

## Analisa eksperimental terhadap distribusi produk co-pyrolysis limbah sarung tangan medis dan limbah biomassa

### Experimental analysis on distribution of co-pyrolysis products from medical glove waste and biomass waste

Azzalya P. Athala<sup>1</sup>, Yulia Fitri<sup>1,\*</sup>, Wahyu Meka<sup>2</sup>, Abrar Ridwan<sup>3</sup>, Rain A. Mahendra<sup>3</sup>,  
Tri N. Rezeki<sup>3</sup>, Laras S. Widara<sup>1</sup>, dan Munawir Hamzah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru – Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya – Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru – Indonesia

\*Email: [yuliafitri@umri.ac.id](mailto:yuliafitri@umri.ac.id)

#### Abstrak

Tingginya angka penyebaran covid-19 menimbulkan dampak bagi peningkatan limbah medis secara global. Limbah medis merupakan limbah infeksius yang tergolong limbah fosil, sifatnya yang *non-biodegradable* dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Salah satu metode pengelolaan limbah yang tepat saat ini adalah pirolisis. Pada penelitian ini dilakukan co-pirolisis sarung tangan medis yang digabungkan dengan limbah biologis (limbah makanan, limbah kebun dan limbah kertas) dengan persentase massa 100:0, 25:75, 50:50, 75:25, 0:100 (%). Hasil co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah biologis berupa produk minyak, arang dan gas. Minyak dengan kadar tertinggi dihasilkan dari co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kertas pada persentase massa 75:25 (%) (40%). Hasil maksimum (55%) produk arang dihasilkan dari co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kebun pada persentase massa 75:25 (%). Kadar tertinggi (45%) dari gas diperoleh pada penggabungan sarung tangan medis dengan limbah makanan (persentase massa 75:25 (%)). Secara keseluruhan, uji co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah biomassa dengan persentase massa sampel yang divariasikan menghasilkan produk yang diharapkan dapat membantu pengembangan energi masa mendatang.

**Kata Kunci:** co-pirolisis, limbah kebun, limbah kertas, limbah makanan, sarung tangan medis

#### Abstract

The high rate of spread of COVID-19 has contributed to the increase in medical waste worldwide. Medical waste is an infectious waste classified as fossil waste due to its non-biodegradable potential for environmental pollution. One of the appropriate disposal methods today is pyrolysis. In this study, co-pyrolysis of medical gloves was carried out combined with biological waste (food waste, garden waste and paper waste) with a mass percentage of 100:0, 25:75, 50:50, 75:25, 0:100 (%). Executed. The result of the co-pyrolysis of medical gloves and biological waste is in the form of petroleum, charcoal, and gas products. The highest quality oil is made by co-pyrolyzing medical gloves and waste paper at a mass percentage of 75:25 (%) (40%). The highest yield of charcoal product (55%) was produce by co-pyrolysis of medical gloves and garden waste at a 75:25(%) mass percentage. The highest concentration of gas (45%) was obtaine when combining medical gloves and food waste (mass percentage of 75:25 (%)). Overall, the co-pyrolysis test of medical gloves and biomass waste with different sample mass percentages produces products that are expected to help future energy development.

**Keyword :** co-pyrolysis, food waste, garden waste, medical gloves, paper waste

## 1. PENDAHULUAN

COVID-19 (*Corona Virus Disease*) merupakan wabah yang menyerang seluruh dunia pada akhir 2019. Penyakit yang disebabkan oleh virus *Severe acute respiratory syndrome coronavirus-2* (SARS-CoV-2) ini dapat menular melalui cairan atau *droplets* pada sistem pernapasan (Isyakapurnama et al., 2021; Kumar et al., 2020). *World Health Organization* (WHO) telah menetapkan COVID-19 sebagai pandemi sejak Maret 2020 akibat tingkat penyebarannya yang eksponensial secara global (Satgas covid19, 2022). WHO mencatat bahwa sudah ada sejumlah 591,6 juta jiwa yang terkonfirmasi positif COVID-19 di dunia pada tanggal 19 Agustus 2022 (WHO, 2022). Indonesia tercatat ada 6,2 juta jiwa yang dinyatakan positif COVID-19 pada 15 Agustus 2022, 6.072.421 diantaranya sudah dinyatakan sembuh dan 157.226 jiwa dinyatakan meninggal dunia di Indonesia (Satgas covid19, 2022). Untuk mengurangi penyebaran infeksi, pemerintah membuat peraturan untuk melakukan *social distancing*, cuci tangan menggunakan sabun, dan menggunakan alat pelindungan diri (APD) yang terdiri dari masker wajah, sarung tangan medis dan pelindung wajah bagi masyarakat luas dan tenaga kesehatan (ILO, 2020). Akibatnya, APD sekali pakai yang tergolong limbah medis kategori bahan berbahaya dan beracun (B3) meningkat dan menimbulkan polusi plastik (Saputro & Dwiprigitaningtias, 2022). Persatuan Rumah Sakit Seluruh Indonesia (PERSI) menyebutkan bahwa sejak Maret 2020 hingga Juni 2021, pandemi COVID-19 di Indonesia telah menghasilkan 18.460 ton limbah medis kategori bahan berbahaya dan beracun (B3) (Persi, 2021). Miliaran ton produk plastik telah diproduksi di dunia untuk perlindungan penularan COVID-19, salah satunya limbah sarung tangan medis sekali pakai yang menjadi limbah medis terbanyak kedua setelah masker (Aragaw & Mekonnen, 2021). Sekitar 65 miliar sarung tangan medis yang dibuang dengan cara yang salah dan berakhir di laut (BBC, 2020). Data *Malaysian Rubber Glove Manufacturers Association* (*Margma*) menunjukkan bahwa kenaikan permintaan sarung tangan medis di dunia mencapai 300 miliar pada tahun 2019, dan Indonesia dengan potensi karet alam yang tinggi hanya memiliki pangsa pasar 3% (Fajar, 2022).

Secara garis besar limbah dibagi menjadi dua macam, yaitu limbah biologis dan limbah fosil. Limbah biologis merupakan limbah berbasis hayati yang cepat terurai di alam, seperti limbah hasil kebun dan sisa makanan hasil limbah rumah tangga. Limbah biologis dapat dimanfaatkan menjadi pupuk atau bahan bakar jika melalui pengolahan yang benar. Limbah sarung tangan medis termasuk limbah fosil yang bersifat *non-biodegradable*, yaitu limbah yang sulit dan membutuhkan waktu lama untuk terurai di alam. Limbah fosil tidak dapat di

daur ulang, maka dari itu diperlukan area yang lebih luas untuk pembuangan dan metode yang lebih efektif untuk penanggulangannya. Salah satu pengelolaan untuk mengurangi volume limbah fosil dan biologis adalah dengan teknik konversi (Mishra et al., 2019).

Teknik konversi paling efektif yang telah terbukti saat ini adalah konversi termokimia (Mishra et al., 2019). Konversi termokimia dapat mengubah limbah menjadi bahan bakar gas, cair atau padat, termasuk bahan kimia yang bisa langsung digunakan atau diolah kembali. Metode yang umum digunakan adalah pembakaran (*incineration*), pirolisis, *gasification*, dan *liquefaction*. Di antara semua teknologi termokimia, pirolisis adalah salah satu teknologi yang paling menarik dan layak untuk mengubah limbah fosil dan limbah biologis pada suhu yang relatif rendah sekitar 350-500°C dan dilakukan tanpa oksigen (Mishra et al., 2019; Dewi & Ardi Nugroho, 2017; Arunkumar & Lingegowda, 2014). Pirolisis bermanfaat untuk memperoleh bahan bakar alternatif dari limbah, cara ini juga sangat menjanjikan karena memiliki sejumlah keunggulan, di antaranya pengurangan volume sampah yang signifikan (Wijayanti et al., 2022). Keunggulan pirolisis dibandingkan dengan pembakaran (*incineration*), yaitu dapat mereduksi gas buang hingga 20 kali lipat. Disisi lain, produk pirolisis dapat dimanfaatkan lebih fleksibel dan penanganannya lebih mudah (Arunkumar & Lingegowda, 2014). Pirolisis menghasilkan produk padat (*biochar*), cair (*biofuel* atau minyak pirolisis dan *tar*) dan gas (*syngas*) pada saat yang sama (Nofiyanto et al., 2019; Ridhuan et al., 2019).

Limbah biologis dikenal sebagai sumber energi alternatif terbaru yang dapat digunakan untuk memproduksi bahan kimia dan bahan bakar melalui proses pirolisis. Namun, belum lama ini diketahui bahwa ada cara yang lebih efektif untuk meningkatkan kualitas dan sifat bahan bakar cair hasil pirolisis, yaitu dengan mencampurkan limbah biologis dengan limbah fosil. Metode ini disebut dengan co-pirolisis. Banyak penelitian yang menunjukkan bahwa metode co-pirolisis telah berhasil meningkatkan kualitas dan kuantitas minyak tanpa perbaikan dalam prosedur kerjanya (Abnisa & Wan Daud, 2014). Pemisahan fase pada pembentukan minyak hasil co-pirolisis dapat dihindari, ini disebabkan oleh interaksi radikal yang terjadi (Martínez et al., 2014). Manfaat utama dari metode co-pirolisis adalah dapat mengurangi volume limbah secara signifikan karena banyaknya limbah yang dijadikan bahan baku co-pirolisis. Selain itu, metode ini juga menjanjikan dalam bidang teknik konversi biomassa untuk menghasilkan minyak pirolisis yang memiliki potensi untuk pengembangan komersial (Abnisa & Wan Daud, 2014).

Penelitian mengenai pirolisis dan co-pirolisis telah banyak dilakukan. Pirolisis pada limbah sarung tangan medis sudah dilakukan pada tahun 2013 oleh Deng Na, dkk. Mereka menyatakan bahwa proses pirolisis komposisi karet dapat menjadi lebih mekanistik dan nyaman digunakan untuk pengelolaan limbah yang menghasilkan bahan bakar (Deng et al., 2013). Wangsa et al. (2020) melakukan penelitian uji pirolisis pada limbah sarung tangan medis *latex*. Hasil penelitian yang telah dilakukan menjelaskan bahwa sarung tangan medis *latex* yang dipanaskan dengan 200°C selama 2 jam menghasilkan 15.9% minyak, 45.35% produk *syngas*, dan 38.75% residu (*biochar*) dari 2000 gram limbah, dimana produk cair mengandung spesies koloid atau *wax*. Aragaw & Mekonnen (2021) juga melakukan eksperimen pirolisis pada sampah medis, yaitu masker dan sarung tangan medis. Masker dan sarung tangan medis dipirolisis dalam reaktor tertutup pada suhu 400°C selama 1 jam. Berdasarkan eksperimen tersebut, diperoleh tingkat bahan bakar *tar* 75%, arang 10%, dan sisanya dilepaskan sebagai gas yang tidak dapat dikondensasi. Mishra et al. (2019) telah mempelajari co-pirolisis antara limbah biologis berupa biji mimba dengan limbah sarung tangan medis nitril menunjukkan hasil cair maksimum yaitu  $43,52 \pm 2,20$  wt% dengan rasio 3:1 yang dicapai pada suhu 500°C dan laju aliran nitrogen 100 ml/min. Mishra et al., (2019) menjelaskan bahwa campuran biomassa dengan sampah plastik dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas produksi minyak dengan mengurangi viskositas, kandungan O<sub>2</sub>, kadar air dan meningkatkan nilai kalor, kandungan karbon dan keasaman.

Dalam penelitian ini, kami melakukan uji co-pirolisis pada sarung tangan medis dengan masing-masing limbah dari tiga jenis biomassa. Biomassa yang digunakan adalah limbah sisa makanan, limbah kebun dan limbah kertas HVS. Massa seluruh sample divariasikan, hal ini dilakukan untuk mengetahui komposisi produk hasil co-pirolisis dengan mengacu pada fungsi komposisi serta karakteristik masing-masing limbah. Persentase massa yang digunakan yaitu, 100:0, 25:75, 50:50, 75:25, dan 0:100 (%). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui produk hasil co-pirolisis dan kadar dari produk yang dihasilkan. Penelitian ini juga sebagai sarana untuk menganalisa produk yang dihasilkan dengan memvariasikan komposisi dan massa limbah.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1. Persiapan Sampel

Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah sarung tangan medis yang dibeli dari salah satu apotek di Kota Pekanbaru serta limbah sisa makanan, limbah kebun dan limbah kertas HVS

yang diperoleh dari lingkungan Universitas Muhammadiyah Riau. Sarung tangan medis, limbah kebun dan kertas HVS dipotong kecil-kecil dengan ukuran 0,5-1 cm, tujuannya adalah untuk mencapai tingkat pemanasan yang tinggi dan merata (Abnisa & Wan Daud, 2014; Syamsiro et al., 2016). Sampel limbah sisa makanan dikeringkan menggunakan *oven* dengan suhu 90°C selama 12 jam (Yuan et al., 2018). Fungsi dari proses pengeringan ini yaitu untuk menghilangkan kadar air pada sampel. Kadar air yang tinggi dalam sampel dapat menghasilkan minyak yang memiliki kadar air yang tinggi juga (Abnisa & Wan Daud, 2014).

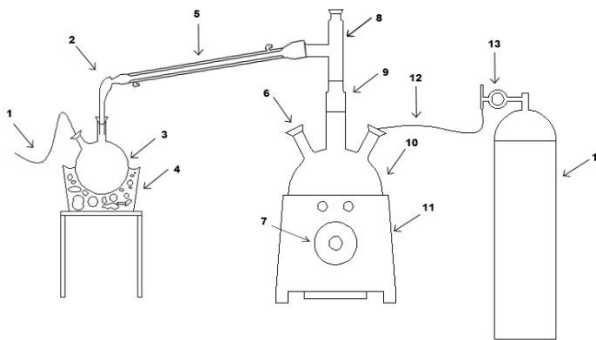
### 2.2. Karakteristik Sampel yang Digunakan

Uji karakteristik pada sampel menjadi hal utama yang harus dilakukan sebelum proses co-pirolisis agar dapat memberikan gambaran kualitas produk yang dihasilkan dari proses tersebut. Karakteristik sampel dapat diuji dengan metode *proximate*. Uji *proximate* dilakukan untuk mengetahui kadar air, volatil, abu dan nilai *fixed carbon* dari sampel (Mishra et al., 2019; Zhang et al., 2020; Dharmaraj et al., 2021). Kadar air diperoleh dengan proses pengeringan. Sampel yang telah dicacah dimasukkan ke dalam cawan keramik yang sudah disterilkan terlebih dahulu, kemudian dipanaskan pada suhu 105°C menggunakan *oven*. Hal yang sama juga dilakukan untuk mengetahui kadar volatil. Sampel yang telah diketahui kadar airnya, dipanaskan pada suhu 600°C menggunakan *furnace*. Suhu 900°C dibutuhkan untuk menguji kadar abu pada sampel. Masing-masing pengujian dalam penelitian ini menghabiskan waktu selama 1 jam. Perubahan massa dapat diketahui dengan menimbang sampel pada cawan sebelum pengujian dan setelah diuji kadar air, volatil dan abunya (Crombie et al., 2013). Kadar *fixed carbon* dapat dihitung setelah mengetahui nilai kadar air, volatil dan abu.

### 2.3. Prosedur Eksperimen

Proses co-pirolisis menggunakan dua jenis reaktor, yaitu *Round-bottom flask 3 neck* merek iwaki *glass* berkapasitas 1000 ml yang digunakan sebagai reaktor pemanas dan *Round-bottom flask 2 neck* dengan merek yang sama berukuran 500 ml untuk menampung produk cair hasil co-pirolisis. *Round-bottom flask 3 neck* dipanaskan menggunakan *heating mantel* dengan merek *Electromantle*, suhunya diatur menggunakan kontrol suhu yang terletak pada *heating mantel*. Pemilihan *Round-bottom flask* dilakukan agar distribusi panas merata ke seluruh sampel. *Liebig* merupakan pipa kondensor yang dihubungkan dengan tiga jenis adaptor. Adaptor *reduction* untuk menghubungkan *Round-bottom flask 3 neck* dengan adaptor tiga arah, adaptor tiga arah yang digunakan

untuk menghubungkan adaptor *reduction* dengan *liebig*, dan adaptor *receiver* yang dihubungkan dengan *Round-bottom flask 2 neck*. *Liebig* dan ketiga adaptor yang digunakan pada penelitian ini merupakan produk dari iwaki *glass*. Pemilihan kondensor *liebig* adalah untuk mengantisipasi pembentukan produk2 yang tidak diinginkan seperti lilin yang sulit untuk dibersihkan dan dapat mengotori kondensor. Pada proses co-pirolisis, gas nitrogen dialirkan dari tabung gas melalui selang nitrogen. Laju alirannya diatur menggunakan regulator. Hasil proses co-pirolisis ditampung menggunakan *Round-bottom flask 2 neck* yang diletakkan diatas *cooler* (berisi es batu dan garam), hal ini dilakukan agar suhu fluida turun sehingga memperkecil momentum fluida alir dan memperlama waktu tinggal fluida meningkat. Waktu tinggal yang lebih lama mampu memperbesar peluang volatile yang mudah mengembun untuk terperangkap di dalam labu pendingin. Sisa gas yang tidak terkondensasi dikeluarkan melalui selang pembuangan. Rangkaian alat pada proses co-pirolisis dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Rangkaian alat co-pirolisis : 1. Selang pembuangan; 2. Adaptor Receiver; 3. Round-bottom flask 2 neck; 4. Cooler; 5. Liebig; 6. Rubber stopper; 7. Kontrol suhu; 8. Adaptor tiga arah; 9. Adaptor reduction; 10. Round-bottom flask 3 neck; 11. Heating mantel; 12. Selang Nitrogen; 13. Regulator; 14. Tabung gas nitrogen.

Proses pengambilan data co-pirolisis dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Universitas Muhammadiyah Riau. Secara teknis, prosedur kerja pirolisis dan co-pirolisis hampir sama (Abnisa & Wan Daud, 2014). Seluruh sampel yang telah disiapkan ditimbang, massa dan rasio masing-masing sampel dapat dilihat pada Tabel 1. Sampel dimasukkan ke dalam *Round-bottom flask 3 neck*, kemudian dipanaskan menggunakan *heating mantel*. Secara umum, proses co-pirolisis menggunakan suhu yang berkisar antara 300–650°C

(Dharmaraj et al., 2021). Kisaran suhu tersebut dapat memproduksi minyak maksimum lebih dari 45%. Namun, suhu optimum yang digunakan tergantung karakteristik bahan baku pada proses co-pirolisis (Ridhuan et al., 2019). Pada eksperimen ini, suhu yang digunakan adalah 400°C. Pemanasan dilakukan tanpa oksigen dengan menutup *Round-bottom flask 3 neck* menggunakan *rubber stopper* agar kedap udara. *Round-bottom flask 3 neck* dialiri gas nitrogen dengan laju aliran sebesar 0,5L/min. Gas ini berfungsi untuk mempercepat proses perubahan uap dari zona panas (zona pirolisis) ke zona dingin (kondensor) serta meningkatkan nilai kalor dan *fixed carbon*. Penggunaan gas nitrogen dapat meningkatkan panas dalam reaktor, hal ini berpengaruh pada hasil produk pirolisis (Abnisa & Wan Daud, 2014; Martínez et al., 2014).

Sampel yang dipanaskan mengalami proses pemecahan senyawa, produk yang dihasilkan adalah *Char* (arang) dan molekul gas. Proses pemanasan dilakukan hingga sampel sudah tidak menghasilkan gas (*syngas*). Waktu yang dibutuhkan pada proses ini dihitung menggunakan *stopwatch*. Gas yang dihasilkan dari tahap pemanasan keluar dari *Round-bottom flask 3 neck*. Gas ini dilewatkan melalui *liebig* (kondensor) yang dialirkan air dengan suhu ruang sekitar 30-35°C untuk proses pendinginan. Tahapan ini disebut dengan tahap kondensasi (Aragaw & Mekonnen, 2021). Hasil uap panas yang sudah dikondensasi berubah menjadi minyak. Minyak mengalir melalui adaptor *receiver* menuju *Round-bottom flask 2 neck* yang diletakkan di atas *cooler* (berisi es dan garam). Hasil dari tahapan kondensasi ini adalah produk berupa minyak atau *wax*.

Gas ringan yang tidak dapat terkondensasi dikeluarkan melalui selang pembuangan yang disambungkan pada *Round Bottom Flask 2*. Pada akhir eksperimen, *Round Bottom Flask 3 neck* yang berisi Arang dan *Round Bottom Flask 2 neck* yang berisi minyak atau *wax* ditimbang untuk mengetahui berapa massa dan persentase produk yang dihasilkan pada proses co-pirolisis ini. Persentase produk hasil co-pirolisis dihitung menggunakan persamaan berikut (Mishra et al., 2019) :

$$\% \text{Minyak} = \left[ \frac{\text{Massa minyak}}{\text{Massa total sampel}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$\% \text{Arang} = \left[ \frac{\text{Massa arang}}{\text{Massa total sampel}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

$$\% \text{Gas} = 100\% - [\% \text{Minyak} + \% \text{Arang}] \quad (3)$$

**Tabel 1.** Massa dan Rasio Sampel

No.	Nama Sampel	Jenis Sampel		Massa Sampel		Rasio
		Sampel 1	Sampel 2	Sampel 1	Sampel 2	
1	Sampel 1	Sarung Medis	Tangan -	62 gr	-	1
2	Sampel 2	Limbah Makanan	-	280 gr	-	1
3	Sampel 3	Limbah Kebun	-	34 gr	-	1
4	Sampel 4	Limbah Kertas	-	50 gr	-	1
5	Sampel 5	Sarung Medis	Tangan Limbah Makanan	50 gr	50 gr	1 : 1
6	Sampel 6	Sarung Medis	Tangan Limbah Kebun	15 gr	15 gr	1 : 1
7	Sampel 7	Sarung Medis	Tangan Limbah Kertas	20 gr	20 gr	1 : 1
8	Sampel 8	Sarung Medis	Tangan Limbah Makanan	20 gr	60 gr	1 : 3
9	Sampel 9	Sarung Medis	Tangan Limbah Kebun	15 gr	45 gr	1 : 3
10	Sampel 10	Sarung Medis	Tangan Limbah Kertas	15 gr	45 gr	1 : 3
11	Sampel 11	Sarung Medis	Tangan Limbah Makanan	30 gr	10 gr	3 : 1
12	Sampel 12	Sarung Medis	Tangan Limbah Kebun	30 gr	10 gr	3 : 1
13	Sampel 13	Sarung Medis	Tangan Limbah Kertas	45 gr	15 gr	3 : 1

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil Uji Karakteristik Sampel

Karakteristik sarung tangan medis, limbah makanan, limbah kebun dan limbah kertas disajikan pada Tabel 2. Hasil pengujian mengkonfirmasi bahwa limbah sarung tangan medis, limbah makanan, limbah kebun dan limbah kertas memiliki kadar volatil yang tinggi dan salah satu dari keempat sampel tersebut (limbah makanan) memiliki kadar abu yang rendah. Kandungan abu yang rendah dapat meningkatkan efisiensi pemanasan Kadar air pada sarung tangan medis, limbah kebun dan limbah kertas berkisar antara 2-7%, berada dalam batas maksimum yang disarankan yaitu dibawah 10%. Kadar air yang tinggi di dalam sampel dapat menghasilkan minyak dengan kadar air yang tinggi pula (Bridgwater, 2012).

#### 3.2. Hasil Uji Co-pirolisis

Interaksi sinergis terjadi selama proses co-pirolisis karena terjadinya reaktivitas yang tinggi dari limbah biologis dan sarung tangan medis. Volatil yang terkandung dalam limbah menyebabkan efek sinergis pada limbah tersebut, sehingga meningkatkan reaksi co-pirolisis (Amrullah et al., 2022). Kadar volatil yang tinggi

dapat mempermudah proses pemanasan saat pirolisis sehingga uap yang dihasilkan lebih banyak yang terkondensasi menjadi minyak (Mishra & Mohanty, 2020). Perbandingan hasil co-pirolisis sarung tangan medis dengan masing-masing dari tiga jenis limbah biologis (limbah makanan, limbah kebun dan limbah kertas) pada rasio 1:1, 1:3 dan 3:1 dapat diamati pada Tabel 3.

Co-pirolisis pada sarung tangan medis dan limbah kertas dengan rasio 3:1 menghasilkan kadar minyak paling tinggi, yaitu sebesar 40%. Hal ini terjadi karena efek yang dihasilkan oleh reaksi silang pada proses co-pirolisis dapat menghambat pelepasan gas dan mendukung pembentukan senyawa organik dalam fase minyak (Önal et al., 2014). Sarung tangan medis termasuk polimer termoplastik jenis PVC (*polyvinyl chloride*) yang mengandung banyak hidrokarbon jenuh, senyawa ini berpotensi meningkatkan kadar minyak hasil pemanasan (Jain et al., 2022; Wairata et al., 2013). Hasil yang diperoleh sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Chen et al. (2016) pada co-pirolisis polimer (HDPE) dan limbah kertas koran yang menghasilkan minyak paling banyak (54,65%). Hasil ini diperoleh dari co-pirolisis dengan jumlah HDPE lebih besar dari limbah kertas koran. Partikel pada polimer mampu memaksimalkan pelepasan volatil. Volatil yang terlepas, diproses lebih lanjut dan dikumpulkan dalam bentuk cair. Volatil sarung tangan medis dan limbah kertas sebesar 68,0806%

dan 70,0683% secara berturut-turut, rata-rata kadar volatil yang digunakan pada uji co-pirolisis berkisar antara 65-97% (Mishra et al., 2019; Amrullah et al., 2022). Semakin banyak volatil yang dihasilkan dari proses co-pirolisis dengan massa polimer lebih tinggi, maka kadar minyak yang dihasilkan juga meningkat (Mishra & Mohanty, 2020). Kadar volatil yang tinggi menghasilkan nilai kalor dan energi yang besar, sehingga kandungan volatil tersebut dapat mengurangi residu dan meningkatkan hasil minyak yang diperoleh dari uji co-pirolisis (Klinger et al., 2018). Hasil co-pirolisis antara gloves dengan limbah kertas menunjukkan bahwa minyak yang diperoleh berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar dalam pengoperasian mesin standar (Martínez et al., 2014).

Co-pirolisis sarung tangan medis dengan limbah makanan menghasilkan kadar minyak tertinggi jika massa limbah makanan lebih besar. Uji co-pirolisis gloves dan limbah makanan pada rasio 1:3 mengasilkan 35% minyak. Amrullah et al. (2022) juga melakukan uji co-pirolisis polimer (PET) dan limbah makanan. Hasil penelitiannya menunjukkan massa limbah makanan yang lebih banyak dibandingkan limbah plastik menghasilkan kadar minyak yang tinggi. Kandungan senyawa enol, alkohol, asam, dan aldehida yang dihasilkan dari pemanasan limbah makanan dapat mengikis kadar hidrokarbon yang terlalu tinggi pada polimer. Hidrokarbon yang lebih stabil berfungsi untuk meningkatkan proses hidrogenasi, sehingga kadar oksigen yang tinggi pada limbah makanan dapat berkurang (Ly et al., 2021; Zhang et al., 2020). Hubungan keduanya dapat meningkatkan nilai kalor minyak yang dihasilkan pada uji co-pirolisis. Nilai kalor yang tinggi memiliki aplikasi potensial sebagai bahan bakar cair. Nilai kalor yang terkandung dalam minyak hasil co-pirolisis limbah biologis berkisar antara 27,60 MJ/kg sampai 31,34 MJ/kg (Ly et al., 2021).

Sarung tangan medis yang dico-pirolisis dengan limbah kebun menghasilkan kadar minyak yang tinggi pada rasio 1 : 1. Kadar minyak yang dihasilkan sebesar 33,3%. Mishra et al. (2019) pada penelitiannya melakukan uji co-pirolisis antara sarung tangan medis nitril dengan biji mimba yang menghasilkan kadar minyak lebih banyak. Hal ini dipengaruhi oleh senyawa lignoselulosa yang terkandung pada limbah kebun. Lignoselulosa yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin merupakan komponen penting dalam menghasilkan volatil (Abnisa & Wan Daud, 2014). Sarung tangan medis juga mengandung kadar hidrogen yang tinggi, sehingga selama proses co-pirolisis terjadi donor hidrogen dari sarung tangan medis ke limbah kebun. Penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa minyak hasil co-pirolisis antara polimer dengan limbah kebun memiliki nilai densitas yang mendekati standar nilai densitas dari *diesel oil*. Ini membuktikan bahwa minyak hasil co-pirolisis dari

sarung tangan medis dan limbah kebun berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar (Sunarno et al., 2021).

Arang tertinggi dihasilkan oleh co-pirolisis antara sarung tangan medis dan limbah kebun dengan rasio 3:1, kadar yang dihasilkan sebesar 55%. Tingginya kadar arang dipengaruhi oleh kandungan abu pada bahan yang diuji. Kadar abu yang terkandung pada sarung tangan medis dan limbah kebun masing-masing sebesar 13,3767% dan 24,1534%. Kadar abu yang tinggi menghasilkan kadar arang yang tinggi juga, begitupun sebaliknya. Hal ini terjadi karena ada sedikit unsur anorganik dalam abu yang diketahui dapat mengkatalisis reaksi pembentukan arang selama proses co-pirolisis (Kim, 2015). Pencampuran yang tidak sempurna antar sampel saat uji co-pirolisis juga memberikan dampak pada kadar arang yang dihasilkan (Kim et al., 2013). Jumlah sarung tangan medis yang lebih banyak mempengaruhi tingginya kadar karbon dan rendahnya kadar oksigen yang dihasilkan. Hal ini berpengaruh pula pada nilai kalor pada arang hasil uji co-pirolisis. Nilai kalor yang tinggi pada arang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif pengganti batu bara (Tanoh et al., 2020). Samal et al. (2021) melakukan uji co-pirolisis antara limbah plastik jenis LDPE dan kayu *eucalyptus*. Hasilnya menunjukkan bahwa indeks nilai bahan bakar dari semua arang adalah > 500 GJ/m<sup>3</sup> yang menunjukkan kesesuaiannya sebagai bahan bakar berkualitas tinggi.

Uji co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kertas menghasilkan arang tertinggi pada rasio 1:3, kadar yang diperoleh sebesar 43,33%. Hasil ini dipengaruhi oleh kandungan abu dan *fixed carbon* yang cukup tinggi pada kertas. Penambahan limbah kertas dalam jumlah yang lebih besar menambah kadar arang yang dihasilkan dari proses co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kertas (Chen et al., 2016). Jumlah kadar arang yang dihasilkan juga bergantung pada suhu dan aliran nitrogen di dalam reaktor. Laju aliran gas nitrogen mempengaruhi suhu dalam reaktor, semakin besar laju alirannya semakin tinggi suhu yang digunakan pada proses ini. Suhu yang tinggi dapat mengubah arang menjadi abu, maka dari itu laju aliran gas nitrogen diatur agar tidak meningkatkan suhu pada proses co-pirolisis ini (Martínez et al., 2014; Takele et al., 2022). Arang yang dihasilkan dari proses co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kertas yang memiliki massa lebih besar dapat berpotensi untuk digunakan dalam proses amandemen tanah, bahan pembangkit panas dan lainnya (Oni et al., 2019; Bridgwater, 2012).

Co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah makanan menghasilkan *Arang* tertinggi pada rasio 1:3, kadar arang yang dihasilkan sebesar 37,5%. Tang et al. (2018) melakukan uji co-pirolisis limbah makanan (kacang kedelai) dengan polimer jenis PVC. Penelitian ini menyatakan bahwa kadar arang

tertinggi dihasilkan pada rasio kacang kedelai yang lebih tinggi dibandingkan PVC. Kandungan karbon yang tinggi serta dekomposisi termal pada limbah makanan mempengaruhi produksi arang yang dihasilkan dalam proses ini. Produksi arang juga bergantung pada komposisi biomassa, seperti kadar air dan keberadaan selulosa atau lignin. Limbah makanan memiliki fraksi hemiselulosa yang substansial, maka dari itu arang yang dihasilkan dari proses co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah makanan dengan massa yang lebih besar dapat dimanfaatkan dalam bidang pertanian untuk meningkatkan retensi air dan nutrisi pada tanah (Elkhalifa et al., 2019; Tripathi et al., 2016).

Dalam proses co-pirolisis sarung tangan medis dengan masing-masing dari tiga jenis limbah biologis ini juga menghasilkan gas buangan yang

tidak dapat melewati tahap kondensasi. Kadar gas tertinggi yang dihasilkan dari proses ini sebesar 45%. Tingginya kadar gas dipengaruhi oleh ukuran partikel sampel yang digunakan saat pemanasan. Ukuran partikel sampel yang terlalu besar dapat memperlambat perpindahan panas yang terjadi di dalam reaktor. Gas yang dihasilkan dari tahap pemanasan membutuhkan waktu lebih lama untuk keluar dari partikel. Perpindahan panas yang tidak merata menyebabkan reaksi sekunder dari senyawa berat molekul berat yang terkandung di dalam uap. Perengkahan reaksi sekunder menghasilkan uap hidrokarbon, tekanan internal yang lebih tinggi dapat memecah bahan mentah menjadi fragmen. Hal ini mengakibatkan konsentrasi gas yang tidak dapat terkondensasi meningkat (Cheng & Brewer, 2017; Amrullah et al., 2022; Uddin et al., 2014).

**Tabel 2.** Hasil Uji Proximate

Jenis Sampah	% Kadar Air	% Kadar Volatil	% Kadar Abu	%Kadar Fixed Carbon
Sarung tangan medis	2,3171%	68,0806%	13,3767%	16,2257%
Limbah Makanan	26,9518%	70,0683%	2,5100%	0,4700%
Limbah Kebun	6,9506%	64,1165%	24,1534%	4,7795%
Limbah Kertas	3,0217%	65,5465%	19,2003%	12,2315%

**Tabel 3.** Hasil Uji Co-pirolisis

Sampel	Persentase	% Minyak	% Arang	% Gas
Sarung tangan medis x Limbah Makanan	50:50	29,00	33,00	38,00
Sarung tangan medis x Limbah Makanan	25 : 75	35,00	37,50	27,50
Sarung tangan medis x Limbah Makanan	75 : 25	25,00	30,00	45,00
Sarung tangan medis x Limbah Kebun	50:50	33,33	40,00	26,67
Sarung tangan medis x Limbah kebun	25 : 75	30,00	48,33	21,67
Sarung tangan medis x Limbah Kebun	75 : 25	22,50	55,00	22,50
Sarung tangan medis x Limbah Kertas	50:50	22,50	40,00	37,50
Sarung tangan medis x Limbah Kertas	25 : 75	28,33	43,33	28,33
Sarung tangan medis x Limbah Kertas	75 : 25	40,00	40,00	20,00

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh hasil bahwa co-pirolisis menghasilkan produk berupa minyak, arang dan gas. Persentase massa yang berbeda antar limbah dapat mempengaruhi nilai kadar produk yang dihasilkan pada proses co-pirolisis ini. Produk dengan kadar tertinggi yaitu arang yang dihasilkan dari co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kebun dengan perbandingan 75:25 (%). Produk selanjutnya yaitu minyak yang dihasilkan dari co-pirolisis sarung tangan medis dan limbah kertas dengan persentase massa 75:25 (%). Peningkatan nilai kadar serta kualitas produk hasil co-pirolisis dapat menjadi alternatif bahan bakar dan metode co-pirolisis ini

juga dapat menjadi inovasi dalam pengelolaan limbah di Indonesia pada masa yang akan datang.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abnisa, F., & Wan Daud, W. M. A. (2014). A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil. *Energy Conversion and Management*, 87, 71–85. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.007>
- Amrullah, A., Farobie, O., Septarini, S., & Satrio, J. A. (2022). Heliyon Synergetic biofuel production from co-pyrolysis of food and plastic waste : reaction kinetics and product

- behavior. *Heliyon*, 8(January), e10278. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10278>
- Aragaw, T. A., & Mekonnen, B. A. (2021). Current plastics pollution threats due to COVID-19 and its possible mitigation techniques: a waste-to-energy conversion via Pyrolysis. *Environmental Systems Research*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00217-x>
- Arunkumar, K. N., & Lingegowda, N. S. (2014). Conversion of Ldpe Plastic Waste Into Liquid Fuel By. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 2(4), 104–107.
- BBC, 2020. Covid-19: Saat miliaran masker dan sarung tangan sekali pakai berakhir di laut. BBC News Indonesia. <https://www.bbc.com/indonesia/media-53335064> (accessed 18.08.22)
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Chen, W., Shi, S., Zhang, J., Chen, M., & Zhou, X. (2016). Co-pyrolysis of waste newspaper with high-density polyethylene : Synergistic effect and oil characterization. *Energy Conversion and Management*, 112, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.005>
- Cheng, F., & Brewer, C. E. (2017). Producing jet fuel from biomass lignin: Potential pathways to alkyl-benzenes and cycloalkanes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(January), 673–722. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.030>
- Crombie, K., Mašek, O., Sohi, S. P., Brownsort, P., & Cross, A. (2013). The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. *GCB Bioenergy*, 5(2), 122–131. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12030>
- Deng, N., Wang, W. W., Chen, G. W., Zhang, Y., Zhang, Y. F., & Ma, H. T. (2013). Pyrolysis characteristics of rubber compositions in medical waste. *Journal of Central South University*, 20(9), 2466–2471. <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1758-6>
- Dewi, T. U., & Ardi Nugroho, P. N. (2017). Studi Eksperimen Pengaruh Torrefaksi pada Karakteristik Bahan Bakar Padat dari Biomassa Residu Hutan. *Jurnal Konversi Energi Dan Manufaktur*, 4(2), 62–69. <https://doi.org/10.21009/jkem.4.2.2>
- Dharmaraj, S., Ashokkumar, V., Pandiyan, R., Halimatul Munawaroh, H. S., Chew, K. W., Chen, W. H., & Ngamcharussrivichai, C. (2021). Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes. *Chemosphere*, 275, 130092. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130092>
- Elkhalifa, S., Al-ansari, T., Mackey, H. R., & Mckay, G. (2019). Resources , Conservation & Recycling Food waste to biochars through pyrolysis : A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 144(September 2018), 310–320. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.024>
- Fajar, T. (2022). RI Miliki Potensi Besar di Industri Sarung Tangan Karet. Okezone. <https://economy.okezone.com/read/2019/05/07/320/2052506/ri-miliki-potensi-besar-di-industri-sarung-tangan-karet> (accessed 18.08.22)
- ILO. (2020). In the face of a pandemic: Ensuring Safety and Health at Work. In *International labour organisation*. [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms\\_742463.pdf%0Ahttps://www.dgs.pt/saude-ocupacional/documentos-so/oit-campanha-sst-2020-pdf.aspx](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms_742463.pdf%0Ahttps://www.dgs.pt/saude-ocupacional/documentos-so/oit-campanha-sst-2020-pdf.aspx)
- Isyakaapurnama, S., Sarastri, D., & Mahardika, hega aisyah. (2021). Potensi Teknologi Pengolahan Berbasis Pirolisis dalam Penanganan Limbah Alat Pelindung Diri yang Menumpuk di Masa Pandemi Covid-19. *Journal Of Reserach in Pharmacy*, 1(1), 34–43.
- Jain, S., Yadav Lamba, B., Kumar, S., & Singh, D. (2022). Strategy for repurposing of disposed PPE kits by production of biofuel: Pressing priority amidst COVID-19 pandemic. *Biofuels*, 13(5), 545–549. <https://doi.org/10.1080/17597269.2020.1797350>
- Kim, S. W. (2015). Bioresource Technology Prediction of product distribution in fine biomass pyrolysis in fluidized beds based on proximate analysis. *Bioresource Technology*, 175, 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.107>
- Kim, S. W., Park, D. K., & Kim, S. D. (2013). Pyrolytic characteristics of Jatropha seedshell cake in thermobalance and fluidized bed reactors. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30(5), 1162–1170. <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0015-x>
- Klinger, J. L., Westover, T. L., Emerson, R. M., Williams, C. L., Hernandez, S., Monson, G. D., & Ryan, J. C. (2018). Effect of biomass type, heating rate, and sample size on microwave-enhanced fast pyrolysis product yields and qualities. *Applied Energy*, 228(July), 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.107>



- Kumar, V., Monika, K., Bharti, R., & Ali Khan, N. (2020). A Review on Corona Virus and Covid-19. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 65(1), 110–115. <https://doi.org/10.47583/ijpsrr.2020.v65i01.016>
- Ly, H. V., Tran, Q. K., Kim, S. S., Kim, J., Choi, S. S., & Oh, C. (2021). Catalytic upgrade for pyrolysis of food waste in a bubbling fluidized-bed reactor. *Environmental Pollution*, 275, 116023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116023>
- Martínez, J. D., Veses, A., Mastral, A. M., Murillo, R., Navarro, M. V., Puy, N., Artigues, A., Bartrolí, J., & García, T. (2014). Co-pyrolysis of biomass with waste tyres: Upgrading of liquid bio-fuel. *Fuel Processing Technology*, 119, 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.11.015>
- Mishra, R. K., Iyer, J. S., & Mohanty, K. (2019). Conversion of waste biomass and waste nitrile gloves into renewable fuel. *Waste Management*, 89, 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.032>
- Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2020). Co-pyrolysis of waste biomass and waste plastics ( polystyrene and waste nitrile gloves ) into renewable fuel and value-added chemicals. *Carbon Resources Conversion*, 3(November), 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2020.11.001>
- Nofiyanto, A., Soebiyakto, G., & Suwandono, P. (2019). Studi Proses Pirolisis Berbahaya Jerami Padi terhadap Hasil Produksi Char dan Tar sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Proton*, 11(1), 21–28
- Önal, E., Uzun, B. B., & Pütün, A. E. (2014). Bio-oil production via co-pyrolysis of almond shell as biomass and high density polyethylene. *Energy Conversion and Management*, 78, 704–710. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.022>
- Oni, B. A., Oziegbe, O., & Olawole, O. O. (2019). Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), 222–236. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2019.12.006>
- Persi. (2021). *KLHK: Pandemi Hasilkan 18 Ribu Ton Limbah Medis, PERSI Perkirakan Kenyataan di Lapangan Jauh Lebih Besar*. [https://persi.or.id/klhk-pandemi-hasilkan-18-ribu-ton-limbah-medis-persi-perkirakan-kenyataan-di-lapangan-jauh-lebih-besar/#:~:text=Jauh%20Lebih%20Besar-KLHK%3A%20Pandemi%20Hasilkan%2018%20Ribu%20Ton%20Limbah%20Medis%2C%20PERSI%20Perkirakan,di%20Lapangan%20Jauh%20Lebih%20Besar&text=Sejak%20Maret%202020%20hingga%20Juni,berbahaya%20dan%20beracun%20\(B3\)](https://persi.or.id/klhk-pandemi-hasilkan-18-ribu-ton-limbah-medis-persi-perkirakan-kenyataan-di-lapangan-jauh-lebih-besar/#:~:text=Jauh%20Lebih%20Besar-KLHK%3A%20Pandemi%20Hasilkan%2018%20Ribu%20Ton%20Limbah%20Medis%2C%20PERSI%20Perkirakan,di%20Lapangan%20Jauh%20Lebih%20Besar&text=Sejak%20Maret%202020%20hingga%20Juni,berbahaya%20dan%20beracun%20(B3)) (accessed 15.08.22)
- Ridhuan, K., Irawan, D., & Inthifawzi, R. (2019). Proses Pembakaran Pirolisis dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang Dihasilkan. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro : Turbo*, 8(1), 69–78. <http://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo>
- Samal, B., Vanapalli, K. R., Dubey, B. K., Bhattacharya, J., Chandra, S., & Medha, I. (2021). Char from the co-pyrolysis of Eucalyptus wood and low-density polyethylene for use as high-quality fuel: Influence of process parameters. *Science of the Total Environment*, 794, 148723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148723>
- Saputro, H. D., & Dwiprigitaningtias, I. (2022). Penanganan pada Limbah Infeksius (Sampah Medis) akibat Covid-19 untuk Kelestarian Lingkungan Hidup. *Jurnal Dialektika Hukum*, 4(1).
- Satgas covid19. (2022). *Data Sebaran Covid-19*. <https://covid19.go.id/> (accessed 15.08.22)
- Sunarno, S., Randi, A., Utama, P. S., Yenti, S. R., Wisrayetti, W., & Wicakso, D. R. (2021). Improving Bio-Oil Quality Via Co-Pyrolysis Empty Fruit Bunches and Polypropilen Plastic Waste. *Konversi*, 10(2), 109–114. <https://doi.org/10.20527/k.v10i2.11384>
- Syamsiro, M., Hadiyanto, A. N., & Mufrodi, Z. (2016). Rancang Bangun Mesin Pencacah Plastik Sebagai Bahan Baku Mesin Pirolisis Skala Komunal. *Jurnal Mekanika Dan Sistem Termal (JMST)*, 1 (2)(August), 43–48. <http://e-journal.janabadra.ac.id/index.php/JMST>
- Takele, T. N., Sundar, S., Awoke, K., Tesfaye, A., & Getu, E. (2022). Conversion of Cud and Paper Waste to Biochar Using Slow Pyrolysis Process and Effects of Parameters. *SSRN Electronic Journal*, 0–14. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4093732>
- Tang, Y., Huang, Q., Sun, K., Chi, Y., & Yan, J. (2018). Co-pyrolysis characteristics and kinetic analysis of organic food waste and plastic. *Bioresource Technology*, 249, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.210>
- Tanoh, T. S., Ait Oumeziane, A., Lemonon, J., Escudero Sanz, F. J., & Salvador, S. (2020). Green Waste/Wood Pellet Pyrolysis in a Pilot-Scale Rotary Kiln: Effect of Temperature on Product Distribution and Characteristics. *Energy and Fuels*, 34(3), 3336–3345. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b04365>
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews*, 55, 467–481.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Uddin, M. N., Daud, W. M. A. W., & Abbas, H. F. (2014). Effects of pyrolysis parameters on hydrogen formations from biomass : a review. *The Royal Society of Chemistry*, 4, 10467–10490. <https://doi.org/10.1039/c3ra43972k>
- Wairata, J., Mastjeh, S., & Haryadi, W. (2013). Isolasi dan Identifikasi Senyawa Terpena Hasil Pirolisis Getah Karet Alam (Hevea Brasiliensis). *Bimipa*, 23(2), 124–131.
- Wangsa, W., Prastyo, P., & Sumbogo, D. (2020). Konversi Limbah Sarung Tangan Lateks Laboratorium Menjadi Bahan Bakar Cair dan Pemurniannya. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 2(2), 64–72. <https://doi.org/10.14710/jplp.2.2.64-72>
- WHO. (2022). *WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard*. WHO Health Emergency. Diakses pada 19 Agustus 2022 dari <https://covid19.who.int/>
- Wijayanti, W., Musyaroh, M., & Sasongko, M. N. (2022). Low-Density Polyethylene Plastic Waste to Liquid Fuel Using Pyrolysis Method: An Effect of Temperatures on the Oil Yields Physicochemical Properties. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10(3), 1–18. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0402>
- Yuan, H., Fan, H., Shan, R., He, M., Gu, J., & Chen, Y. (2018). Study of synergistic effects during co-pyrolysis of cellulose and high-density polyethylene at various ratios. *Energy Conversion and Management*, 157(December 2017), 517–526. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.038>
- Zhang, Y., Ji, G., Chen, C., Wang, Y., Wang, W., & Li, A. (2020). Liquid oils produced from pyrolysis of plastic wastes with heat carrier in rotary kiln. *Fuel Processing Technology*, 206(March), 106455. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106455>