumuskan sebagai bahan sisa dari kehidupan sehari-hari masyarakat. Sampah dapat digolongkan menjadi beberapa kategori, sampah digolongkan menjadi 2, yaitu sampah organik (*degradable*) dan sampah anorganik (*undegradable*). Sampah

organik yaitu sampah yang mudah membusuk seperti sisa makanan, sayuran, daun-daun kering, dan sebagainya. Sampah ini dapat diolah lebih lanjut menjadi kompos. Sampah anorganik yaitu sampah yang tidak mudah membusuk, seperti plastic wadah pembungkus makanan, kertas, plastik mainan, botol dan gelas minuman, kaleng, kayu, dan sebagainya. Sedangkan, sampah dapat digolongkan menjadi beberapa kategori, diantaranya berdasarkan sumbernya, yaitu :

- a. Sampah hasil aktivitas rumah tangga termasuk rumah sakit, hotel dan kantor
- b. Sampah hasil kegiatan industri dan kantor
- c. Sampah hasil kegiatan pertanian meliputi perkebunan, kehutanan, perikanan dan peternakan yang sering juga disebut sebagai limbah pertanian
- d. Sampah hasil kegiatan perdagangan, misalnya pasar dan pertokoan
- e. Sampah dari hasil kegiatan pembangunan
- f. Sampah dari sekitar jalan raya

2.2.5.2 Menghitung Jumlah Sampah

Penentuan data potensi bahan baku (sampah anorganik), dalam penelitian ini data yang digunakan adalah data pemanfaatan potensi sampah anorganik di kota Pekanbaru (Ton/hari atau Kg/hari). Memperkirakan jumlah sampah pada tahun yang akan datang dengan mengacu pada pertumbuhan jumlah sampah pada tahun-tahun yang sebelumnya. Perhitungan prediksi jumlah potensi sampah ialah dengan menggunakan persamaan geometrik sebagai berikut (Pramono dalam Hasanah, 2014):

$$P_x(\text{tahun}) = P_a (1+r)^x \quad (2.1)$$

Keterangan :

- P_x = Jumlah sampah pada tahun x proyeksi.
- P_a = Jumlah sampah pada tahun awal proyeksi.
- r = Rata-rata pertumbuhan pertahun (%).
- x = Selang waktu proyeksi (tahun).

2.2.5.3 Bahaya Sampah Anorganik

Sampah anorganik merupakan musuh utama yang semakin lama jumlahnya tidak berkurang dan cenderung diabaikan keberadaannya. Hal ini disebabkan karena sulitnya pengelolaan sampah anorganik, selain itu juga karena sampah jenis ini tidak menyebabkan

dampak yang secara langsung dilihat manusia (tidak menimbulkan bau tidak sedap). Pada dasarnya sampah memiliki dampak yang sama merugikannya bagi manusia, baik sampah organik maupun sampah anorganik. Di bawah ini beberapa dampak sampah anorganik:

a. Dampak terhadap kesehatan

Potensi bahaya kesehatan yang dapat ditimbulkan diantaranya adalah : penyakit demam berdarah akan meningkat di daerah yang pengelolaan sampah anorganiknya kurang memadai, bahaya sampah beracun, seperti yang terjadi di Jepang kira-kira 40.000 orang meninggal akibat mengkonsumsi ikan yang mengandung raksa (Hg). Raksa inidibuang ke laut oleh pabrik yang memproduksi baterai dan akumulator. Marak juga sekarang ini ancaman bahaya daging sapi yang terkontaminasi logam berat akibat penggembalaan ternak sapi di TPA. Pengaruh gangguan logam berat terhadap kesehatan manusia tergantung pada bagian mana dari logam berat tersebut yang terikat dalam tubuh serta besarnya dosis yang dikonsumsi. Beberapa penyakit yang disebabkan olehkeracunan logam berat antara lain anemia, gangguan pada berbagai organ tubuh dan penurunan kecerdasan. Anak-anak merupakan golongan yang beresiko tinggi keracunanlogam berat.

b. Dampak terhadap kualitas udara dan air

Macam pencemaran udara yang ditimbulkan sampah misalnya mengeluarkan bau yang tidak sedap, debu gas-gas beracun. Pembakaran sampah dapat meningkatkan karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), nitrogen monoksida (NO), gas belerang, amoniak dan asap di udara. Macam pencemaran perairan yang ditimbulkan oleh sampah misalnya terjadi perubahan warna dan bau pada air sungai, penyebaran bahan kimia dan mikroorganisme yang terbawa air hujan serta meresapnya bahan berbahaya sehingga meresap mencemari sumur dan sumber air. Gangguan bahan pencemar berbahaya misalkan air raksa (Hg), chrom, timbal, cadmium menyebabkan gangguan pada syaraf, cacat pada bayi, kerudakan sel-sel hati atau ginjal (Sirodjuddin, 2008)

c. Dampak terhadap lingkungan sosial dan ekonomi

Bahaya sampah terhadap kegiatan sosial dan ekonomi yang dapat ditimbulkan, diantaranya, membentuk lingkungan yang kurang menyenangkan bagi masyarakat, bauyang tidak sedap dan pemandangan yang buruk karena sampah bertebaran dimana-mana. Akibat dari pengelolaan sampah yang tidak baik ini dapat dilihat dari buruknyapemandangan sungai beberapa kota besar di Indonesia. Banjir yang terjadi selama musim penghujan dan juga buruknya kualitas air menjadi kerugian utama dari sampah yang ada di sungai.

2.2.6 Karakteristik Biomassa sampah Anorganik

2.2.6.1 Analisa Proksimasi dan Ultimasi

Untuk mengetahui karakteristik, sifat fisis, sifat kimia dan *fuel properties* suatu biomassa dapat dilakukan dengan analisa proksimasi dan ultimasi. Analisa proksimasi dan ultimasi biasa digunakan untuk mengetahui kandungan dalam biomassa. Adapun analisa proksimasi dan ultimasi dapat diperoleh dari pengujian langsung dan dari penelitian sebelumnya.. Analisa proksimasi digunakan untuk mengetahui kandungan air, abu, *volatile matters*, dan *fixed carbon*. Semakin besar kandungan air maka semakin rendah nilai kalornya karena H₂O tidak memiliki nilai kalor, kadar abu yang tinggi akan menghasilkan emisi abu dan partikulat paling banyak, semakin besar kandungan *volatile matters* maka akan semakin mudah biomassa terbakar. Selain itu, kadar *volatile matters* tersebut berhubungan dengan luasan permukaan material biomassa, apabila semakin luas permukaannya, maka semakin

mempermudah kandungan *volatile matter* tersebut menguap dalam proses gasifikasi. Dan semakin banyak kandungan karbon menandakan bahwa semakin banyak pula zat yang dapat bereaksi dalam reaksi oksidasi pada proses gasifikasi, sehingga memungkinkan proses gasifikasi berjalan dengan lebih baik. Sedangkan analisis ultimasi digunakan untuk mengetahui kandungan unsur-unsur kimia seperti karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, sulfur, dll.

2.2.6.2 Nilai Kalor

Parameter yang menyatakan jumlah energi panas yang dilepaskan oleh bahan bakar saat terjadinya oksidasi unsur-unsur kimia yang terdapat didalamnya dinyatakan dengan nilai kalor. Parameter ini berhubungan secara langsung dengan kadar karbon (C) dan hidrogen (H₂) yang terkandung didalam bahan bakar padat. Semakin besar kadar keduanya, maka semakin besar pula nilai kalor yang dikandung oleh bahan bakar tersebut (Bagus, 2017).

Apabila ditinjau berdasarkan nilai kalor, jumlah energi yang terdapat dalam suatu massa atau volume bahan bakar dibedakan menjadi 2, antara lain (Bagus, 2017):

- a. Nilai kalor bawah atau *low heating value* (LHV) yang merupakan nilai kalor yang diperoleh dari hasil pembakaran 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud gas atau

uap).

Nilai kalor atas atau *high heating value* (HHV) yang merupakan nilai kalor yang diperoleh dari hasil pembakaran 1 kg bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap (air yang dihasilkan dari pembakaran berada dalam wujud cair).

2.2.7 Analisa Teknis dan Desain Gasifikasi

2.2.7.1 Menghitung nilai ultimate

a. Menghitung persentase dari *Fixed Carbon on a dry, mineral-matter free basis*

$$DMMFFC = \frac{FC}{FC+VOL} \times 100\% \quad (2.2)$$

Dimana: DMMFFC = *Dry mineral matter free fixed carbon* (%)

FC = *Fixed carbon* (%)

VOL = *Volatile Matter* (%)

b. Menghitung persentase dari *Volatile Matter on a dry, mineral-matter free basis*

$$DMMFVOL = \frac{VOL}{FC+VOL} \times 100\% \quad (2.3)$$

Dimana : DMMFVOL = *Dry mineral matter free volatile matter* (%)

FC = *Fixed carbon* (%)

VOL = *Volatile Matter* (%)

c. Menghitung Persentase *Carbon*

$$C = \frac{[(DMMFFC + 0,9 (DMMFVOL - 14)) \times (VOL + FC)]}{100} \quad (2.4)$$

Dimana : C = *Kandungan karbon* (%)

DMMFFC = *Dry mineral matter free fixed carbon* (%)

DMMFVOL = *Dry mineral matter free volatile matter* (%)

FC = *Fixed carbon* (%)

VOL = *Volatile Matter* (%)

d. Menghitung Persentase Nitrogen

$$N = \frac{[(2,1 - 0,012 \times DMMFVOL) \times (VOL + FC)]}{100} \quad (2.5)$$

Dimana : N = Kandungan nitrogen (%)
 DMMFFC = *Dry mineral matter free fixed carbon* (%)
 DMMFVOL = *Dry mineral matter free volatile matter* (%)
 FC = *Fixed carbon* (%)
 VOL = *Volatile Matter* (%)

e. Menghitung Persentase Hidrogen

$$H = \frac{\left[\left(\frac{DMMFVOL \times 7,35}{DMMVOL + 10} \right) - 0,013 \right] \times (VOL + FC)}{100} \quad (2.6)$$

Dimana: H = Kandungan hidrogen (%)
 DMMFFC = *Dry mineral matter free fixed carbon* (%)
 DMMFVOL = *Dry mineral matter free volatile matter* (%)
 FC = *Fixed carbon* (%)
 VOL = *Volatile Matter* (%)

f. Menghitung Persentase Oksigen

$$O = 100 - S - H - C - \text{Moisture} - N \quad (2.7)$$

Dimana: O = Kandungan oksigen (%)
 S = Kandungan sulfur (%)
 H = Kandungan hidrogen (%)
 C = Kandungan carbon (%)
Moisture = Kandungan air (%)
 N = Kandungan nitrogen (%)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.2.7.2 Sizing of The Engine

a. Low Heating Value Gas

$$LHV_{gas} = 11.2[H_2] + 13.1[CO] + 37.1[CH_4] + 83.8[C_n H_m] \quad (2.8)$$

Dimana: LHV_{gas} = Low Heating Value dari Gas (MJ/Nm³)

H_2 = Persentase dari kandungan hydrogen (%)

CO = Persentase dari kandungan carbon monoxida (%)

CH_4 = Persentase dari kandungan methane (%)

$C_n H_m$ = Persentase dari kandungan hidro carbon (%)

b. Maximum air-producer gas intake

$$V_{ag} = \frac{1}{2} \times r \times \text{Deg}/60 \quad (2.9)$$

Dimana: V_{ag} = Maximum air-producer gas intake (m³/s)

Deg = displacement dari mesin (m³)

r = Revlutions per menit (r/min)

c. Maximum Real Producer Gas Intake

$$V^{n_{ge}} = (1.0 \times 2.1) \times V_{ag} \quad (2.10)$$

Dimana : $V^{n_{ge}}$ = Maximum Real Producer Gas Intake (m³/s)

V_{ag} = Maximum air-producer gas intake (m³/s)

d. Real Produce Gas Intake

$$V'_{ge} = V^{n_{ge}} \times f_e \quad (2.11)$$

Dimana: V'_{ge} = Real Produce Gas Intake (m³/s)

$V^{n_{ge}}$ = Maximum Real Producer Gas Intake (m³/s)

f_e = fouling factor dalam mesin dengan nilai 0,8 (FAO, 1986)

e. Normal Volume Rate of Producer Gas

$$V_{ge} = V'_{ge} \times T_{ge}/T'_{ge} \quad (2.12)$$

Dimana: V_{ge} = Normal Volume Rate of Producer Gas (N m³ s⁻¹)

V'_{ge} = Real Produce Gas Intake (m³/s)

T_{ge} = Normal inlet temperature ke mesin

dengan nilai 31,10 K (Kivumbi, 2015)

T'_{ge} = Inlet temperature ke mesin merupakan suhu ruangan 298 K

f. *Thermal Power*

$$P_g = V_{ge} \times LHV_{gas} \quad (2.13)$$

Dimana: P_g = Thermal Power (kW)

V_{ge} = Normal Volume Rate of Producer Gas (Nm³ s⁻¹)

LHV_{gas} = Low Heating Value dari Gas (MJ/Nm³)

g. *The Maximum Electrical Output*

$$P_e = P_g \times \eta_e \quad (2.14)$$

Dimana P_e = The Maximum Electrical Output (kW)

P_g = Thermal Power (kW)

η_e = Electrical efficiency dari mesin (%)

2.2.7.3 Sizing of The Gasifier

a. *Thermal Power Consumption (Full Load)*

$$P_g' = P_g / \eta_g \quad (2.15)$$

Dimana: P_g' = Thermal Power Consumption (Full Load) (kW)

P_g = Thermal Power (kW)

η_g = Gasifier Efficiency Bernilai 0,7 (FAO, 1986)

b. *Biomass Consumption*

$$m_g = P_g' / LHV_{msw} \quad (2.16)$$

Dimana: m_g = Biomass Consumption (kg/s)

P_g' = Thermal Power Consumption (Full Load) (kW)

LHV_{msw} = Low Heating Value of MSW (MJ/kg)

c. *Specific Fuel Consumption*

$$sfc = m_g / P_e \quad (2.17)$$

Dimana: sfc = Specific Fuel Consumption (kg/kWh)

m_g = Biomass Consumption (kg/s)

P_e = The Maximum Electrical Output (kW)

d. *Total Number of Gasifier*

$$n_g = m_t / m_g \quad (2.18)$$

Dimana: n_g = *Total Number of Gasifier*
 m_t = *Mass Flow of MWS (kg/s)*
 m_g = *Biomass Consumption (kg/s)*

e. *Gas Production From Gasifier*

$$V_{gg} = V_{ge}' \times T_{gg} / T_{ge}' \quad (2.19)$$

Dimana: V_{gg} = *Gas Production From Gasifier*
 V_{ge}' = *Real Produce Gas Intake (m³/s)*
 T_{gg} = *Outlet temperature of producer gas dari gasifier (K)*
 T_{ge}' = *Inlet temperature ke mesin (K)*

f. *Cross Sectional Area*

$$A_h = V_{gg} / b_h \quad (2.20)$$

Dimana: A_h = *Cross Sectional Area (m²)*
 V_{gg} = *Gas Production From Gasifier (Nm³ s⁻¹)*
 b_h = *Heath Load (Nm³ s⁻¹) Bernilai 9000 Nm³ s⁻¹ (FAO, 1986)*

g. *Diameter of air inlet*

$$d_t = \sqrt{4A_h / \pi} \quad (2.21)$$

Dimana: d_t = *Diameter of air inlet (mm)*
 A_h = *Cross Sectional Area (m²)*

h. *Tinggi dari Nozzle plane*

$$h = 0.48d_t \quad (2.22)$$

dimana: h = *Tinggi dari Nozzle plane (cm)*
 d_t = *Diameter of air inlet (mm)*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

diameter of fire box

$$d_r = 2.1d_t \quad (2.23)$$

Dimana: d_r = diameter of fire box(mm)
 d_t = Diameter of air inlet (mm)

Nozzle diameter

$$1.7 = (100 \times 5 \times 0.25 \times \pi \times d_n^2) / (0.25 \times \pi \times d_t^2) \quad (2.24)$$

Dimana: d_t = Diameter of air inlet (mm)
 d_n = Nozzle Diameter (mm)

k. *Specific Gasification Rate*

$$SGR = m_g A_h \quad (2.25)$$

Dimana: SGR = Specific Gasification Rate ($\text{Kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$)
 m_g = Biomass Consumption (kg/s)
 A_h = Cross Sectional Area (m^2)

2.2.7.4 Sizing of Gas Cleaning System

2.2.7.3.1 Cyclone

a. Volume Flow Rate

$$V_c' = V_{ge}' \times T_c' / T_{ge}' \quad (2.26)$$

Dimana: V_c' = Volume Flow Rate (m^3/s)
 V_{ge}' = Real Produce Gas Intake (m^3/s)
 T_c' = The Cyclone Inlet Temperature (K).
 T_{ge}' = Inlet temperature ke mesin (K)

b. Gas Velocity

$$V_{gd} = 4V_c' / \pi D_p^2 \quad (2.27)$$

Dimana: V_{gd} = Gas Velocity (m/s)
 V_c' = Volume Flow Rate (m^3/s)
 D_p = diameter pipa (m)

c. Desain cyclone

(2.28)

$$B_c = D_c / 4$$

$$D_e = D_c / 2$$

$$H_c = D_c / 2$$

$$L_c = 2D_c$$

$$S_c = D_c / 8$$

$$Z_c = 2D_c$$

$$J_c = D_c / 4$$

Dimana: B_c = Panjang dari cyclone, Setara dengan diameter pipa (cm)

H_c = Tinggi dari cyclone, (cm)

d. Cyclone Inlet Velocity

$$V_{ic} = V_c' / B_c \times H_c \quad (2.29)$$

Dimana: V_{ic} = Cyclone Inlet Velocity (m/s)

B_c = Panjang dari cyclone, Setara dengan diameter pipa (cm)

H_c = Tinggi dari cyclone, (cm)

V_c' = Volume Flow Rate (m³/s)

2.2.7.3.2 Sizing of Venturi Scrubber

a. Gas Flow Rate at the Inlet of the Venturi Scrubber

$$V_s' = V_c' T_s' / T_c' \quad (2.30)$$

Dimana: V_s' = Gas Flow Rate at the Inlet of the Venturi Scrubber (m/s)

V_c' = Volume Flow Rate (m³/s)

T_c' = The Cyclone Inlet Temperature (K).

T_s' = Suhu Scrubber Inlet (K)

b. Gas Flow Rate at the Outlet of the Venturi Scrubber

$$V_s = V_s' \times f_v \quad (2.31)$$

Dimana: V_s = Gas Flow Rate at the Outlet of the Venturi Scrubber (m/s)

f_v = Volume Correction factor

V_s' = Gas Flow Rate at the Inlet of the Venturi Scrubber (m/s)

2.2.7.3.3 Sizing The Pump of Venturi Scrubber

a. *Water Flow Rate*

$$Q_L = 6.7 \times V_{s'} \quad (2.32)$$

Dimana: Q_L = *Water Flow Rate* (m³/s)

$V_{s'}$ = *Gas Flow Rate at the Inlet of the Venturi Scrubber* (m/s)

b. *Water Velocity*

$$V_w = 4Q_L / \pi d_i^2 \quad (2.33)$$

Dimana: V_w = *Water Velocity* (m/s)

Q_L = *Water Flow Rate* (m³/s)

d_i = *Diameter of Scrubber* (m)

c. *Density dari air*

$$\rho_w = 741.966 + 1.9613 \times T - 0.00371211 \times T^2 \quad (2.34)$$

Dimana: ρ_w = *density dari air* (kg/m³)

T = *Temperatur ruang* (K)

d. *Kinematic Velocity*

$$v = 10^{[-13,73 + 1830/T + 1.9613 \times T - 0.00371211 \times T^2]} \quad (2.35)$$

Dimana: v = *Kinematic Velocity* (m/s)

T = *Temperatur ruang* (K)

e. *Bilangan Reynolds*

$$Re = d_i V_w v \quad (2.36)$$

Dimana: Re = *Bilangan Reynolds*

d_i = *Diameter of Scrubber* (m)

V_w = *Water Velocity* (m/s)

v = *Kinematic Velocity* (m/s)

Hakipita, Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

f. *Friction Factor*

$$f = 64 / Re \quad (2.37)$$

Dimana: f = *Friction Factor*
 Re = *Bilangan Reynolds*

g. *Frictional Pressure Drop*

$$\Delta P_{ff} = f x L / d_i x \rho_w V_w^2 / 2 \quad (2.38)$$

Dimana: ΔP_{ff} = *Frictional Pressure Drop (N/m3)*
 f = *Friction Factor*
 d_i = *Diameter of Scrubber (m)*
 L = *Panjang Pipa (m)*
 ρ_w = *density dari air (kg/m3)*
 V_w = *Water Velocity (m/s)*

h. *Pump Power*

$$P_{pump} = Q_L \times \Delta P_{f.f} / \eta_p \quad (2.39)$$

Dimana: P_{pump} = *Pump Power*
 Q_L = *Water Flow Rate (m3/s)*
 ΔP_{ff} = *Frictional Pressure Drop (N/m3)*
 η_p = *efisiensi dari pump (%)*

2.2.7.3.4 Sizing Of Fine Filter

a. *Velocity Dari Gas Pada Fine Filter*

$$V_{gf} = B_H / R_T \quad (2.40)$$

Dimana: V_{gf} = *Velocity Dari Gas Pada Fine Filter (m/s)*
 B_H = *Bed Height (m)*
 R = *Retention Time (s)*

b.

Diameter Of Filter

$$D_f = \sqrt{V'_{ge}/V_{gf} \times \pi/4} \quad (2.41)$$

Dimana: D_f = *Diameter Of Filter* (m)

V'_{ge} = *Real Produce Gas Intake* (m³/s)

V_{gf} = *Velocity Dari Gas Pada Fine Filter* (m/s)

2.2.7.3.5 Sizing Of Fine Filter

a.

Gross Cloth Area

$$A_c = V'_{ge} / V_f \quad (2.42)$$

Dimana: A_c = *Gross Cloth Area* (cm²)

V'_{ge} = *Real Produce Gas Intake* (m³/s)

V_f = *Filtration Velocity* (cm/s)

b.

The bag Height

$$H_{cb} = A_c / \pi D_{cb} \quad (2.43)$$

Dimana: H_{cb} = *The bag Height*

A_c = *Gross Cloth Area* (cm²)

D_{cb} = *Bag Diameter* (cm)

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.2.8 Analisa Ekonomi

Analisis ekonomi kelayakan pemanfaatan sampah sebagai bahan baku untuk pembangkit listrik dilakukan dengan menggunakan metode *life cycle cost* yang terdiri dari *Payback Period* (PBP), *NetPresent Value* (NPV) dan *Internal Rate of Return* (IRR). Analisis ekonomi ini digunakan untuk mengetahui karakteristik finansial pemanfaatan PLTSa berdasarkan total aliran pendapatan tahunan (*inflow*) dan total aliran biaya tahunan (*outflow*).

Pada studi kelayakan pada sebuah penelitian perancangan pembangkit listrik tenaga sampah (PLTSa). Penting dilakukan perhitungan aspek ekonomi agar dapat memberikan gambaran tentang keuntungan yang didapat sehingga menjadi suatu parameter layak atau tidak pembangunan pembangkit tersebut.

Komponen biaya terdiri dari investasi gasifier, investasi lahan, biaya operational and maintenance (O&M) gasifier serta biaya produksi gas dari gasifier. Sedangkan kopenen pedapatan terdiri dari hasil penjualan listrik yang dihasilkan oleh pembangkit.

2.2.8.1 Perhitungan komponen biaya produksi PLTSa

Pada perhitungan komponen biaya produksi ini menerangkan metodologi untuk mengestimasi biaya-biaya yang timbul pada pembangunan pembangkit, adapun biayanya adalah :

a. biaya investasi

biaya ini bergantung pada kapasitas pembangkit, penyedia teknologi dan peralatan, biaya kontraktor dan kondisi lokasi dengan nilai biaya inverstasi sebesar 2100 – 7000 US\$/kW (IRENA, 2017).

Detail dari biaya investasi yaitu 2% pengerjaan sipil, 2,3% untuk bangunan, 13,3% untuk peralata pondasi/ atau peralatan pendukung, 7,6 % untuk perpipaan, 9% untuk alat kelistrikan, 5% untuk instrumen, 2 % untuk proses insulation / painting dan 59% untuk peratatan menbangkit.(NREL, 2012) , jadi biaya investasi dapat di hitung sebagai berikut

$$7000 \text{ US\$/kW} \times \text{kapasitas pembangkit} \quad (2.44)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- b. biaya investasi lahan
biaya investasi lahan berguna untuk kegiatan penyiapan lahan guna tempat pemasangan gasifier. biaya investasi di tentukan oleh luas area dari sebuah gasifier dan harga lahan yang ada di daerah tersebut. biaya investasi lahan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\text{biaya investasi lahan} = \text{luas alas reaktor} \times \text{harga/m}^2 \quad (2.45)$$

- c. biaya O&M gasifier
biaya O&M pada gasifier terbagi menjadi biaya tetap dan biaya terkait, biaya tetap dapat dinyatakan sebagai persentase dari *capital cost* untuk pembangkit listrik biomassa biayanya bekisar 4% pertahun, biaya O&M tetap terdiri dari tenaga kerja, penjaga rutin, penggantian komponen/peralatan rutin gasifier, asuransi, dll. Sedangkan biaya O&M terkait biasanya bergantung kepada output dari sistem, biaya terkait terdiri dari biaya bahan bakar non-biomassa, pembuangan abu, perawatan yang tidak direncanakan, dan biaya servis tambahan (IRENA,2017). Biaya O&M tetap dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$4\% \times \text{biaya instalasi gasifier} \quad (2.46)$$

Sedangkan biaya O&M terkait dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$4 \text{ USD} \times \text{kapasitas pembangkit} \quad (2.47)$$

- d. biaya produksi energi listrik
biaya produksi energi ditentukan oleh dari biaya operasional dan pemeliharaan serta biaya penyusutan dari modal selama masa usia proyek(25 tahun). Besarnya biaya penyusutan modal selama 20 tahun diperoleh dengan menggunakan rumus:

$$\text{Biaya penyusutan modal} = \frac{\text{total biaya investasi}}{\text{usia proyek}} \quad (2.48)$$

2.2.8.2 Perhitungan biaya komponen pendapatan

Komponen pendapatan yaitu hasil penjualan energi listrik yang di bangkitkan oleh pembangkit, sama seperti perhitungan biaya komponen, perhitungan komponen dilakukan terhadap jenis teknologi yang akan dipakai. Pendapatan dari PLTSa ini ialah keuntungan dari penjualan hasil energi listrik yang dihasilkan

2.1.9 Analisa Kelayakan *Financial*

Dalam rangka untuk menilai apakah proyek dapat diterima atau tidak teknik analisa *financial* yaitu melakukan analisa terhadap *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR) dan *Payback Period* (PBP).

2.1.9.1 *Net Present Value* (NPV)

Metode NPV digunakan untuk mengevaluasi kelayakan suatu proyek. Hal ini didasarkan pada perhitungan nilai sekarang dari arus kas dalam periode yang ditentukan waktu. Arus kas merupakan selisih antara manfaat dan biaya dari tahun ditentukan NPV dapat dihitung dengan persamaan 2.14.

$$NPV = \sum_{t=0}^N Rt * (((1 + i)^t - 1)/i * (1 + i)^t) - Rto * (1 + i)^t \quad (2.49)$$

Keterangan:

- i = tingkat diskonto (%)
- N = jumlah total periode (tahun)
- Rt = arus kas masuk pada tahun t (Rp)
- Rto = investasi awal + arus kas keluar proyek (Rp)

Tingkat diskonto dalam persamaan 2.14 adalah suku bunga yang digunakan untuk menghitung nilai sekarang dari arus kas masa depan. Hal ini juga mencerminkan risiko inversi. Untuk penelitian ini, diasumsikan nilai 8% dan jumlah periode diasumsikan 20 tahun (Garcia, 2014). Periode waktu ini adalah umur rata-rata untuk teknologi biogas dengan pemeliharaan rutin.

Interpretasi dari hasil NPV tergantung pada jumlah yang diperoleh. Jika nilai NPV positif, proyek tersebut menguntungkan dan sebaliknya jika nomor tersebut adalah negatif. Tujuan dari metode NPV adalah untuk menunjukkan jika biaya modal proyek dapat ditutupi dengan kembalinya investasi selama periode waktu (Garcia, 2014).

2.2.10.2 Internal Rate Of Return (IRR)

Biasanya ketika mengevaluasi NPV, itu juga dihitung tingkat pengembalian internal. IRR adalah tingkat diskonto di mana NPV adalah nol. Oleh karena itu, IRR adalah nilai ketika nilai sekarang dari biaya dan nilai sekarang dari manfaat yang sama (Garcia, 2014). Sebagai aturan jika IRR lebih besar untuk nilai investasi dari proyek, investasi harus dilakukan. Sebaliknya, jika IRR lebih rendah untuk nilai investasi proyek tidak boleh dilakukan. Persamaan dibawah dapat digunakan untuk menghitung nilai IRR.

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 + NPV_2} \times i_2 - i_1 \quad (2.50)$$

Keterangan :

NPV₁ = nilai NPV pada suku bunga rendah (Rp)

NPV₂ = nilai NPV pada suku bunga tinggi (Rp)

I₁ = nilai suku bunga rendah/pertama (%)

I₂ = nilai suku bunga tinggi (%)

2.2.10.3 Payback Periode (PBP)

Waktu pengembalian modal merupakan jumlah yang diperlukan dari tahun untuk memulihkan semua biaya investasi (Garcia, 2014). PBP dihitung menggunakan Persamaan berikut.

$$PBP = \frac{\text{Total Investasi}}{\text{Arus Kas Masuk Tahunan}} \quad (2.51)$$