

## Rancang Bangun Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik Polypropylene (PP) dengan Menggunakan Metode VDI 2221

Dominggus G. H. Adoe<sup>1\*</sup>, Defmit B.N Riwu<sup>2)</sup>, Fuaddin B. Husein<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana  
Jl. Adi Sucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001

\*Corresponding author: fuadhusein099@gmail.com

### ABSTRAK

Manfaat dari penelitian ini, untuk menghasilkan produk bahan bakar minyak dari limbah sampah plastik *Polypropylene* (PP) sebagai sumber energi alternatif dengan memanfaatkan teknologi pirolisis serta meningkatkan nilai ekonomis dari limbah sampah plastik yang sudah tidak terpakai dan sebagai referensi untuk mengatasi pencemaran lingkungan yang diakibatkan sampah plastik di masyarakat. Hasil akhir dari penelitian ini berupa gambar detail alat, rancang bangun alat, dan hasil dari proses pengujian pada alat tersebut berupa data kuantitas minyak pada setiap pengujian yang dilakukan. Dengan metode perancangan VDI 2221, dapat dibuat suatu alat pirolisis reaktor tabung bertingkat untuk daur ulang sampah plastik *polypropylene* (PP) dengan teknik pemilihan varian terbaik. Penerapan metode tersebut pada penelitian ini berhasil dibuktikan dengan pemilihan konsep 4 sebagai konsep terbaik dan konsep tersebut dapat dibuat secara nyata. Selanjutnya alat tersebut setelah dilakukan pengujian terbukti dapat digunakan untuk menghasilkan produk, dibuktikan dengan hasil pengujian produk berupa minyak, residu dan gas.

### ABSTRACT

*The benefits of this research are to produce fuel oil products from Polypropylene (PP) plastic waste as an alternative energy source by utilizing pyrolysis technology and increasing the economic value of unused plastic waste and as a reference for overcoming environmental pollution caused by plastic waste. The final result of this research is a detailed drawing of the tool, the design of the tool, and the results of the testing process on the tool in the form of data on the quantity of oil in each test carried out. With the VDI 2221 design method, a multilevel tube reactor pyrolysis device can be made for recycling polypropylene (PP) plastic waste with the best variant selection technique. The application of the method in this study was successfully proven by choosing concept 4 as the best concept and the concept could be made in real terms. Furthermore, the tool after testing is proven to be able to be used to produce products, as evidenced by the results of product testing in the form of oil, residue and gases.*

**Keywords:** *pyrolysis, polypropylene plastics, temperature, alternative energy, oil, and recycling*

### PENDAHULUAN

Dewasa ini plastik sudah menjadi kebutuhan yang sulit terpisahkan dalam kehidupan sehari-hari manusia. Plastik banyak dipakai karena mempunyai keunggulan-keunggulan seperti kuat, ringan dan stabil. Seiring dengan berjalannya waktu, tingkat konsumsi masyarakat terhadap plastik semakin bertambah sehingga limbah sampah plastik yang dihasilkan juga ikut bertambah. Indonesia merupakan penyumbang sampah plastik terbesar kedua di dunia. Sampah plastik di Indonesia mencapai 64 juta ton per tahun, dimana sebanyak 3,2 juta ton merupakan

sampah plastik yang dibuang ke laut. [1]

Berdasarkan data dari *University of Georgia*, Indonesia berada di peringkat kedua dunia penghasil sampah plastik ke laut yang mencapai sebesar 187,2 juta ton setelah Cina yang mencapai 262,9 juta ton. Data riset itu menyebut, Amerika Serikat pemakaian plastik rata-rata 38 juta kilogram perhari. Negara ini berhasil dalam manajemen sampah plastik hingga angka *mismanaged plastic waste* tak ada. Berbeda dengan Tiongkok dan Indonesia, sebagai ‘juara’ satu dan dua, meski penggunaan plastik di Tiongkok 32 juta kilogram perhari, namun sampah plastik yang tak bisa dikelola sampai 24 juta kg perhari.

Begitu juga Indonesia, meski penggunaan hanya 11 juta kilogram perhari namun sampah tak terkelola mencapai 9 juta kilogram perhari [2].

Kini limbah sampah plastik menjadi permasalahan lingkungan yang serius karena limbah sampah plastik menimbulkan bahaya bagi makhluk hidup lainnya dan pencemaran di lingkungan karena plastik merupakan bahan polimer sintetik (*anorganik*) yang terbuat dari minyak bumi sehingga sulit terurai di alam. Limbah sampah plastik secara alami membutuhkan waktu kurang lebih 100 tahun agar plastik dapat terurai dengan sempurna.

Perkembangan kemajuan teknologi yang pesat seperti saat ini menuntut orang untuk berperan aktif, berinovasi guna menghasilkan suatu produk yang berkualitas. Oleh karenanya, banyak pihak berlomba-lomba untuk menciptakan atau mengembangkan teknologi dari alat-alat yang memiliki manfaat namun lebih ekonomis salah satunya adalah alat daur ulang sampah plastik. Potensi pemanfaatannya sebagai salah satu sumber energi memiliki prospek bagus di masa mendatang.

Ada dua keuntungan dari proses daur ulang sampah plastik. Pertama mengurangi jumlah sampah plastik, yang kedua menghasilkan energi yang bisa digunakan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil.

Salah satu cara untuk menangani masalah limbah sampah plastik adalah Pirolisis. Pirolisis adalah suatu proses penguraian material organik secara *thermal* pada temperatur tinggi tanpa adanya oksigen (Bhattacharya P et al. 2009). Pirolisis berasal dari bahasa Yunani "*pyr*" artinya api dan "*lysis*" artinya memisahkan. Produk yang dihasilkan melalui proses pirolisis adalah padatan, minyak, dan gas. Padatan mempunyai struktur seperti grafit. Padatan tersusun atas karbon murni pada temperatur tinggi. Struktur ini bisa juga ditemukan pada membran *fuel cell*. Gas yang dihasilkan berupa CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub> dan Alkana. [3].

Permasalahan pada penelitian ini bagaimana membuat reaktor pirolisis dengan destilasi bertingkat, menghitung dimensi komponen pirolisis dari limbah sampah plastik jenis *Polypropylene* (PP), bagaimana waktu yang dibutuhkan dalam 1 kali proses pirolisis, dan kuantitas minyak yang dihasilkan dengan variasi bobot plastik, temperatur dan waktu. Berkaitan dengan masalah tersebut, melalui tugas akhir ini penulis ingin melakukan upaya guna mempelajari cara merancang dan membuat alat konversi energi sampah plastik jenis *Polypropylene* (PP) menjadi bahan bakar minyak melalui proses pirolisis dengan menggunakan metode VDI 2221.

Penelitian awal tentang dekomposisi pada pirolisis cepat diteliti oleh Peters et al (1985). Efek dari laju pemanasan, temperatur dan waktu tinggal padatan juga diteliti. Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa 95% selulosa terdekomposisi pada temperatur antara 500°C dan 750°C laju pemanasannya adalah 1000°C/s. Setelah 750°C, hasil dari arang menurun. Juga diketahui bahwa hasil dari tar yang terjadi sebesar 83% pada suhu 400°C dan menurun menjadi 49% pada suhu 1000°C. Ini dikarenakan adanya reaksi tar sekunder yang terjadi pada temperatur yang lebih tinggi. Diatas suhu 750°C hasil dari arang menurun dari 6% menjadi 3%. Ketika terjadi kenaikan temperatur diatas 900°C hasil dari arang kembali naik menjadi 4%. yang mengindikasikan pada temperatur diatas 900°C reaksi repolimerisasi terjadi dan menghasilkan kenaikan pada arang. [4]

Aprian Ramadhan P. dan Munawar Ali, 2014 meneliti dan mendapatkan hasil dekomposisi dengan efisiensi yang terbaik dalam menguraikan sampah plastik terjadi pada suhu 420°C dengan waktu operasi 60 menit sedangkan Hasil produk minyak terbanyak pada plastik LDPE dan HDPE terjadi pada suhu 400°C dengan waktu operasi 60 menit Kinematika pada plastik HDPE mempunyai nilai  $k = 0,12468 \exp(95842/RT)$  sedangkan Kinematika pada plastik LDPE mempunyai nilai  $k = 0,02004 \exp(-7660/RT)$ . [5]

Endang K, Mukhtar G, Abed Nego, F X Angga Sugiyana, 2016 meneliti dan menunjukkan bahwa minyak pirolisis terbanyak dari sampah plastik PP diperoleh dari proses pirolisis suhu 400°C sedangkan sampah plastik LDPE diperoleh dari proses pirolisis suhu 300°C. Nilai densitas minyak hasil pirolisis plastik jenis PP dan LDPE mendekati nilai densitas dari minyak tanah dan solar. Nilai viskositas minyak hasil pirolisis PP dan LDPE mendekati nilai viskositas bensin. Nilai kalor minyak pirolisis hasil pirolisis PP mendekati nilai kalor solar sedangkan nilai kalor hasil pirolisis LDPE mendekati nilai kalor solar. Nilai kalor pirolisis sampah plastik jenis PP dan LDPE meningkat dengan peningkatan suhu dinding reaktor. [6]

Produk pirolisis yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi ada tiga fase, yaitu cair (minyak), gas dan padat (*char*). Produk hasil pirolisis yang berfase cair memiliki kelembaban tinggi yang berasal dari kelembaban asli dan air yang dihasilkan (14-18%) [7]. Dalam pekerjaan bengkel alat dan mesin, benda kerja yang akan dijadikan dalam bentuk tertentu sehingga menjadi barang siap pakai, maka dilakukan proses pengerjaan dengan mesin-mesin perkakas, antara lain mesin bor, mesin gerinda, dan mesin yang lainnya [8].

Kekuatan, keawetan, dan pelayanan yang diberikan peralatan peralatan daur ulang sampah plastik bergantung terutama pada macam dan kualitas bahan yang digunakan untuk pembuatannya. Dalam pembuatannya terdapat kecenderungan konstruksi peralatan untuk meniadakan sebanyak mungkin baja tuangan dan mengganti dengan baja tekan atau baja cetak. Bilamana hal ini dilakukan dapat menekan membuat mesin dalam jumlah besar. Keberhasilan atau kegagalan alat sering sekali tergantung pada bahan yang dipakai untuk pembuatannya. Bahan yang digunakan untuk pembuatan peralatan daur ulang sampah plastik dapat diklasifikasikan dalam logam dan non logam [9].

## METODE PENELITIAN

### Metode Perancangan VDI 2221

Perkembangan teknologi dewasa ini berjalan dengan pesat terutama dalam rekayasa dan rancang bangun. Proses mendesain alat adalah salah satu cabang dari rekayasa dan rancang bangun yang banyak bermanfaat dalam menyelesaikan berbagai kebutuhan akan alat yang memenuhi kriteria dan keinginan konsumen.

Mendesain berarti menjabarkan ide yang dimiliki untuk menyelesaikan suatu masalah. Dengan diperolehnya ide diperlukan suatu metode yang dapat dipergunakan untuk mewujudkan ide tersebut hingga menghasilkan sebuah karya yang riil dan dapat dipertanggung jawabkan secara ilmiah.

Hal ini mendorong persatuan insinyur Jerman (Verein Deutscher Ingenieure/ VDI) membuat suatu metode perancangan produk yang dikenal dengan metode VDI 2221. Metode tersebut adalah "Pendekatan sistematis terhadap desain untuk sistem teknik dan produk teknik" (*Systematic Approach to the Design of Technical System and Product*) yang dijabarkan oleh G.pahl dan W Beitz.

### Langkah-Langkah Kerja Dalam VDI 2221

Secara keseluruhan langkah kerja yang terdapat dalam VDI 2221 dikelompokkan menjadi 4 fase yaitu:

#### *Penjabaran Tugas (Clarification of Task)*

Pada langkah kerja penjabaran tugas ini dilakukan perumusan dan daftar persyaratan yang disesuaikan dengan kehendak konsumen dan perancang, yang diharapkan dipenuhi oleh solusi akhir. Informasi ini akan menjadi acuan penyusunan spesifikasi.

Pekerjaan-pekerjaan yang dilakukan meliputi:

- Mengumpulkan informasi / data yang berhubungan dengan perencanaan, memeriksa kendala apa saja yang dihadapi.
- Memeriksa kehendak-kehendak yang lain, yang dapat menunjang pekerjaan.

- Merumuskan tugas yang dihadapi sehingga menjadi sesuai dengan kacamata disainer.

Hasil kerja yang diperoleh ialah daftar kehendak/requirement list. Daftar kehendak merupakan dokumen penting, merupakan dasar dalam melaksanakan langkah kerja lainnya. Penemuan penting dapat timbul dalam proses sebagai akibat modifikasi atau penambahan kehendak.

Pentingnya daftar kehendak menyebabkan penanganannya harus teratur dan sistematis. Daftar kehendak yang sudah ditangani secara teratur dan sistematis dalam suatu format dinamakan spesifikasi.

Untuk mempermudah penyusunan spesifikasi, dapat dilakukan dengan meninjau aspek-aspek tertentu, seperti aspek geometri, kinematika, gaya, energi, dan sebagainya. Dari aspek-aspek tersebut dapat diuraikan syarat-syarat yang bersangkutan, selanjutnya merumuskan tugas yang harus dihadapi. Untuk mempermudah pada tahap pekerjaan yang berikutnya, spesifikasi harus dilakukan secara teratur dan sistematis.

Tabel 1 Daftar Pengecekan untuk Pedoman

Judul Utama	Contoh-contoh
Geometri	Lebar, tinggi, panjang, diameter, jarak
Kinematika	Tipe gerakan, arah gerakan, kecepatan, percepatan
Gaya	Arah gaya, besar gaya, frekuensi, berat, eformasi, kekuatan, elastisitas, gaya inersia
Energi	Ouput, efisiensi, kerugian energi, gesekan tekanan, temperatur, pemanasan, pendinginan, kapasitas
Material	Aliran dan transportasi material, pengaruh fisika dan kimia dari material pada awal dan akhir periodik, material tambahan
Sinyal	Input, output, bentuk, display, peralatan control
Keselamatan	Sistem proteksi langsung, keselamatan operasional dan lingkungan
Ergonomi	Hubungan operator mesin, tipe pengoperasian, penerangan dan keserasian bentuk
Produksi	Batasan pabrik, kemungkinan dimensi maksimum, produksi yang dipilih
Kontrol Kualitas	Kemungkinan dilakukan kalibrasi dan standarisasi
Perawatan	Jangka waktu service, penggantian dan reparasi, pengecatan dan pembersihan
Biaya	Biaya maksimum produksi

Setelah spesifikasi diperoleh dilakukan langkah-langkah abstraksi dan formulasi. Tujuan dari abstraksi adalah untuk

menentukan bagaimana dari spesifikasi yang merupakan bagian penting dan berlaku umum. Pada saat melakukan langkah-langkah abstraksi dan formulasi, hal penting yang harus diperhatikan adalah membedakan sebuah persyaratan, apakah sebagai suatu tuntutan (*Demand*) atau keinginan (*Wishes*).

*Demand* (keharusan) adalah persyaratan yang harus dipenuhi pada setiap kondisi, atau dengan kata lain apabila persyaratan itu tidak terpenuhi maka perancangan dianggap tidak benar/gagal. *Wishes* (keinginan) adalah persyaratan yang diinginkan apabila memungkinkan. Sebagai contoh suatu persyaratan membutuhkan biaya yang tinggi tanpa memberi pengaruh teknik yang besar, maka persyaratan tersebut dapat dihilangkan/diabaikan. Abstraksi dan formulasi akan mempermudah menentukan fungsi dan struktur fungsi.

#### Penentuan Konsep Rancangan (*Conceptual Design*)

Dalam penentuan konsep desain dalam perancangan ada beberapa hal yang dibahas yaitu sebagai berikut:

- Menentukan fungsi dan strukturnya
 

Dalam menentukan fungsi dan strukturnya hal-hal yang dibahas meliputi struktur fungsi keseluruhan dan sub fungsi.

  - Struktur Fungsi Keseluruhan
 

Setelah masalah utama diketahui, kemudian dibuat struktur fungsi secara keseluruhan. Struktur fungsi ini digambarkan dengan blok diagram yang menunjukkan hubungan input dan output berupa aliran energi, material atau sinyal.
  - Sub Fungsi
 

Apabila fungsi keseluruhan cukup rumit, maka cara mengantisipasinya adalah membagi menjadi beberapa fungsi. Pembagian ini akan memberikan keuntungan:

    - Memberikan kemungkinan untuk melakukan pencarian solusi lebih lanjut.
    - Memberikan beberapa buah kemungkinan solusi dengan melihat kombinasi solusi sub fungsi.
    - Mencari Prinsip Solusi dan Strukturnya

Dasar-dasar pemecahan diperoleh dengan mencari prinsip-prinsip solusi dari masing-masing subfungsi. Dalam tahap ini dicari sebanyak mungkin variasi solusi. Metode pencarian prinsip pemecahan masalah menurut Pahl-Beitz dibagi kedalam tiga kategori, yaitu:

- Metode Konvensional

Metode ini meliputi pencarian dalam literatur, text book, jurnal-jurnal teknik dan brosur yang dikeluarkan oleh suatu perusahaan. Menganalisa gejala alam atau tingkah laku makhluk hidup dengan membuat analogi atau dibuat suatu model unik dapat mewakili karakteristik dari produk.

- Metode Intuitif

Solusi dengan intuisi ini datang setelah periode pencarian dan pemikiran panjang, solusi ini kemudian dikembangkan dan diperbaiki. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengembangkan kemampuan intuitif ini antara lain dengan banyak melakukan diskusi dengan orang lain.

- Metode kombinasi

Metode ini mengkombinasikan kemungkinan solusi yang ada. Metode yang digunakan adalah metode bentuk matriks, dimana sub fungsi dan prinsip solusi dimasukkan dalam kolom dan baris.

- Mengurai menjadi varian yang dapat direalisasikan

Apabila kombinasi yang ada terlalu banyak, maka untuk memilih kombinasi terbaik menjadi lama. Agar tidak terjadi hal tersebut maka apabila memungkinkan jumlah kombinasi harus dikurangi. Prosedur yang dilakukan adalah dengan mengeleminasi dan memilih yang terbaik. Dibawah ini ada beberapa kriteria yang perlu diperhatikan diantaranya:

- Kesesuaian dengan fungsi keseluruhan.
- Terpenuhinya demand yang tercantum dalam daftar spesifikasi.
- Dapat dibuat atau diwujudkan.
- Pengetahuan atau informasi tentang konsep yang bersangkutan memadai.
- Kebaikan dalam kinerja dan kemudahan produksi.
- Kemudahan dirakit.
- Kemudahan perawatan.

- Faktor biaya.
- Segi keamanan dan kenyamanan.
- Kemungkinan pengembangan lebih lanjut.

- Pembuatan Varian Konsep

Informasi lebih lanjut sangat diperlukan untuk pembuatan varian konsep yang akan dilakukan. Informasi Ini dapat diperoleh dari:

- Gambar atau sketsa untuk melihat kemungkinan keserasian
- Perhitungan kasar berdasarkan asumsi yang dipakai
- Pengujian awal berupa pengujian model untuk menemukan sifat utama atau pendekatan kuantitatif untuk persyaratan kualitatif mengenai kinerja dari suatu produk jadi.
- Konstruksi model untuk visualisasi dan analisis.
- Analogi model dan simulasi yang sering dilakukan dengan bantuan komputer.
- Penelitian lebih lanjut dari literatur
- Evaluasi

Evaluasi berarti menentukan nilai, kegunaan atau kekuatan yang kemudian dibandingkan dengan sesuatu yang dianggap ideal. Secara garis besar, langkah yang ditempuh adalah sebagai berikut:

- Menentukan kriteria evaluasi yang didasarkan pada spesifikasi yang dibuat.
- Pemberian bobot kriteria. Langkah ini merupakan kriteria yang dipilih yang mempunyai tingkat varian konsep. Sebaiknya evaluasi dititik beratkan pada sifat utama yang diinginkan pada solusi akhir.
- Menentukan parameter kriteria evaluasi. Agar perbandingan sifat varian konsep dapat dilihat dengan jelas, maka dipilih sesuatu parameter atau besaran yang dipakai oleh varian konsep.
- Memperkirakan ketidak pastian evaluasi. Kesalahan evaluasi bisa disebabkan oleh beberapa hal diantaranya:
  - Kesalahan subjektif. Seperti kurangnya informasi.
  - Kesalahan perhitungan parameter.

### Perancangan Wujud (*Embodiment Design*).

Perancangan Wujud dimulai dengan konsep produk teknik, kemudian dengan menggunakan kriteria teknik dan ekonomi, perancangan dikembangkan dengan menguraikan struktur fungsi kedalam struktur modul untuk memperoleh elemen-elemen pembangun struktur fungsi yang memungkinkan dapat dimulai perancangan yang lebih rinci.

Tahap perancangan wujud ini meliputi beberapa langkah perancangan, yaitu menguraikan menjadi modul-modul, memberi bentuk pada modul, memberi bentuk pada seluruh modul.

Pada langkah kerja ini dilakukan dengan mengembangkan rancangan atau layout dari modul-modul, ukuran-ukuran geometri dan perincian- perincian lainnya mula-mula dicantumkan pada modul-modul utama, terbatas hanya untuk memperoleh modul yang terbaik.

### Perancangan Rinci (*Detail Design*)

Tahap ini merupakan akhir metode perancangan sistematis yang berupa presentasi hasil. Pada langkah ini, dilakukan pekerjaan-pekerjaan merinci gambar akhir, termasuk gambar terperinci mengenai tiap-tiap bagian/ elemen dari produk. Merinci setiap data dan data-data lain yang berhubungan dengan persiapan produksi/ pembuatan.

Pada akhir tahap ini dievaluasi kembali untuk melihat apakah produk mesin atau sistem teknik tersebut benar-benar sudah memenuhi spesifikasi dan semua gambar-gambar dokumen produk lainnya telah selesai dan lengkap

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari penelitian ini, terdapat dua hal pokok yang didapat yaitu hasil perancangan menggunakan metode perancangan VDI 2221 dan hasil pengujian alat pirolisis reaktor tabung bertingkat untuk daur ulang sampah plastik *Polypropylene* (PP).

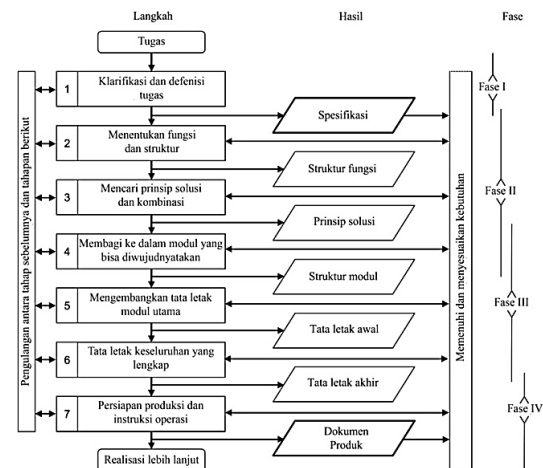
### Proses dan Hasil Perancangan Menggunakan Metode VDI 2221

Dalam penelitian ini, hasil perancangan tidak akan diperoleh tanpa melewati tahap-tahap atau proses perancangan sehingga perlu dijelaskan proses perancangan tersebut.

- Proses Perancangan Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik *Polypropylene* (PP) Menggunakan Metode VDI 2221

Sebelum alat diproduksi, ada proses merancang yang dilakukan. Dalam penelitian ini, metode perancangan yang digunakan adalah metode VDI 2221 dimana peneliti membuat beberapa varian konsep namun pada akhirnya hanya satu varian alat yang dipilih dan diproduksi. Secara umum alur perancangan metode ini dapat dilihat pada gambar 1.

Langkah-langkah untuk mendapatkan pilihan konsep yang akan diproduksi tersebut akan dijabarkan dibawah ini.



Gambar 1 Prosedur Perancangan VDI 2221 [10]

- Penentuan Spesifikasi Awal Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik *Polypropylene* (PP)

Sebagai acuan awal dalam perancangan alat pirolisis reaktor tabung bertingkat untuk daur ulang sampah plastik *Polypropylene* (PP) ini, ditetapkan spesifikasi awal dengan

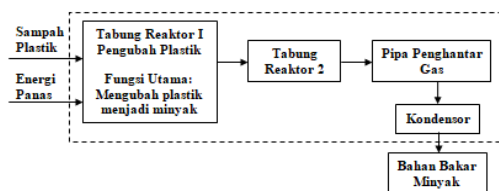
memperhatikan persyaratan apakah keharusan (*demand*) atau keinginan (*wishes*) yang mana faktor keharusan berpatokan prinsip kerja alat yang sudah ada di pasaran dan faktor keinginan tidak terikat dengan standar apapun.

Tabel 1. Daftar Acuan Spesifikasi Awal

Parameter	Spesifikasi	Demand (D) / Wish (W)
Geometri	Dimensi Perancangan	W
	Panjang	W
	Lebar	W
	Tinggi	W
Gaya	Kekakuan yang tinggi	D
	Titik berat yang tepat	D
	Rangka alat mampu menahan bobot tabung reaktor, kondensor, dan bak panampung air.	D
Energi	Energi yang digunakan untuk memanaskan tabung reaktor besar	W
	Energi listrik yang digunakan untuk pompa sirkulasi kondensor kecil	W
Material	Material mampu menahan suhu diatas 500°C	D
	Bentuk rancangan hemat material	W
	Komponen tidak mudah rusak	W
Keamanan	Material mudah didapat dan tahan lama	D
	Tabung reaktor mampu menahan tekanan kerja yang tinggi	D
	Kondensor tidak bocor	D
Ergonomi	Pipa penghantar gas tidak bocor	D
	Bentuk proporsional	W
Perakitan	Bentuk tidak kaku	W
	Mudah untuk di bongkar pasang	W
Biaya	Biaya pembuatan cukup murah	W
	Biaya perawatan murah	W

- Membuat Struktur Fungsi

Dalam perancangan ini telah ditetapkan bahwa akan dirancang alat pirolisis reaktor tabung bertingkat untuk daur ulang sampah plastik *Polypropylene* (PP). Oleh karena itu perlu dibuat struktur fungsi yang menyatakan bagaimana alur kerja dari alat tersebut.



Gambar 2. Sub struktur Fungsi Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik *Polypropylene* (PP).

- Pembuatan Daftar Komponen untuk Pemilihan Alternatif Desain

Salah satu permasalahan dalam desain suatu alat adalah harus menentukan beberapa konsep yang kemudian dipilih salah satu

varian terbaik untuk dibuat secara nyata. Oleh karena itu, untuk memudahkan pemilihan varian desain dibuat tabel pemilihan.

Tabel 2. Pemilihan Konsep Terbaik

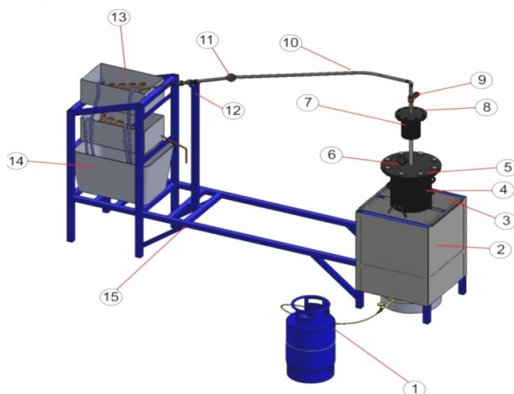
No.	Kriteria	Bobot	Konsep			
			1	2	3	4
1.	Tabung Reaktor Mampu Menahan Tekanan Kerja dan Temperatur yang Tinggi	4	REFERENSI	S	+	+
2.	Kondensor Bisa Berfungsi dengan Optimal	3		+	+	+
3.	Rangkaian Alat Mudah Dibongkar Pasang	3		+	+	+
4.	Konstruksi Rangka Alat Kuat dan Mampu Mengoptimalkan Proses Pemanasan Reaktor	4		S	S	+
5.	Pemilihan Material dan Harga yang Tejangkau	4		S	+	+
Jumlah Bobot (+)			0	2	4	5
Jumlah Bobot (-)			0	0	0	0
Nilai Akhir			0	6	14	18
Lanjutan			Tidak	Tidak	Tidak	Ya

Setelah dilakukan pemilihan desain alat, maka tahapan selanjutnya adalah membuat gambar 3 dimensi alat uji dan pembuatan gambar kerja menggunakan *software Solidworks 2015* sebagai acuan saat proses pengerjaan alat di bengkel. Gambar 3 dimensi alat dibuat berdasarkan hasil studi lapangan. Misalnya, rangka dibuat dari besi *hollow galvanise* 4x4 dengan pertimbangan harga, ketersediaan barang dan kekuatan bahan, sedangkan dimensi panjang, lebar, dan tinggi dari rangka ditentukan oleh perancang sebagai faktor *wishes*. Penjelasan lebih lanjut akan dijabarkan pada pembahasan tentang hasil perancangan menggunakan metode VDI 2221 (sub bab pembahasan).

- Hasil Perancangan Alat Menggunakan Metode VDI 2221

Hasil perancangan alat pada penelitian ini adalah gambar konsep 3 dimensi dari alat yang dipilih dan gambar detail alat berupa dalam bentuk 2 dimensi (gambar kerja). Gambar konsep dan gambar kerja alat tersebut di gambar menggunakan *software Solidworks*. Gambar 3 dimensi dari konsep yang dipilih dapat dilihat pada gambar 3.

Selanjutnya, untuk gambar kerja dari konsep yang telah dipilih tersebut akan dibuat di kertas A3 (gambar kerja alat secara utuh) dan A4 (berisi gambar komponen alat secara detail dan keterangan alat secara rinci). Gambar kerja tersebut akan dilampirkan.



Gambar 3. Gambar Rancangan Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik Polypropylene (PP).

Tabel 3. Spesifikasi Alat Pirolisis (gambar 3)

No.	Spesifikasi	Besar dan Satuan
1.	Panjang Total Rangka	198 cm
2.	Lebar Total Rangka	38 cm
3.	Tinggi Total Rangka	132 cm
4.	Kapasitas LPG	3-20 kg
5.	Tinggi Tabung Reaktor I	71 cm
6.	Diameter Tabung Reaktor I	23.5 cm
7.	Temperatur Tabung Reaktor I	±100°C - 650°C
8.	Kapasitas Maksimum Tabung Reaktor I	4 kg
9.	Tinggi Tabung Reaktor II	16.5 cm
10.	Diameter Tabung Reaktor II	15.2 cm
11.	Panjang Pipa Penghantar Gas	158.57 cm
12.	Kapasitas Bak Air Pendingin Kondensor Bertingkat	19 liter
13.	Kapasitas Bak Penampung Air Pendingin	60 liter
14.	Pompa Celup	220-240V

### Hasil Pengujian Alat

Pengujian alat ini menggunakan jenis plastik polypropylene (PP) berupa aqua gelas yang sudah di potong dengan ukuran 1 cm – 3 cm. Bobot plastik 1000 gram dan 1500 gram dan temperatur operasi pirolisis pada alat yaitu 250°C, 300°C, dan 350°C. Lama waktu pengujian pada alat dilakukan pada setiap temperatur sampai alat tidak lagi mengeluarkan minyak.

Minyak yang di dapat dari proses pirolisis ini setelah diamati berwarna kekuningan hingga oranye mirip dengan bensin dan solar. Minyak ini mudah terbakar dan hasil pembakaran berupa asap hitam pekat dan berbau sangat menyengat jika terhirup. Selain minyak, adapun hasil dari proses pirolisis lainnya adalah residu berupa arang.



Gambar 4. Minyak Hasil Pengujian Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik Polypropylene (PP) dengan Bobot Plastik 1000 gram



Gambar IV.10. Hasil Pengujian Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik Polypropylene (PP) dengan Bobot Plastik 1500 gram

Residu terbentuk dari sisa penguraian atau dekomposisi plastik di dalam reaktor pirolisis, residu dengan kata lain tar adalah sisa plastik yang masih berada di dalam reaktor. Residu yang di dihasilkan dari penelitian ini berupa 3 jenis yaitu cair, tar, dan padat. Residu yang cair mirip dengan oli yang berwarna hitam dan apabila terbakar menghasilkan asap yang berwarna hitam dan padat berupa arang halus yang berwarna hitam.

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik Polypropylene (PP) dengan Bobot Plastik 1000 gram

No.	Waktu (menit)	Suhu (°C)	Jumlah minyak yang Dihasilkan (ml)	Residu yang Dihasilkan
1.	152	250	1000	170 ml (Minyak Hitam)
2.	135	300	1100	20 gram (Arang)
3.	80	350	1200	30 gram (Arang)

Dari data tabel 4 dapat diketahui hasil pembakaran limbah sampah plastik jenis polypropylene (PP) dengan suhu pemanasan 250°C memerlukan waktu proses pirolisis selama 152 menit, menghasilkan minyak 1000



ml, dan residu berupa minyak hitam sebanyak 170 ml. Pada suhu pemanasan 300°C dengan waktu proses 135 menit dapat menghasilkan minyak 1100 ml dan residu berupa arang hitam sebanyak 20 gram. Sedangkan, dengan suhu pemanasan 350°C dengan waktu proses 80 menit dapat menghasilkan minyak 1200 ml dan residu berupa arang hitam sebanyak 30 gram.

Tabel 5. Data Hasil Pengujian Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik *Polypropylene* (PP) dengan Bobot Plastik 1500 gram

No.	Waktu (menit)	Suhu (°C)	Jumlah minyak yang Dihasilkan (ml)	Residu yang Dihasilkan
1.	119	250	1330	477 gram (Tar)
2.	107	300	1350	220 ml (Minyak Hitam)
3.	105	350	1384	31 gram (Arang)

Sedangkan pada data tabel 5 dapat diketahui hasil pembakaran limbah sampah plastik jenis *polypropylene* (PP) dengan suhu pemanasan 250°C memerlukan waktu proses pirolisis selama 119 menit, menghasilkan minyak 1330 ml, dan residu berupa tar hitam sebanyak 477 gram. Pada suhu pemanasan 300°C dengan waktu proses 107 menit dapat menghasilkan minyak sebanyak 1350 ml dan residu berupa minyak hitam sebanyak 220 ml. Sedangkan, dengan suhu pemanasan 350°C dengan waktu proses 105 menit dapat menghasilkan minyak sebanyak 1384 ml dan residu berupa arang hitam sebanyak 30 gram. Tabel 4 dan tabel 5 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur dan bobot plastik yang digunakan maka minyak yang dihasilkan semakin banyak dan residu yang dihasilkan berbeda.

#### Pembahasan Tentang Hasil Perancangan Menggunakan Metode VDI 2221

Hasil akhir dari penggunaan metode perancangan ini adalah mendapatkan hasil varian terbaik dari beberapa konsep yang dibuat. Varian terbaik yang dipilih adalah konsep 4. Penentuan varian terbaik tersebut berdasarkan fungsi keseluruhan dari alat tersebut, proses pembuatan, ketersediaan alat dan bahan, penilaian bobot serta kekurangan

dan kelebihan konsep tersebut dari konsep lainnya.

Dasar pemilihan konsep 4 sebagai konsep terbaik sudah tertera pada saat penjabaran proses pemilihan konsep terbaik dimana dari segi penilaian bobot, konsep 4 lebih unggul dari konsep lainnya. Hal ini dapat dilihat pada tabel 2 tentang pemilihan konsep terbaik dimana konsep 4 memiliki nilai bobot tertinggi yaitu 18. Secara prinsip kerja, semua konsep menerapkan metode pirolisis. Dari segi material dan konstruksi konsep 1, konsep 2, dan konsep 3 lebih unggul karena untuk membuatnya tidak diperlukan material yang banyak namun konsep 4 memiliki keunggulan yang diinginkan oleh perancang untuk pengoptimalan proses pemanasan reaktor karena pada bagian rangka terdapat tungku.

Selain itu dari segi kelebihan alat, konsep 4 memiliki kelebihan yang lebih banyak dari konsep yang lain dibuktikan pada tabel 2 yang menunjukkan kelebihan dan kekurangan alat. Tabel tersebut menjelaskan bahwa konsep 1, 2, dan 3 memiliki kelemahan dibandingkan konsep 4 sehingga konsep tersebut dipilih sebagai konsep terbaik.

#### Pembahasan Tentang Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik *Polypropylene* (PP)

Alat pirolisis ini terdiri dari tabung reaktor 1 dan tabung reaktor 2 yang terhubung dengan tungku dan dilengkapi dengan kondensor bertingkat. Tabung reaktor 1 dan tabung reaktor 2 dihubungkan oleh flanges, sehingga dapat dilepas untuk membersihkan dan mengambil residu yang terdapat di dalam tabung reaktor 1 dan tabung reaktor 2.

Pengukuran alat pirolisis ini masih menggunakan *infrared thermometer*. Terkadang, terutama di sekitar suhu lingkungan, pembacaan dapat mengalami kesalahan karena pantulan radiasi dari benda yang lebih panas bahkan orang yang memegang instrumen dari pada dipancarkan oleh objek yang diukur, dan emisivitas yang diasumsikan salah.

Pendingin pada proses pirolisis sampah plastik ini menggunakan kondensor yang berupa bak berbahan pelat aluminium dan

dilengkapi pipa tembaga berbentuk U. Media pendingin pada kondensor ini adalah air dan es batu. Kekurangan pada kondensor ini adalah belum adanya penutup sehingga temperatur air pendingin tidak bertahan lama.

Alat pirolisis ini sudah bisa menghasilkan bahan bakar cair dari sampah plastik. Pengujian alat pirolisis ini menggunakan bahan baku sampah plastik jenis *polypropylene* (PP) dengan masing-masing 1000 gram dan 1500 gram. Bahan bakar yang digunakan adalah kompor bertekanan tinggi berbahan bakar gas LPG berkapasitas 20 kg. Alasan menggunakan bahan bakar gas LPG berkapasitas 20 kg adalah panas yang dihasilkan oleh kompor lebih stabil, bertahan lama, dan mudah dikontrol. Alat ini dalam pengoperasiannya bisa mencapai suhu maksimal diatas pengujian yang dilakukan 400°C keatas dikarenakan tabung reaktor 1 yang tebal sehingga aman apabila dioperasikan pada temperatur dan tekanan kerja yang tinggi. Namun disisi lain, tabung reaktor yang tebal ini juga menjadi kekurangan pada alat ini karena menggunakan bahan pipa baja hitam 8 dim membuat tabung reaktor ini menjadi berat sehingga memerlukan tenaga 2 orang untuk diangkat pasang ke tungku.

Selain itu, alat ini bisa dioperasikan diruangan terbuka dan tertutup dan cukup aman di lingkungan karena asap yang dihasilkan sudah maksimal dikonversikan menjadi bahan bakar cair. Jika terjadi terjadi kebocoran pada pipa penghantar gas dapat diminimalisir dengan menggunakan isolasi pipa, lem besi, dan lakban aluminium yang harganya terjangkau. Untuk memperpanjang umur pemakaian alat pirolisis ini, maka dilakukan perawatan. Dengan adanya perawatan diharapkan alat pirolisis dapat selalu dalam kondisi siap pakai dan bekerja dengan baik. Pemeliharaan alat pirolisis ini mencakup seluruh rangkaian dan komponen-komponennya:

#### 1. Tabung Reaktor

Hal yang perlu diperhatikan adalah:

- Periksa flanges tabung reaktor 1 dan tabung reaktor 2 untuk menghindari adanya kebocoran
- Bersihkan tabung reaktor 1 dan tabung reaktor 2 dari residu yang menempel atau yang tertinggal didalam

#### 2. Pipa Penghantar Gas

Hal yang perlu diperhatikan adalah:

- Membersihkan kerak-kerak yang menempel didalam pipa, minimal setelah 5 kali pemakaian alat agar kedepannya tidak terjadi penyumbatan.
- Memasang isolasi pipa pada bagian sambungan pipa ketika putaran pada bagian sambungan mulai terasa kendor. Hati-hati ketika menyambung pipa penghantar gas dengan kondensor bertingkat karena tersambung dengan sambungan pipa tembaga kondensor bertingkat.

#### 3. Kondensor Bertingkat

Hal yang perlu diperhatikan adalah:

Periksa kondisi pipa tembaga secara berkala untuk menghindari kebocoran ketika pengoperasian alat. Setelah pengujian alat bagian dalam pipa tembaga kondensor bisa dibersihkan dengan menggunakan kompresor agar sisa cairan minyak yang masih terjebak didalam pipa tembaga bisa dikeluarkan.

Selain itu, produk bahan bakar cair pirolisis yang dihasilkan oleh alat ini memiliki prospek kedepan yang cukup baik dimana minyak yang dihasilkan setelah diamati memiliki tingkat kejernihan yang cukup jernih, dan berwarna kekuningan mirip bensin hingga oranye mirip dengan solar.

### KESIMPULAN

Hasil akhir dari penelitian ini berupa gambar detail alat, rancang bangun alat, dan hasil dari proses pengujian pada alat tersebut berupa data kuantitas minyak pada setiap pengujian yang dilakukan. Dengan metode perancangan VDI 2221, dapat dibuat suatu alat pirolisis reaktor tabung bertingkat untuk daur

ulang sampah plastik polypropylene (PP) dengan teknik pemilihan varian terbaik. Penerapan metode tersebut pada penelitian ini berhasil dibuktikan dengan pemilihan konsep 4 sebagai konsep terbaik dan konsep tersebut dapat dibuati secara nyata. Selanjutnya alat tersebut setelah dilakukan pengujian terbukti dapat digunakan untuk menghasilkan produk, dibuktikan dengan hasil pengujian produk berupa minyak, residu, dan gas.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. <https://megapolitan.kompas.com/read/2018/08/19/21151811/indonesia-penyumbang-sampah-plastik-terbesar-kedua-di-dunia>
- [2]. Jenna Jambeck, 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 347, p.768-771.
- [3]. P. Bhattacharya, P. Steele, 2009. E.B.M. Hassan, B. Mitchell, L. Ingram, C.U. Pittman, Wood/Plastic co-Pyrolysis in an Auger Reactor: Chemical and Physical Analysis of the Products. *Fuel*. 88, 1251-1260.
- [4]. Peters, J.H., Barry, M., Fraser, N., and Collin, E.S., 1995, The Copyrolysis of Poly (Vinyl Chloride) with Cellulose Derived Materials as A Models for Municipal Solid Waste Derived Chars, *Fuel*.
- [5]. Aprian Ramadhan P.& Munawar Ali. 2015. *Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Minyak Menggunakan Proses Pirolisis*. Jawa Timur: Universitas Pembangunan Nasional. Jurnal.4 (1). <http://eprints.upnjatim.ac.id/>. Diakses Pada Tanggal 17 Desember 2018
- [6]. Endang K., Mukhtar G., Abed Nego, F. X. Angga Sugiana. 2016. "*Pengolahan Sampah Plastik Dengan Metode Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak*" Pengembangan Teknologi Kimia Untuk Pengolahan Sumber Daya Alam. Indonesia-Yogyakarta: Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" ISSN : 16934393.
- [7]. Yokoyama, S. 2008. Buku Panduan Biomassa Asia (*Panduan untuk Produksi dan Pemanfaatan Biomassa*). Japan Institute of Energy
- [8]. Daryanto. 1993. Media Visual untuk Pengajaran Teknik. Bandung: Tarsito.
- [9]. Smith, H.P., dan Wilkes, L.H. 1990. *Mesin dan Peralatan Usaha Tani*. Terjemahan Tri Purwadi. UGM Press, Yogyakarta.
- [10]. Irawan, Agustinus P. 2006. Perancangan Ulang Sepeda Elektrik Menggunakan Metode VDI 2221. [Online] Tersedia: <https://www.scribd.com/document/150800469/perancangan> [23 Februari2017].