

Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Kinetik Rate Dan Volume Tar Pada Limbah Plastik

Dadang Hermawan¹, Andi Hardianto², Purbo Suwandono², Febi Rahmadianto³

¹Teknik Mesin, Universitas Widyagama Malang

²Teknik Industri, Universitas Widyagama Malang

³Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Malang

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh suhu terhadap tar laju kinetik hasil limbah plastik. Proses penelitian dilakukan secara eksperimental dengan suhu 563 K, 623 K, 723 K, 773 K, 873K, 973 K dan 1073 K. Proses pirolisis dilakukan selama 2 jam dengan ukuran partikel plastik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju kinetik meningkat dengan meningkatnya suhu. Nilai laju kinetik tertinggi dicapai pada 1073 K, dengan nilai laju kinetik adalah $k = 23,60695 \text{ min}^{-1}$. Persamaan laju kinetik yang dilakukan dalam makalah ini adalah $k = 185,49 e^{-2779 / T}$. Dengan membalikkan persamaan laju kinetik menjadi volume, nilai laju kinetik makalah ini akurat.

Kata Kunci : pyrolysis, temperature, kinetic rate, plastic wastes

PENDAHULUAN

Salah satu cara untuk mendaur ulang sampah plastik sehingga memperoleh nilai guna yang lebih tinggi adalah dengan proses pirolisis. Pirolisis merupakan proses dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa melibatkan oksigen, untuk mendapatkan molekul yang lebih kecil dan ringan. Pada temperatur diatas 200°C, ikatan hidrokarbon akan terdegradasi dan akan terbentuk gas, cairan (tar) dan padatan (char) sebagai hasil utamanya, dimana semua komponen tersebut mampu terbakar (Basu, 2010).

Banyak penelitian yang telah dilakukan dalam bidang penelitian pirolisis tar. Mustofa, D. (2014). Pirolisis sampah plastik hingga suhu 900°C sebagai upaya menghasilkan bahan bakar ramah lingkungan. Salah satu alternatif penanganan sampah plastik yang saat ini banyak diteliti dan dikembangkan adalah mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh bahan bakar cair dari pirolisis sampah plastik yang aman bagi manusia dan lingkungan, dengan nilai kalor dan mutu bahan bakar minyak yang sesuai standar. Metode yang digunakan adalah pirolisis sampah plastik pada suhu 900°C, lalu uap yang dihasilkan dikondensasi melalui crossflow kondensor. Metode ini menghasilkan bahan bakar cair dengan nilai kalor 46.848 J/g yang lebih besar dari pada pengolahan sampah plastik ada suhu 425°C yang hanya 41.870 J/g, disamping itu sifat lebih aman dari pengolahan sampah plastik pada suhu 425°C karena kadar senyawa yang berpotensi bersifat karsinogenik (asam borat dan siklopentanon) berkurang persentasenya.

Desai, Sudhir. B. (2015). Production and Analysis of Pyrolysis oil from waste plastik in

Kolhapur city. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui produksi minyak dari hasil pirolisis. Pada penelitian ini digunakan sampah plastik dengan berat 150 gram dengan temperature pirolisis sebesar 300-350°C dengan parameter lainnya sama. Pada proses pirolisis akan didapatkan tar, char dan gas. Hasil dari penelitian ini adalah pada hasil pirolisis yang berupa tar (oil) hampir sama dengan komposisi dari bahan bakar diesel yang mana bahan bakar hasil pirolisis ini dapat digunakan pada mesin-mesin kompresi atau mesin diesel.

Produk hasil pirolisis yang biasa disebut dengan Tar, bio-oil atau biocrude adalah suatu cairan hitam kecoklatan yang terdiri dari 20% air. Tar ini mengandung banyak senyawa phenolic. Tar adalah campuran dari rantai hidrokarbon dengan kandungan oksigen dan air yang cukup banyak. Biomassa yang sebelum proses pirolisis memiliki LHV sekitar 19.5 sampai 21MJ/kg dalam keadaan kering, Tar yang dihasilkan memiliki LHV yang lebih kecil yaitu dalam rentang 13 sampai 18 MJ/kg.

Tar diproduksi dari depolimerisasi dan dekomposisi dari selulosa, hemiselulosa dan lignin dari biomassa secara cepat dan serentak. Pada pengoperasian pirolisis secara umum, biomassa dikenakan peningkatan temperatur secara cepat yang kemudian dilakukan pendinginan secara cepat. Pendinginan secara cepat sangat penting, untuk mencegah penurunan, pemecahan atau reaksi dengan molekul yang lain. Tar adalah mikro emulsi dimana fase berupa cairan yang didapat dari dekomposisi selulosa, hemiselulosa dan sedikit dekomposisi lignin. Tar biasanya merupakan pecahan dari selulosa, hemiselulosa dan polimer lignin yang telah keluar dari lingkungan proses pirolisis.

Untuk mengetahui laju pembentukan tar maka dapat digunakan teori kinetik. Model untuk proses fenomena devotalisasi dapat dituliskan sebagai berikut:



Dimana volatile adalah total dari gas dan tar dan k didefinisikan sebagai rate konstan dari reaksi dimana temperatur dapat dituliskan berdasarkan persamaan Arrhenius:

$$k = Ae^{(-Ea/RT)}$$

Dimana:

- Ea = energi aktivasi (kJ/mol)
- T = absolute temperatur (K)
- R = gas konstan (8,314 J/Kmol)
- A = pre exponensial faktor (1/min)

Laju perubahan dari solid ke tar dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha)$$

Dimana α , t, k(T), f(α) adalah derajat konversi dari proses, waktu, laju reaksi konstan dan pemodelan dari reaksi. Secara umum α adalah bentuk penambahan tar dan dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{dv}{dt} = k.f\left(\frac{V - V_{\sim}}{V_0 - V_{\sim}}\right)$$

Dimana:

- dv = perubahan volume dalam interval tertentu
- dt = selang waktu pengambilan data
- V = volume pada waktu tertentu
- V₀ = Volume awal
- V_~ = Volume akhir

Persamaan dasar untuk menghitung parameter kinetik secara analitis.

$$k = \frac{A}{\beta} \cdot e^{-Ea/RT}$$

Persamaan di atas dirubah ke bentuk logaritma karena adanya persamaan eksponensial, untuk menghilangkan nilai eksponensial, semua ruas dikalikan dengan ln, sehingga menjadi persamaan garis lurus untuk mendapatkan nilai energi aktivasi dan pre-exponential factor, dimana plot untuk sumbu x adalah 1/T dan untuk sumbu y adalah ln k.

$$\ln k = \frac{-Ea}{R} \frac{1}{T} + \ln A$$

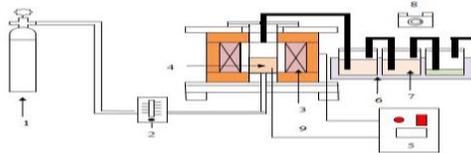
$$\downarrow \qquad \downarrow \downarrow \downarrow$$

$$y = a x + c$$

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah temperatur pemanasan pada saat proses pirolisis yaitu 250°C, 350°C, 450°C, 500°C,

600°C, 700°C dan 800°C dengan variabel terikat yang diamati adalah volume dari tar yang terbentuk dan menghitung kinetic rate dari tar yang terbentuk dengan waktu penelitian selama 2 jam dan massa limbah plastik sebesar 100 gram.



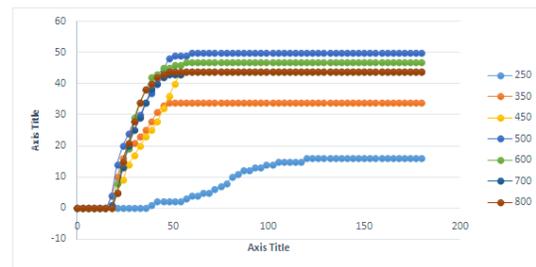
Penjelasan instalasi pirolisis gambar:

1. Tabung nitrogen
2. Flowmeter untuk mengatur masuknya nitrogen
3. Heater
4. Tempat biomassa / furnace
5. Thermo controller atau panel untuk mengatur temperatur piroliser
6. Es batu untuk pendinginan supaya terjadi kondensasi
7. Tar yang terbentuk dari proses kondensasi
8. Kamera untuk meneliti volume yang terbentuk
9. Thermocouple

Cara pengambilan data penelitian yaitu pertama membersihkan limbah plastik dari kotoran yang menempel kemudian memotong limbah plastik dengan ukuran seragam sebesar 1 cm². Mengambil 100 gram limbah plastik untuk proses pengeringan dengan dimasukkan ke dalam oven yang bertemperatur 100°C dan diholding selama satu jam, selanjutnya limbah plastik dimasukkan kedalam piroliser. Katup nitrogen dibuka untuk mengalirkan nitrogen kedalam ruang pemanas piroliser selama lima menit dengan flow rate tiga liter per menit. Kemudian katup nitrogen ditutup dan selanjutnya menyeting temperature sesuai variabel penelitian pada temperatur control lalu

heater pada piroliser dihidupkan selama dua jam. Selama proses pirolisis berlangsung selama dua jam, mengamati volume tar yang terjadi rate dengan cara merekam dengan kamera digital selanjutnya menghitung kinetik rate dari limbah plastik berdasarkan hasil penelitian.

Hasil dan Pembahasan



Gambar 1. Grafik Pengaruh Volume Tar terhadap Waktu dengan Variasi Temperatur

Dari tabel dan gambar di atas dapat dilihat bahwa seiring dengan peningkatan temperatur maka volume tar yang terbentuk juga semakin banyak. Pada temperatur 250°C volume akhir tar (pada grafik warna biru muda) yang diperoleh sebesar 16 ml yang terjadi pada menit 120 dan sampai menit 180 tidak terjadi penambahan volume tar, hal ini dikarenakan kurangnya energi yang diperlukan untuk terjadi proses dekomposisi pada plastik.

Pada temperatur 350°C volume akhir tar (pada grafik warna orange) naik secara signifikan dari sebelumnya pada temperatur 250°C sebesar 16 ml naik menjadi 34 ml. Pada temperatur 350°C ini volume akhir sebesar 34 ml terjadi pada menit ke 48 dan hingga menit 180 tidak terjadi penambahan volume tar lagi,

hal ini dikarenakan energi minimum untuk melakukan proses pirolisis sudah dipenuhi tetapi belum cukup untuk menghasilkan tar yang lebih banyak lagi.

Pada temperatur 450°C volume akhir tar (pada grafik warna kuning) naik dari sebelumnya pada temperatur 400°C sebesar 38 ml naik menjadi 44 ml. Pada temperatur 450°C ini volume akhir sebesar 44 ml terjadi pada menit ke 57 dan hingga menit 180 tidak terjadi penambahan volume tar lagi, hal ini dikarenakan energi panas yang dibutuhkan untuk melakukan dekomposisi pada plastik sudah cukup besar sehingga mampu menghasilkan tar lebih banyak.

Pada temperatur 500°C volume akhir tar (pada grafik biru laut) naik dari sebelumnya pada temperatur 450°C sebesar 44 ml naik menjadi 50 ml. Pada temperatur 500°C ini volume akhir sebesar 50 ml terjadi pada menit ke 60 dan hingga menit 180 tidak terjadi penambahan volume tar lagi. Pada temperatur 500°C ini adalah temperatur yang paling untuk optimal untuk menghasilkan tar karena pada temperatur 500°C adalah temperatur transisi dimana mulai terbentuk gas tak terkondensasi.

Pada temperatur 600°C volume akhir tar (pada grafik hijau) turun dari sebelumnya pada temperatur 500°C sebesar 50 ml turun menjadi 47 ml. Pada temperatur 600°C ini volume akhir sebesar 47 ml terjadi pada menit ke 57 dan hingga menit 180 tidak terjadi penambahan volume tar lagi. Pada temperatur 600°C ini tar yang terbentuk akan menurun dikarenakan adanya reaksi sekunder, yaitu pemecahan tar menjadi tar sekunder dan gas primer. Tar yang terbentuk dalam piroliser karena temperatur yang tinggi akan menurun karena sebagian tar akan terdekomposisi menjadi gas.

Pada temperatur 700°C (pada grafik warna biru tua) dan 800°C (warna coklat) volume

akhir tar yang terbentuk relatif sama yaitu 44 ml dimana pada temperatur 700°C terjadi pada menit 57 dan temperatur 800°C terjadi pada menit 48, hasil volume tar pada temperatur tinggi ini berkurang dikarenakan adanya reaksi sekunder, yaitu pemecahan tar menjadi tar sekunder dan gas primer. Tar yang terbentuk dalam piroliser karena temperatur yang tinggi akan menurun karena sebagian tar akan terdekomposisi menjadi gas.

Kinetik Rate

Dari data volume dan temperatur bisa didapatkan suatu persamaan kinetik rate atau laju reaksi. Ambil contoh data pada menit 102 dan 105 pada temperatur 250°C. Didapatkan volume tar pada menit 102 sebesar 14 ml dan pada menit 105 sebesar 15 ml. Maka dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{dv}{dt} = k \cdot f \left(\frac{V - V_{\infty}}{V_0 - V_{\infty}} \right)$$

Dimana:

dv = perubahan volume dalam interval tertentu

dt = selang waktu pengambilan data

V = Volume pada waktu tertentu

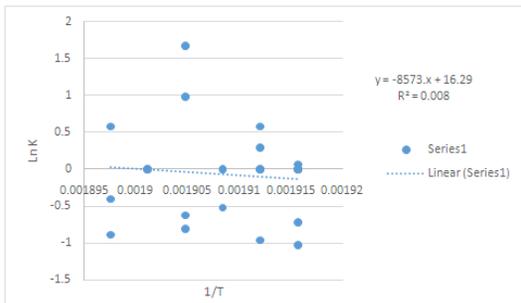
V₀ = Volume awal

V_∞ = Volume akhir

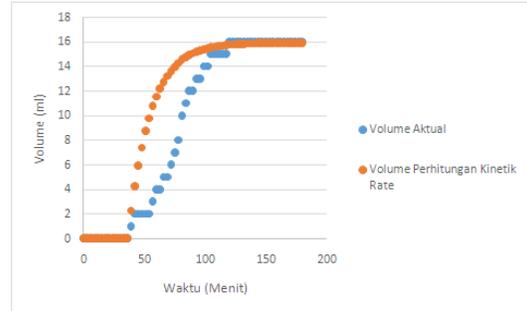
$$\frac{15 - 14}{3} = k \left(\frac{15 - 16}{0 - 16} \right), k = 5,33$$

Diatas contoh untuk mendapatkan nilai k pada perbedaan menit 102 ke 105, karena penelitian dilakukan selama 3 jam, maka perlu dicari nilai k dengan cara yang sama untuk menit 0 sampai menit 120. Setelah didapatkan semua nilai k maka perlu dicari nilai dari ln k yang nantinya dibuat grafik dimana ln k berada pada sumbu y dan 1/T pada sumbu x. Cara ini juga dilakukan untuk variasi temperatur yang lain.

$A/\beta = 11947110.41$ menit⁻¹ dimana nilai ini adalah nilai dari eksponensial faktor, yaitu nilai yang menyatakan seberapa sering terjadi tumbukan pada suatu molekul tiap menit. Sehingga bisa dibentuk suatu persamaan kinetik rate untuk temperatur 250°C adalah: $k = 11947110 e^{-8573/T}$.



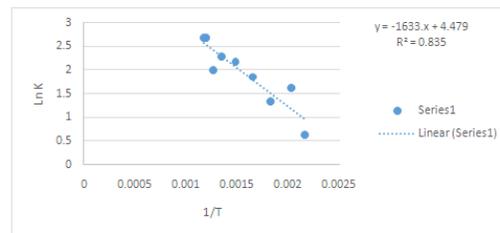
Gambar 2 Grafik Hubungan antara ln K dengan 1/T pada Temperatur 250°C



Gambar 3 Grafik Hubungan antara Volume Aktual dan Volume Perhitungan terhadap Waktu pada Temperatur 250°C

Dari persamaan $y = -8573.1x + 16.296$ di atas kita dapat menentukan persamaan kinetik rate tar dan juga beberapa konstanta lain seperti eksponensial faktor dan energi aktivasi (E_a). Energi aktivasi didapatkan dengan persamaan $-8732.1 \times 8.314 = -71276.8$ (kJ/mol), dimana 8.314 J/molK adalah konstanta gas universal. Untuk menentukan pre eksponensial dipengaruhi oleh heating rate dimana heating rate atau laju pemanasan dan penelitian ini adalah $673\text{K}/60\text{Menit}$ sehingga β (laju pemanasan per menit adalah) 11.21667 (K/min). Persamaan ini berbentuk eksponensial sehingga harus dicari nilai dari $\ln \beta = 2.4174$. Nilai $\ln A = \ln \beta + 16.296 = 18.713$. Setelah didapatkan nilai $\ln A = 18.713$ didapatkan nilai $A = e^{18.713} = 1.34E+08$.

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa volume hitung sudah mendekati dengan volume aktual, adanya perbedaan di atas dikarenakan kurangnya energi aktivasi yang dibutuhkan untuk melakukan proses dekomposisi sehingga terjadi celah dan volume aktual dan volume hitung tidak dapat menutup dengan sempurna. Jumlah tar yang terlalu kecil juga menyebabkan data yang terbentuk kurang baik.

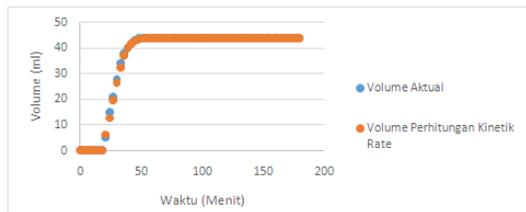


Gambar 4 Grafik Hubungan antara ln K dengan 1/T pada Temperatur 800°C

Dari persamaan $y = -1633.2 + 4.4793x$ di atas kita dapat menentukan persamaan kinetik rate dan juga beberapa konstanta lain seperti eksponensial faktor dan energi aktivasi (E_a). Energi aktivasi didapatkan dengan persamaan $-2657.3 \times 8.314 = -13578.42$ (kJ/mol), dimana 8.314 J/molK adalah konstanta gas universal. Untuk menentukan pre eksponensial dipengaruhi oleh heating rate dimana heating rate atau laju pemanasan dan penelitian ini adalah $673\text{K}/60\text{Menit}$ sehingga β (laju pemanasan per menit adalah) 11.21667 (K/min). Persamaan ini berbentuk eksponensial sehingga harus dicari nilai dari $\ln \beta = 2.4174$. Nilai $\ln A = \ln \beta + 4.4793 = 6.8967$ Setelah didapatkan nilai $\ln A = 6.8967$ didapatkan nilai $A = e^{6.8967} = 989.006$

$A/\beta = 88.17293$ menit-1 dimana nilai ini adalah nilai dari eksponensial faktor, yaitu nilai yang menyatakan seberapa sering terjadi tumbukan pada suatu molekul tiap menit. Sehingga bisa dibentuk suatu persamaan kinetik rate untuk temperatur 350°C adalah: $k = 88.17293 e^{-1633.2/T}$

Untuk melakukan koreksi terhadap hasil kinetik rate yang sudah didapatkan betul atau salah, maka hasil dari kinetik rate dikembalikan ke bentuk volume untuk mengetahui seberapa akurat hasil kinetik rate yang sudah didapatkan.



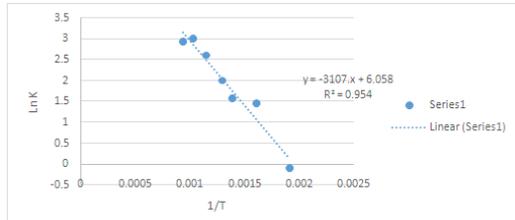
Gambar 5 Grafik Hubungan antara Volume Aktual dan Volume Perhitungan terhadap Waktu pada Temperatur 800°C

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa volume perhitungan yang didapatkan dari kinetik rate sudah berhimpit mendekati volume aktual, yang berarti bahwa proses perhitungan kinetik rate sudah mendekati akurat.

Di atas adalah 2 contoh perhitungan untuk mendapatkan persamaan kinetik pada temperatur 250°C dan 800°C . Untuk menghitung kinetik rate dari variasi temperatur perlu dibuat kinetik rate total dengan membuat plot sumbu x $1/T$ dan sumbu y $\ln K$. Dimana kinetik rate total ini untuk mengetahui tren kinetik rate pada variasi temperatur dengan lebih baik.

Temperatur (K)	1/T	ln k
523	0.001912	-0.09597
623	0.001605	1.465095
723	0.001383	1.573943
773	0.001294	1.999929
873	0.001145	2.61086
973	0.001028	3.013062
1073	0.000932	2.938759

Tabel 1. Hubungan 1/T dan ln K pada tiap variasi Temperatur



Gambar 6 Kinetik Rate Total dari Variasi Temperatur

Dari persamaan $y = -3107.9 + 6.058$ di atas kita dapat menentukan persamaan kinetik rate tar dan juga beberapa konstanta lain seperti eksponensial faktor dan energi aktivasi (E_a). Energi aktivasi didapatkan dengan persamaan $-3107.9 \times 8.314 = -25839.0806$ (kJ/mol), dimana 8.314 J/molK adalah konstanta gas universal. Untuk menentukan pre eksponensial dipengaruhi oleh heating rate dimana heating rate atau laju pemanasan dan penelitian ini adalah 673K/60 Menit sehingga β (laju pemanasan per menit adalah) 11.21667 (K/min). Persamaan ini berbentuk eksponensial sehingga harus dicari nilai dari $\ln \beta = 2.4174$. Nilai $\ln A = \ln \beta + 6.6058 = 8.475400767$ Setelah didapatkan nilai $\ln A = 8.475400767$ didapatkan nilai $A = e^{6.6058} = 427.5195422$ (min⁻¹)

T (Celsius)	T (Kelvin)	A/ β	e	E_a/R	$(E_a/R)/T$	$e^{-(E_a/R)/T}$	K (Menit ⁻¹)
250	523	427.5195	2.718282	-3107.9	-5.94245	0.002626	1.122493
350	623	427.5195	2.718282	-3107.9	-4.9886	0.006815	2.91362
450	723	427.5195	2.718282	-3107.9	-4.29862	0.013587	5.808851
500	773	427.5195	2.718282	-3107.9	-4.02057	0.017943	7.670874
600	873	427.5195	2.718282	-3107.9	-3.56002	0.028438	12.15787
700	973	427.5195	2.718282	-3107.9	-3.19414	0.041002	17.52902
800	1073	427.5195	2.718282	-3107.9	-2.89646	0.055218	23.60695

Tabel 2. Hasil Kinetik Rate Total pada Tiap Variasi Temperatur

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa nilai dari kinetik rate terus bertambah cepat sesuai

dengan bertambahnya temperatur, hal ini dikarenakan energi yang diberikan dalam piroliser juga terus bertambah.

Kesimpulan:

1. Semakin tinggi temperatur pemanasan, maka kinetik rate yang terjadi pada dekomposisi sampah plastik juga akan semakin cepat.
2. Semakin tinggi temperatur pemanasan, maka volume tar juga akan semakin bertambah tetapi pada suhu tinggi hasil volume tar pada temperatur tinggi ini berkurang dikarenakan adanya reaksi sekunder, yaitu pemecahan tar menjadi tar sekunder dan gas primer.

DAFTAR PUSTAKA

Babu, B.V., Chaurasia, A.S., 2004b. *Pyrolysis of biomass: improved models for simultaneous kinetics and transport of heat, mass and momentum*. Energy Conversion and Management 45 (9–10), 1297–1327.

Basu, Prabir. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Elsevier.

Bridgwater, A.V., 1999. *Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids*. Journal of Analytical and Applied Physics 51 (1–2), 3–22.

Desai, Sudhir. 2015. *Production and Analysis of Pyrolysis Oil from Waste Plastic in Kolhipur City*. International Journal of Engineering Research and General Science Volume 3, Issue 1, January-Februari 2015. ISSN 2091-2730.

- Dody, Chandra., et., al. 2015. *Pengaruh Penggunaan Katalis (Zeolit) Terhadap Kinetic Rate Tar Hasil Pirolisis Serbuk Kayu Mahoni (Switenia Macrophylla)*. Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 6. No.1. Tahun 2015:19-25.
- Fatimah, Is. 2013. Kinetika Kimia. Edisi pertama, penerbit Graha Ilmu. ISBN : 978-979-756-919-8
- F. Rahmadianto, 2018. Analisa Putaran Spindle dan Kedalaman Potong Terhadap Keausan Pahat Positive dan Negative Rhombic Insert, Institut Teknologi Nasional, Malang.
- F. Rahmadianto, 2014. Upaya Peningkatan Sifat Mekanik Baja Mild Steel Melalui Perbaikan Kualitas dengan Heat Treatment Annealing dan Holding Time pada Heat Treatment dengan Taguchi Method, Universitas Brawijaya, Malang
- Mustofa, D. 2015. *Pirolisis Sampah Plastik Hingga Suhu 900°C Sebagai Upaya Menghasilkan Bahan Bakar Ramah Lingkungan*. Simposium Nasional RAPI XIII. ISSN 1412-9612
- Saptoadi, Harwin., et., al. 2015. *Utilization of Plastics Waste Oil as Partial Substitute for Kerosene in Pressurized Cookstoves*. International Journal of Environmental Science and Development , Vol 6, No.5 May 2015.