NERACA MASA DAN NERACA ENERGI PENGELOLAAN SAMPAH TERPADU – PENUJAH KABUPATEN TEGAL

Maxmilian Antonius Alexander
PT. Emerson Process Management, Jakarta
Email: maxanto@yahoo.com

ABSTRAK

Salah satu daerah di Indonesia yang sedang mengalami masalah dengan volume sampah dan penanganannya adalah Kabupaten Tegal, tepatnya di TPS Penujah. Untuk mengatasi permasalahan sampah di TPS Penujah tsb, diusulkan penanganannya melalui "Pengolahan sampah terpadu" dengan konsep *zero waste*, yaitu konsep yang bertujuan untuk mendaur ulang hampir seluruh sampah perkotaan. Pengolahan sampah terpadu (PST) dengan konsep *zero waste* adalah memanfaatkan sampah semaksimal mungkin dengan menggunakan berbagai teknologi pemisahan dan teknologi konversi sampah menjadi bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan mengenai "bagaimana neraca masa dan neraca energi" dari PST Penujah dan kelayakan teknisnya.Berdasarkan data sampah yang dapat di angkut ke TPA Penujah yaitu sebesar: 138 ton per hari, dari perhitungan neraca energi dan neraca masa diperoleh bahwa PST Penujah menghasilkan energi netto yang positif sebesar 25 mW, dengan produk utama adalah bensin - dengan output 2371 liter/jam.

Kata kunci : *pengolahan sampah terpadu, Penujah, zero waste, pirolisa, pencernaan biologi.*

ABSTRACT

TPS Penujah which is located in Tegal regency,currently is facing problem with municipal solid waste that continues to accumulate. To overcome the problem of waste in the TPS Penujah, it is proposed to deal with "Integrated waste processing" with the concept of zero waste, which is a concept that aims to recycle almost all urban waste. Integrated waste management (PST) with the concept of zero waste is to use waste as much as possible by using various separation technologies and the technology of converting waste into fuel. This study aims to answer the question of "how is the mass balance and energy balance" of the PST Penujah, and "does zero waste processing of integrated waste by utilizing these various technologies be technically feasible?". Based on the data of waste that can be transported to the TPA Penujah which is: 138 tons per day, from the calculation of the energy balance and the period balance, the PST Penujah produces positive net energy of 25 mW, with the main product being gasoline - with an output of 2371 liters / hour.

Keywords : *integrated waste management, Penujah, zero waste, pyrolysis, biodigestion, feasibility.*

I. PENDAHULUAN

1.1 Penanganan Sampah di Kota Tegal

Salah satu daerah yang sedang mengalami masalah dengan volume sampah dan penanganannya adalah Kabupaten Tegal. Berbagai usaha telah dilakukan termasuk pembangunan tempat Pengelolaan Sampah Terpadu (PST) disejumlah kelurahan, namun hasilnya belum maksimal.

Berdasarkan data dari Dinas Permukiman dan Tata Ruang (DISKIMTARU) Kota Tegal, total timbulan sampah di Kota Tegal pada tahun 2013 yaitu sekitar 737,85 m3/hari. Jumlah tersebut pada lima tahun terakhir menunjukan angka yang terus meningkat yaitu dari 700 m3/hari pada tahun 2009 dan 2010 bertambah menjadi 725 m3/hari di tahun 2011 dan seterusnya sampai tahun 2013 mengalami peningkatan sebesar 737,85 m3/hari, berbanding lurus dengan pertambahan jumlah penduduk setiap tahunnya.

Berdasarkan hasil studi EHRA, sampah rumah tangga (berasal dari permukiman) dalam hal pengelolaannya sudah dilakukan pemilahan sampah plastik pada 39,1% rumah tangga, sampah organik/sampah basah sebanyak 14,5%, dan gelas/kaca sebanyak 15,3%. Sedangkan 31,9% rumah tangga telah melakukan pemilahan sampah kertas dan 40,6% berupa besi/logam, sedangkan 10% rumah tangga tidak tahu cara pemilahan sampah. Dari data tersebut tampak bahwa salah satu pertimbangan dari pemisahan jenis sampah terkait dengan peluang dari pasca pemilahan itu sendiri, dimana barang yang mempunyai nilai ekonomis lebih tinggi akan

menimbulkan ketertarikan lebih dalam pemilahannya. Nampak bahwa besi/logam mempunyai jumlah terbesar yakni 40,6%, diikuti berikutnya plastik 39,1% dan kertas 31,8%. Menyimak data tersebut, maka Pemerintah Kota Tegal berupaya lebih memikirkan aspek pemanfaatan hasil pemilahan sampah yang dapat bernilai ekonomis agar lebih menarik minat masyarakat terlibat dalam pemilahan sampah rumah tangga, sehingga program 3R (*reduce, reuse dan recycle*) dapat berjalan dengan baik.
Sementara itu berdasarkan DPU Kabupaten Tegal, perkembangan produksi dan volume sampah yang terangkut perhari di Kabupaten Tegal untuk tahun 2013 hingga 2015 dalam prosentasi disajikan pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Prosentase Komposisi Sampah Kabupaten Tegal

	Kertas	Kayu	Kain	Karet/ Kulit	Plastik	Metal/ Logam	Glass/ Kaca	Organ ik	Lain-Lain
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2013 (%)	15,30	1,00	2,00	2,50	42,30	1,20	1,40	33,30	1,00
2014 (%)	15,35	1,00	2,00	2,35	40,15	1,20	1,40	33,35	1,05
2015 (%)	16,67	2,48	9,59	1,84	45,62	0,74	4,75	16,87	1,44

1.2 Solusi PST dengan Konsep *Zero Waste*

Untuk menangani permasalahan sampah di kota Tegal tersebut, penyediaan TPA (Tempat Pembuangan Akhir) sampah hanya bisa menjadi solusi sementara, mempertimbangkan bahwa pada akhirnya tumpukan sampah pada TPA akan terus semakin meningkat seiring dengan berjalannya waktu, sehinga pada akhirnya tumpukan sampah tersebut menjadi tidak tertangani. Unuk itu diperlukan suatu solusi yang bisa menghilangkan sampah tersebut selamanya.
Proses daur ulang dilakukan dengan mengubah sampah hidrokarbon seperti sampah plastik, karet, kayu, kertas, kain menjadi bahan bakar, baik itu bahan bakar RDF (*Refused Derive Oil*), biosolar, bensin, maupun gas. Pirolisa dipertimbangkan sebagai solusi yang tepat untuk menangani sampah plastik yang terus menumpuk ini dengan laju penumpukan yang besar; sedangkan biodigestasi merupakan solusi yang baik untuk penanganan sampah organik. Konsep PST adalah bagaimana memanfaatkan sampah semaksimal mungkin, dimana sampah hidrokarbon di ubah menjadi bahan bakar gas, cair dan padat. Bahan bakar gas akan digunakan untuk pembangkit listrik tenaga gas, bahan bakar cair akan digunakan sebagai bahan bakar untuk truk pengangkutan sampah, sedangkan bahan bakar padat (RDF) akan digunakan sebagai bahan pakar proses pirolisa yang merubah plastik menjadi bahan bakar.

1.3 Perumusan Masalah

Adanyabiaya investasiyangsangat tinggiyangharus dikeluarkanuntukproyek PST tersebut, menyebabkanpembangunanPSTharusdiujikelayakannya.Berdasarkanuraian di atasmakaperumusanmasalahyangakandibahaspada penelitianiniadalah : apakah proyek PST Penujah ditinjau dariaspekteknis.
Penelitian ini bermaksud untuk menjawab pertanyaan pokok yang ingin dipecahkan terkait dengan disain PST serta sistem pirolisa yang digunakan, yaitu:
"Bagaimana neraca masa, neraca energidari sistem pilot PST Penujah dengan konsep Zero Waste"

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:
1. Mengetahui produk bahan bakar dan produk daur ulang lainnya yang dihasilkan oleh PST Penujah.
2. Mengetahui neraca masa dan neraca energi dari proses pirolisa dan proses PST Penujah.

1.5 Batasan dan Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini hanya mencakup neraca masa, neraca energi dari PST Penujah.
Sementara itu neraca energi yang di tinjau adalah neraca energi dari sistem PST Penujah secara menyeluruh, sedangkan neraca energi untuk subsistem hanya ditinjau sebatas proses pirolisa saja guna menghitung kebutuhan bahan bakar RDF. Sementara itu perhitungan produk pirolisa dan pencernaan biologi yang dihasilkan beserta kondisi reaksi pirolisa yang terjadi didalam reaktor adalah berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian-penelitian sebelumnya mengenai selektifitas produk pirolisa dan pencernaan biologi.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Proses Pengolahan Sampah Secara Fisik

Proses pengolahan sampah pada Pengolahan Sampah Terpadu melibatkan beberapa proses seperti: proses penyortiran sampah yang bertujuan untuk pengelompokan sampah berdasarkan jenisnya agar mudah diproses, serta proses penghancuran sampah yang bertujuan untuk mengurangi ukuran sampah padat agar mudah di proses lebih lanjut [1].Setelah pengumpulan, langkah selanjutnya yang terlibat dalam sistem pengelolaan limbah padat perkotaan adalah pemilahan atau pemisahan berbagai jenis limbah untuk diproses lebih lanjut. Di antara semua langkah penyortiran adalah langkah yang menentukan untuk digunakan kembali dan didaur

ulang. Selain dapat dilakukan dengan tenaga manusia, proses penyortiran sampah saat ini bisa dilakukan secara otomatis dengan menggunakan beberapa teknologi pemisahaan yang ada [2]. Teknologi terbaru untuk pemilahan sampah kota antara lain : dengan menggunakan penyaringan yang berputar, pemisahan dengan medan magnet [3], pemisahan logam selain besi dengan eddy current, teknologi pemisahan dengan klasifikasi udara, dan teknologi penyortiran berdasarkan sensor optik.

2.2 Pirolisa Berkatalis

Pirolisa berkatalis pada prinsipnya sama dengan proses pirolisa termal dengan bantuan katalis. Tiga jenis katalis yang banyak digunakan dalam pirolisis plastis adalah katalis zeolit, katalis perengkahan cairan (FCC) dan katalis silika-alumina. Penggunaan katalis zeolit dalam pirolisis sampah plastik kota nyata juga dapat membantu mengurangi kotoran dalam minyak yang dihasilkan dan ini terbukti dalam penelitian yang dilakukan oleh Miskolczi et al. [4]. Selain zeolit, penggunaan katalis FCC yang dikeluarkan juga dapat meningkatkan konversi plastik dalam pirolisis. Menurut Kyong et al, jumlah residu padat yang tersisa berkurang drastis dari 4,5 hingga 0,9% berat dan ini menunjukkan bahwa konversi dimaksimalkan [4]. Selain kedua katalis ini, beberapa peneliti juga memilih untuk menggunakan katalis silika-alumina yang merupakan jenis asam amorf. Konsentrasi asam katalis silika alumina ditentukan oleh rasio mol SiO2 / Al2O3. Kekuatan keasaman yang berbeda dalam katalis memiliki pengaruh besar dalam produk akhir pirolisis plastik. Sakata dkk. [4] mengeksplorasi efek keasaman katalis (SA-1, SA-2, ZSM-5) pada distribusi produk pirolisis HDPE dan menemukan bahwa katalis SA-2 dengan keasaman rendah menghasilkan jumlah minyak cair yang lebih tinggi (74,3% berat) , diikuti oleh SA-1 (67,8% berat) dan ZSM-5 (49,8% berat). ZSM-5 memiliki situs asam kuat, sehingga menghasilkan lebih banyak produk gas daripada dua katalis asam lainnya tetapi hasil cairannya sangat kurang. Oleh karena itu, penggunaan katalis zeolit dalam pirolisis plastis hanya memaksimalkan produksi hidrokarbon yang mudah menguap sementara FCC dan silika-alumina memaksimalkan produksi minyak cair.

Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan, PET dan PVC adalah dua plastik yang menghasilkan hasil yang sangat rendah dari minyak cair dibandingkan dengan jenis plastik lainnya, yang membuat plastik ini jarang dieksplorasi oleh para peneliti. Tidak semua jenis plastik direkomendasikan untuk pirolisis. PVC tidak disukai dalam pirolisis karena menghasilkan produk utama asam klorida berbahaya dan hasil yang sangat rendah dari minyak cair. Selain itu, minyak pirolisis juga mengandung senyawa terklorinasi yang akan menurunkan kualitas minyak dan juga beracun bagi lingkungan. Dalam kebanyakan plastik, penggunaan katalis dalam proses dapat meningkatkan hasil minyak cair, tetapi PS luar biasa. Ini karena PS terdegradasi dengan sangat mudah tanpa perlu katalis untuk mempercepat reaksi dan 97%% dari minyak yang dihasilkan [4]. Oleh karena itu, PS adalah plastik terbaik untuk pirolisis karena menghasilkan jumlah produksi minyak cair tertinggi di antara semua plastik. Adapun jenis plastik poliolefin, LDPE menghasilkan hasil minyak cair tertinggi (93,1% berat), diikuti oleh HDPE (84,7% berat) dan PP (82,12% berat) dalam pirolisis termal. Namun, dengan penambahan katalis seperti FCC dan pada suhu operasi yang tepat, hasil cair dapat lebih dimaksimalkan hingga di atas 90% berat.

2.3 Produk Pirolisa Plastik

Dari berbagai percobaan pirolisa, disimpulkan bahwa suhu yang paling efektif untuk mengoptimalkan hasil minyak cair dalam pirolisis plastik akan berada di kisaran 500-550^0 C untuk pirolisis termal. Namun, dengan penggunaan katalis dalam pirolisis, suhu optimum dapat diturunkan hingga 450^0 C dimana hasil cairan yang diperoleh akan lebih tinggi. Dalam kebanyakan plastik, penggunaan katalis dalam proses dapat meningkatkan hasil minyak cair, kecuali pada PS. Dimana menurut penelitian J.A. Onwudili dan Insura (2009) karena PS terdegradasi dengan sangat mudah tanpa perlu katalis untuk mempercepat reaksi dan 97% dari hasil adalah minyak yang dihasilkan. Oleh karena itu PS adalah plastik terbaik untuk pirolisis karena menghasilkan jumlah produksi minyak cair tertinggi di antara semua plastik. [4]

Sebagaimana yang dikemukakan oleh J.A. Onwudili dan Insura, hasil dari proses pirolisa plastik berdasarkan berbagai percobaan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa suhu yang paling efektif untuk mengoptimalkan hasil minyak cair dalam pirolisis plastik akan berada di kisaran 500-550^0 C untuk pirolisis termal. Namun, dengan penggunaan katalis dalam pirolisis, suhu optimum dapat diturunkan hingga 450^0 C dan hasil cairan yang lebih tinggi diperoleh.

2.4 Teknologi Pencernaan Anaerobik

Pencernaan anaerobik adalah serangkaian proses biologis di mana mikroorganisme memecah bahan *biodegradable* tanpa melibatkan oksigen. Biogas terutama terdiri dari metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2).

Menurut Gregor D. Zupančič didalam R Kigozi, kondisi yang mempengaruhi proses pencernaan *anaerobic digestion* adalah sebagai berikut [5]:suhu digester. Suhu di dalam digester memiliki pengaruh besar pada proses produksi biogas. Ada berbagai rentang suhu selama fermentasi anaerob dapat berlangsung;

a) Psikofilik (<30^{o}C)
b) Mesofilik (30 - 40^o C)
c) Termofilik (50 - 60^o C)

Anaerob paling aktif dalam rentang suhu mesofilik dan termofilik. Metanogen tidak aktif dalam suhu yang terlalu tinggi dan terlalu rendah, suhu optimum nya adalah 35°C, dan pada saat suhu lingkungan turun hingga di bawah 10°C produksi gas berhenti. Produksi gas yang memuaskan terjadi dalam kisaran mesofilik yaitu antara 25ºC sampai 30°C. Faktor-faktor lainnya yang mempengaruhi proses pencernaan anaerobic digestion adalah: konsentrasi bahan baku, laju umpan, komposisi bahan pakan dan nutrisi, waktu retensi hidrolik (HRT), nilai pH, rasio Karbon-Nitrogen, toksisitas, agitasi, kekedapan udara, dan kadar kandungan air.

2.5 Neraca Massa

Neraca massa adalah suatu perhitungan yang tepat dari semua bahan-bahan yangmasuk, yang terakumulasi dan yang keluar dalam waktu tertentu. Pernyataan tersebut sesuai dengan hukum kekekalan massa yakni: massa tak dapat dijelmakan atau dimusnahkan.

Prinsip umum neraca massa adalah membuat sejumlah persamaan-persamaan yang saling tidak tergantung satu sama lain, dimana persamaan-persamaan tersebut jumlahnya sama dengan jumlah komposisi massa yang tidak diketahui [6].

2.6 Neraca Energi

Perhitungan neraca energi dilakukan berdasarkan hukum pertama termodinamika, atau biasa disebut dengan hukum kekekalan energi. Bentuk umum dari hukum pertama termodinamika untuk aliran steady ditunjukkan pada persamaan berikut ini [7]:

$$\Delta Q - \Delta W = \sum m_c \left(h_c + \frac{v^2}{2} + g z_e\right) - \sum m_i \left(h_i + \frac{v^2}{2} + g z_e\right) + Q_L + Q_A \quad (1)$$

Dengan mengabaikan kerja listrik (W), serta energi kinetik dan energi potensial material yang masuk dan keluar sistem, maka "Persamaan diatas" d apat ditulismenjadi Persamaan dibawah ini.

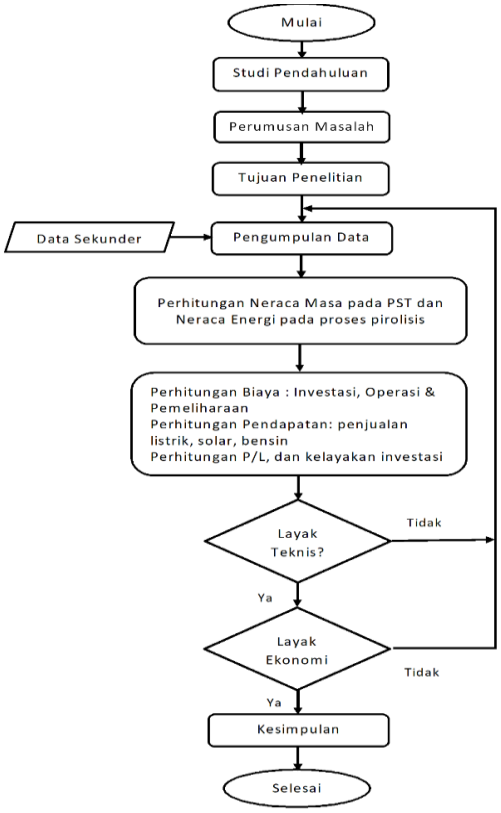
$$\Delta Q = m \int_{T_{ref}}^{T} Cp \; dT + Q_L + Q_A \quad (2)$$

Dimana:
ΔQ :energi panas yang masuk kedalam sistem
C_p:kapasitas panas pada tekanan konstan
Q_L:kalor laten, Q_A:panas aktivasi

III. METODE PENELITIAN

3.1 Sistematika Penelitian

Sistematika penelitian adalah sebagaimana yang digambarkan pada diagram dibawah ini:



Gambar 1. Kerangka penelitian

3.2 Teknik Pengumpulan Data

Dalam mengumpulkan data-data, penulis menggunakan beberapa metode sebagai berikut:

1. Metode Wawancara, yaitu pengumpulan data dengan menanyakan langsung kepada pembimbing ataupun petugas lapangan mengenai, data lingkungan dari TPA Penujah, serta hal-hal yang berkaitan dengan permasalahan yang sering timbul.
2. Metode Literatur, yaitu pengumpulan data yang terkait dengan pengelolaan sampah di kota Tegal dan TPA Penujah, serta dengan mengacu pada buku-buku teknik, dan jurnal yang terkait dengan proses pirolisis, proses perpindahan panas, dan termodinamika, serta buku dan jurnal ekonomi keuangan yang terkait dengan anggaran modal dan biaya.

IV. HASIL dan PEMBAHASAN

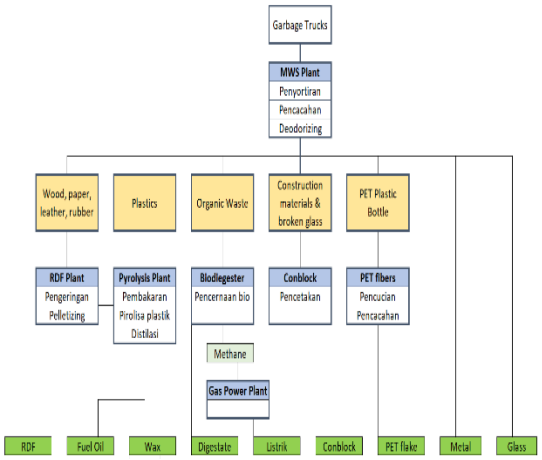
4.1 Aspek Teknis

Pengolahan sampah dilakukan melalui beberapa tahap transformasi baik secara fisik, kimia dan biologi, yaitu sbb:

4.2 Konsep Zero Waste

Adapun proses pengolahan sampah terpadu PST Penujah dilakukan dengan konsep "zero waste" dimana semua jenis sampah rumah tangga akan di daur ulang melaui proses transformasi fisik, kimia, dan biologi. Dengan demikian diharapkan produk samping yang dihasilkan dapat diminimalisir.

Keseluruhan proses pengolahan sampah terpadu PST Penujah adalah sebagaimana digambarkan pada began dibawah ini:



Gambar 2. Skema proses pengolahan sampah terpadu PST Penujah

4.3 Kondisi Material Yang Masuk dan Keluar

Material masuk ke tempat pengolahan sampah: 5729,17 kg/jam. Komposisi dan laju material adalah sbb:

Tabel 2. Data komposisi material masuk PST

No	Material	in %	in kg/jam
1	Kertas	16,67%	955,05
2	Kayu	2,48%	142,08
3	Kain	9,59%	549,43
4	Karet/Kulit	1,84%	105,42
5	Plastik	45,62%	2.613,65
6	Metal/Logam	0,74%	42,40
7	Glass/Kaca	4,75%	272,14
8	Organik	16,87%	966,51
9	Lain2	1,44%	82,50
Total		100.00%	100,00%

4.4 Perhitungan Neraca Masa

Komposisi plastik yang masuk kedalam PST adalah diasumsikan sbb:

Tabel 3. Asumsi komposisi sampah plastik masuk PST

Material	State	Kg/jam	Composition
Plastik-LDPE	solid	522,73	20%
Plastik-HDPE	solid	522,73	20%
Plastik – PET	solid	548,87	21%
Plastik – PVC	solid	0,00	0%
Plastik – PP	solid	836,37	32%
Plastik – PS	solid	182,96	7%
	TOTAL	2.613,65	100%

Dimana kemudian didalam unit pengolahan sampah plastik PET dan PVC yang ditemukan akan dipisahkan didalam proses penyaringan sampah plastik, sehingga komposisi sampah plastik yang akan masuk ke unit pirolisa menjadi sebagai berikut:

Tabel 4. Komposisi sampah plastik masuk sistem pirolisa

Material	State	in kg	Komposisi
Plastik-LDPE	solid	522,73	25%
Plastik-HDPE	solid	522,73	25%
Plastik - PET	solid		0%
Plastik - PVC	solid		0%
Plastik - PP	solid	836,37	41%
Plastik - PS	solid	182,96	9%
	TOTAL	2.064,78	100%

Katalis yang digunakan adalah FCC dengan pertimbangan bahwa pirolisa plastik dengan katalis FCC termasuk yang paling banyak dilakukan, sehingga ketersediaan data yang lebih menunjang. Suhu reaksi pirolisa yang digunakan adalah 430^{o}C sampai dengan 500^{o}C dengan pertimbangan bahwa pada beberapa polimer plastik yaitu HDPE dan PP komposisi produk cair yang dihasilkan yaitu produk yang paling diinginkan dari proses pirolisa TPA Penujah ini bisa mendekati optimal apabila dilakukan pada suhu tersebut apabila menggunakna katalis FCC. Berdasarkan rangkuman dan evaluasi, diperoleh sbb:

Tabel 5. Distribusi produk pirolisa plastik

Material	Method	T (°C)	Catalyst	Stirring Rate (RPM)	Wax (wt%)	Oil (wt%)	Gas (wt%)	Solid (wt%)
LDPE	Batch	430	-	-	8,7	75,6	8,2	7,5
HDPE	Semi-batch	400	FCC 10%	200	0	82	16	2
PET	–	500	-	-	0	38,89	52,13	8,98
PVC	Fixed bed	500	-	-	0	12,3	87,7	0
PP	Semi-batch	450	FCC 10%	50	0	92,3	4,1	3,6
PS	Semi-batch	400	FCC 10%	200	0	90	6	4

Dengan menggabungkan data tsb diatas dengan data distribusi nomor karbon pirolisa HDPE Dan dengan asumsi bahwa distribusi nomor karbon pirolisa plastik lainnya (LDPE, PP, dan PS) mengikuti distribusi nomor karbon pirolisa HDPE tsb diatas, maka diperoleh hasil dari pirolisa sbb:

Tabel 6. Perkiraan hasil produk pirolisa plastik

Material	LDPE	HDPE	PET	PVC	PP	PS	Output (kg/jam)
Method	Batch	Semi-batch	–	Fixed bed	Semi-batch	Semi-batch	
T (°C)	430,0	400,0	500,0	500,0	450,0	400,0	
Catalyst	-	FCC 10%	-	-	FCC 10%	FCC 10%	
Stirring Rate (RPM)	-	200.0	-	-	50.0	200.0	
Input (kg/jam)	522,7	522,7	0,0	0,0	836,4	183,0	
Wax	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,48
Oil (wt%)	75,6	82,0	38,9	12,3	92,3	90,0	
Gasoline (wt%)	65,6	71,2	33,8	10,7	80,1	78,1	1,528,17
Diesel (wt%)	10,0	10,8	5,1	1,6	12,2	11,9	232,28
Gas (wt%)	8,2	16,0	52,1	87,7	4,1	6,0	171,77
Solid (wt%)	7,5	2,0	9,0	0,0	3,6	4,0	87,09
Total							2.064,78

4.5 Perhitungan Neraca Energi

Perhitunga neraca energi adalah berdasarkan energi yang masuk kedalam sistem dan yang keluar dari sistem. Sistem disini adalah sistem proses pirolisa dan proses pendinginan pada kondensor. Sedangkan tungku dimana terjadi proses pembakaran RDF adalah diluar sistem.

Persamaan neraca energi nya adalah sbb:

$$Q_{out} = \Delta Q_{gen} - \Delta Q_{Temp\ Raise} + Q_{in} \quad (9)$$

Sementara:

$$\Delta Q_{in} = \Delta Q_{RDF\ comb} + \Delta Q_{gas\ comb} \quad (10)$$

Yaitu energi kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran RDF pada tungku;
dan:

$$\Delta Q_{gen} = \Delta Q_{reaction} - \Delta Q_{melting} - \Delta Q_{condens} \quad (11)$$

Dimana kalor yang dihasilkan (ΔQ_{gen}) merupakan kalor yang dihasilkan dari reaksi pirolisa ($\Delta Q_{reaction}$), dikurang kalor yang dibutuhkan untuk melelehkan plastik ($\Delta Q_{melting}$) ditambah kalor yang diserap selama proses kondensasi uap hasil dari pirolisa (ΔQ_{conden}).
Sementara itu :

$$\Delta Q_{reaction} = m * Ea$$
$$\Delta Q_{Temp\ Raise} = m_i * Cp_i * \Delta T$$
$$\Delta Q_{evaporation} = m * L_v$$

Sehingga:

$$\Delta Q_{out} = \Delta Q_{reaction} - \Delta Q_{melting} - \Delta Q_{conden} - \Delta Q_{Temp\ Raise} + \Delta Q_{in} \quad (12)$$

Dimana:

- $\Delta Q_{reaction}$ adalah kalor yang di hasilkan atau diserap dalam proses pirolisa.
- $\Delta Q_{melting}$ adalah kalor yang dibutuhkan untuk mencairkan plastik
- $\Delta Q_{condensation}$adalah kalor yang dilepas materi hidrokarbon selama proses kondensasi.

4.6 Neraca Energi pada Sub Sistem Pirolisa

Proses pirolisa diasumsikan *terjadi pada suhu 430^oC sd 450 ^oC* dengan menggunakan katalis FCC. Kemudian hidrokarbon hasil dari proses pirolisa tersebut dialirkan melalui kondensor 1; disini suhu hidrokarbon tsb diturunkan hingga suhu 360^{o}C yaitu suhu dimana paraffin mengalami pengembunan sehingga terjadi pemisahan antara parrafin (wax) dalam bentuk cair dengan uap hidrokarbon dimana wax dialirkan menuju kondensor 4 untuk didinginkan lagi hingga mendekati suhu ambient (36^{o}C). Sisa uap hidrokarbon tsb dialirkan menuju kondensor 2 untuk didinginkan hingga mencapai suhu 216^{o}C yaitu suhu pengembunan diesel; kemudian diesel cair ini akan didinginkan lebih lanjut pada kondensor 5 agar suhu nya mendekati suhu ambient. Sisa uap hidrokarbon dari kondensor 2 dialirkan menuju kondensor 3 dimana uap hidrokarbon didinginkan hingga mencapai suhu pengembunan bensin yaitu 36^{o}C, sehingga terjadi pemisahan antara bensin dengan sisa hidrokarbon yaitu gas yang terdiri dari gas $C_1 – C_5$. Kemudian gas tersebut dialirkan ke furnace menjadi bahan bakar tambahan untuk reactor.
Perhitungan energi kalor yang diproduksi dan diserap dalam sistem adalah sebagaimana pada tabel dibawah ini:

Tabel 7. Perhitungan energi kalor yang dihasilkan sistem pirolisa

Proses	Perubahan Kalori	Rumus	m	Cp	Lm	Ea	Ti	To	ΔQ
			(kg/jam)	kJ/kg°C	kJ/kg	kJ/kg	(°C)	(°C)	kJ/jam
Penyerapan kalor - plastik	ΔQ - Temp Raise	m*Cp* (To-Ti)	2064,8	1,64	na	na	25	430	-1.367.616
Penyerapan kalor - RDF	ΔQ - Temp Raise	m*Cp* (To-Ti)	1339,2	1,372	na	na	25	25	0
Pencairan plastik	ΔQ - melting	m*Lm	2064,8		239	na			-494.172
Reaksi pirolisa	ΔQ - reaction	m*Ea	2064,8		na	5.189,70			-10.715.582
Total									-12.577.370

Energi kalor yang keluar sistem adalah sebagaimana yang di paparkan pada table 16 dibawa ini:

Tabel 8. Perhitungan energi kalor yang keluar sistem pirolisa

Proses	Perubahan Kalori	Rumus	m	Cp	Le	Ti	To	ΔQ
			(kg/jam)	kJ/kg°C	kJ/kg	(°C)	(°C)	kJ/jam
Kondensasi pada kondensor 1	ΔQ - condensing	m_{vap}*Le	45,5	na	334,7	na	na	15,222
Kondensasi pada kondensor 2	ΔQ - condensing	m_{diesel}*Le	6,2	na	232,4	na	na	1.44
Kondensasi pada kondensor 3	ΔQ - condensing	$m_{gasoline}$*Le	1754,3	na	348,6	na	na	611.476
Penurunan suhu pada kondensor 1	ΔQ - Temperature Raise	m_0*Cp*(To-Ti)	1977,7	2,19	na	430	360	302.495
Penurunan suhu pada kondensor 2	ΔQ - temp decrease	m_1*Cp*(To-Ti)	1932,2	2,18	na	360	216	605.773
Penurunan suhu pada kondensor 3	ΔQ - Temperature Raise	m_2*Cp*(To-Ti)	1926,0	2,18	na	216	36	754.898
Penurunan suhu pada kondensor 4	ΔQ - Temperature Raise	m_{vap}*Cp*(To-Ti)	45,5	2,52	na	360	36	37.131
Penurunan suhu pada kondensor 5	ΔQ - Temperature Raise	m_{diesel}*Cp*(To-Ti)	6,2	2,08	na	216	36	2.318
Total Energi yang Keluar								***2.330.754***

Energi yang masuk kedalam sistem adalah: total kalor yang keluar sistem - total kalor yang diproduksi sistem.

$$\Delta Q_{in} = \Delta Q_{out} - \Delta Q_{produced}$$
$$\Delta Q_{in} = 2.330.754 - (-12.577.370)$$
$$= 14.908.124 \text{ kJ/jam.}$$

Energi kalor tersebut diperoleh dari proses pembakaran RDF dan gas hasil pirolisa, dengan tingkat penyerapan diasumsikan sebesar 65%.

$$\Delta Q_{in-gross} = \frac{14.908.124 \text{ kJ/jam}}{65\%}$$
$$= 22.935.575 \text{ kJ/Jam}$$

Panas pembakaran dari gas pirolisa adalah sebagai berikut:

$$\Delta Q_{gas\ pirolysis-combustion} = m_{gas} * HHV_{gas}$$
$$= 172 \frac{kg}{jam} x \frac{50.102 kJ}{jam} = 8.605.926 \text{ kJ/jam}$$

Dari kalor hasil pembakaran gas pirolisa tersebut, selanjutnya dapat dihitung kalor yang dibutuhkan dari pembakaran RDF, yaitu sbb:

$$\Delta Q_{RDF-comb} = \Delta Q_{in-gross} - \Delta Q_{gas\ piroly-comb}$$
$$= 22.935.575 \text{ kJ/jam} - 8.605.926\ kJ/jam$$
$$= 14.329.649 \text{ kJ/jam}$$

Berdasarkan nilai $\Delta Q_{RDF-combus}$ tersebut, diperoleh laju masa RDF sebagai berikut:

$$m_{rdf} = \frac{\Delta Q_{RDF-comb}}{HHV_{RDF}}$$
$$= \frac{14.329.649\ kJ/jam}{18.619\ kJ/kg} = 769,6 \text{ kg/jam}$$

4.7 Neraca Energi Total Sistem Pengolahan Sampah Terpadu

Neraca energi total sistem PST Penujah dihitung berdasarkan energi yang masuk kedalam sistem PST Penujah, dan yang keluar dari sistem tersebut baik dalam bentuk energi potensial kalor yang terkandung dari produk-produk bahan bakar maupun energi panas buang yang dibawa oleh gas buang maupun yang dikeluarkan oleh sistem pendinginan pada unit pirolisa.

Energi yang masuk kedalam sistem PST Penujah merupakan energi yang dikonsumsi untuk menggerakkan semua proses yang ada di sistem penujah, yaitu terdiri dari energi listrik untuk menjalankan mesin-mesin pemrosesan sampah dan *balance of plant* nya, dan energi dari bahan bakar solar untuk menggerakkan truk-truk penganggut sampah.

Energi yang keluar dari sistem PST Penujah merupakan energi panas buang, dan energi potensial kalor yang terkandung dari produk-produk bahan bakar hasil pemrosesan PST Penujah tsb seperti: produk bensin, produk solar, dan produk RDF sisa yang tidak terpakai untuk proses pirolisa.

Adapun masing-masing energi yang masuk dan keluar sistem adalah sebagaimana yang disajikan didalamm tabel neraca energi dibawah ini:

Tabel 9 Neraca Energi Sistem Penujah

Energi Keluar	Energi Potensial	
	kJ/jam	kW
Energi yang di Konsumsi PST		***1494***
Energi listrik	na	***1071***
Kebutuhan mesin-mesin	na	1384
Suplai dari mesin gas	na	-312,60
Energi Potensial - Solar Truk	1.523.200	***423***
Energi - Produk PST		***26.9***
Energi potensial bensin	82.591.269	22.942
Energi potensial solar	277.615	77
Energi potensial RDF	3.611.654	1,003
Energi panas gas buang furnace	8.027.451	2.23
Energi panas buang kondensor 1	317.717	88
Energi panas buang kondensor 2	607.213	169
Energi panas buang kondensor 3	1.366.374	380
Energi panas buang kondensor 4	37.131	10
Energi panas buang kondensor 5	2.318	1
Energi Netto		***25.406***

Perhitungan energi panas gas buang furnace adalah berdasarkan asumsi bahwa panas yang bisa diserap oleh reactor dari pembakaran RDF dan gas hasil pirolisa tersebut adalah hanya 65%, mempertimbangkan adanya proses perpindahan panas dari hasil pembakaran tersebut kepada gas buang dan udara dari blower yang mensuplai oksigen ke proses pembakaran tersebut.

Dari tabel diatas dapat kita lihat bahwa PST Penujah memberikan energi surpluss sebesar 25,4 mW dari produk bahan bakar yang dihasilkannya besera energi potensi kalor dari panas buang nya.

4.8 Nilai Ekonomi Produk yang Dihasilkan

Neraca Masa Secara Menyeluruh

Berdasarkan hasil perhitungan nerana masa dan neraca energi diatas, maka diperoleh neraca masa dari Pengelolaan Sampah Terpadu (PST) Penujah adalah sebagai berikut:

Tabel 10. Tabel neraca masa

Material	MSW Process		Furnace		Pirolisa		Biodigester		Exit PST
	Enter	Exit	Enter	Exit	Enter	Exit	Enter	Exit	
	kg/jam								
Sampah	5.729,2								0,0
Bahan baku RDF		1.752,0							
RDF			769,6	0,0					194,0
Gelas		272,1							272,1
Logam		42,4							42,4
Organik		966,5					966,5		0,0
Lain-lain		82,5							82,5
LDPE		522,7			522,7	0,0			0,0
HDPE		522,7			522,7	0,0			0,0
PET		548,9			0,0	0,0			548,9
PP		836,4			836,4	0,0			0,0
PS		183,0			183,0	0,0			0,0
Gasoline						1.754,3			1.754,3
Diesel						6,2			6,2
Gas						171,8			171,8
Solid						87,1			87,1
Wax						45,5			45,5
Pupuk/Digestate								910,1	910,1
Methane								56,4	0,0
Conblock									104,3
TOTAL	**5.729,2**	**5.729,2**			**2.064,8**	**2.064,8**	**966,5**	**966,5**	**4.219,0**

V. KESIMPULAN dan SARAN

5.1 Kesimpulan

PST Penujah ini adalah layak secara teknis, dengan mempertimbangkan:i) konsep zero waste untuk pengelolaan sampah pada PST Penujah dapat dicapai.ii) teknologi pengelolaan sampah dari proses penyortiran, pencacahan, hingga teknologi transformasi kimia (pirolisa), transformasi biologi (pencernaan biologis) telah matang, telah digunakan cukup luas pada proses pengolahan sampah perkotaan di luar negeri, dan tersedia di pasaran.

Dengan asumsi bahwa: material masuk ke tempat pengolahan sampah: 5729,17 kg/jam, komposisi sampah plastic adalah: 20% LDPE, 20% HDPE, 21% PET, 32% PP, 7% PS;katalis yang digunakan dalam proses pirolisa adalah FCC 10%, suhu reaktor: 430^{o}C - 450 ^{o}C, distribusi nomor karbon pirolisa plastik lainnya (LDPE, PP, dan PS) mengikuti distribusi nomor karbon pirolisa HDPE,maka disimpulkan bahwa:iii) produk yang terbanyak dihasilkan oleh PST Penujah adalah: bensin (2370 liter/jam), pupuk (910 kg/jam), dan PET cacah (549 kg/jam).iv) PST Penujah menghasilkan energi netto yang positif sebesar 25 mW.iii) bahan bakar RDF yang dibutuhkan unit pirolisa adalah 697 kg/jam.

5.2 Saran

Disarankan kepada pihak yang berkepentingan untuk mewujudkan pembangunan PST Penujah, yang berguna untuk mengatasi masalah persampahan yang menumpuk di kabupaten Tegal pada umumnya dan TPA Penujah khususnya, dan juga dapat mendatangkan keuntungan yang menjanjikan bagi para investor dan *stake holder*.Disarankan juga agar PST Penujah menerapkan proses pemilahan sampah secara otomatis, mempertimbangkan penerapan penyortiran secara otomatis dapat meningkatkan efisiensi produksi dan konsistensi dalam hasil pemilahan sampah dibanding tenaga manusia, dan memberikan profitabilitas yang lebih baik dibanding opsi manual.Disarankan juga untuk dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaatan energi kalor dari gas buang pembakaran pada tungku, dan energi kalor yang dihasilkan oleh kondensor.

DAFTAR PUSTAKA

[1] T. L. Richard, “Municipal solid waste composting: Physical and biological processing,” Biomass and Bioenergy, vol. 3, no.3-4, p. 163-180, 1992

[2] S.P. Gundupalli, S. Hait, A. Thakur, "A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling," Waste Management, 2016.

[3] E. H. Richard, “The basics of magnetic separation as applied municipal solid waste reclamation plants,” Conservation & Recycling, vol. 3, no 2, p. 187-197, 1979.

[4] S.D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W.M.A. Wan Daud, M.K. Aroua,“ A review on pyrolysis of plastic wastes,”*Energy Convers Manage*, vol. 115,p. 308-26, 2016.

[5] Gregor D. Zupančič and Viktor Grilc, Dr. Sunil Kumar, “Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste, Management of Organic Waste. Intech. ISBN: 978-953-307-925-7, 2012.

[6] Sri Wuryanti, Neraca Massa dan Energi, 2016.

[7] Yunus A Cengel, Michael A. Boles, *Thermodynamics an Engineering Approach*, 6th Editionn, McGraw – Hill, 2007.

[8] Ross Westerfield Jaffe, *Corporate Finance*,10thEdition, MCGraw – Hill, 2013.

[9] D. R. Kirklin. E. S. Domalski. R. V. Kelly.

and C. R. Robbins, "Ash Content and X-Ray Analysis of Selected RDF and Coal Samples asa Function of Temperature,"*Resources and Conseruation*, vol.9, p. 243-257, 1982.

[10] R. Kigozi, A. Aboyade and E. Muzenda, "Biogas Production Using the Organic Fraction of Municipal Solid Waste as Feedstock,"*Int'l Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engg (IJRCMCE)*, vol. 1, issue 1(2014) ISSN 2349-1442 EISSN 2349-1450, 2008.

[11] Charles J. Banks. Michael Chesshire. Sonia Heaven. Rebecca Arnold, "Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance,"*Bioresource Technology*, vol.102, p. 612–620, 2011.

[12] Nilgun Kiran Ciliza,Ekrem Ekincib, Colin E.Snapec,"Pyrolysis of virgin and waste polypropylene and its mixtures with waste polyethylene and polystyrene,"*Waste Management*,vol. 24, p. 173–181, 2004.