

B161 - KONVERSI GLISEROL MENJADI BIOADITIF MENGGUNAKAN KATALIS *ION EXCHANGER*

Indrihapsari¹, Hary Sulistyo², Budhijanto²

¹Prodi Pascasarjana, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM Yogyakarta 55281 Telp. 0274 555320

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM Yogyakarta 55281 Telp. 0274 555320

Email: indrihapsari.2705@gmail.com

Abstrak

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang diperoleh melalui reaksi transesterifikasi trigliserida dalam minyak nabati dengan alkohol. Reaksi transesterifikasi menghasilkan metil ester sebagai produk utama dan gliserol sebagai produk samping. Industri biodiesel yang pesat akan mengakibatkan kelimpahan gliserol. Untuk mengurangi kelimpahan ini, gliserol dapat dimanfaatkan melalui konversi gliserol menjadi produk turunan melalui reaksi kimia katalisis. Salah satu produk turunan gliserol adalah bioaditif pada bensin, yaitu senyawa solketal. Konversi gliserol menjadi bioaditif dilakukan melalui reaksi asetalisasi gliserol dengan aseton menggunakan katalis ion exchanger. Salah satu katalis ion exchanger yang mudah didapatkan dan paling baik untuk reaksi heterogen adalah Amberlyst-15. Pengaruh suhu reaksi, perbandingan reaktan (gliserol dan aseton) dan jumlah katalis (% dari massa gliserol) yang digunakan dalam reaksi asetalisasi ini dipelajari agar diperoleh proses konversi gliserol yang optimum. Kondisi terbaik untuk konversi gliserol menjadi bioaditif menggunakan katalis ion exchanger adalah suhu reaksi 60 °C, perbandingan reaktan 1:3 dan jumlah katalis sebesar 3 %. Konversi gliserol yang diperoleh sebesar 73,15 % dalam waktu reaksi selama 3 jam.

Kata kunci: *asetalisasi; aseton; bioaditif; gliserol; katalis; solketal*

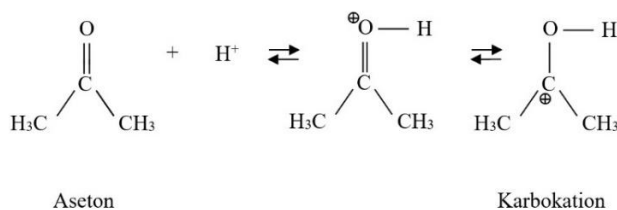
Pendahuluan

Indonesia memiliki potensi alam yang besar, salah satunya adalah sumber minyak nabati. Minyak nabati dapat diperoleh dari tanaman kelapa, jarak, sawit, jagung, biji kapas dan sebagainya. Sumber minyak nabati yang berlimpah ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk industri biodiesel. Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang diperoleh melalui reaksi transesterifikasi trigliserida dalam minyak nabati dengan alkohol. Reaksi tersebut menghasilkan metil ester dan gliserol. Metil ester digunakan sebagai biodiesel, sedangkan gliserol merupakan produk samping. Gliserol yang dihasilkan sebesar 10 % dari setiap jumlah biodiesel yang diproduksi (Nanda dkk, 2016). Gliserol merupakan senyawa poliol yang mana memiliki tiga buah gugus hidroksil, berbentuk cairan kental, sifatnya polar, larut dalam bahan organik maupun anorganik, dan memiliki titik didih 290 °C. Pertumbuhan industri biodiesel yang pesat akan menyebabkan jumlah produk samping gliserol berlimpah. Namun harga jual gliserol di pasaran sangat rendah, sedangkan kelimpahan gliserol akan membuat masalah baru bagi lingkungan. Pemanfaatan gliserol menjadi hal yang sangat penting untuk mengatasi masalah tersebut. Salah satu bentuk pemanfaatan gliserol adalah proses konversi gliserol menjadi produk turunan melalui reaksi kimia katalisis. Salah satu produk turunan gliserol yang menjanjikan adalah bioaditif untuk bahan bakar minyak (bensin), yaitu senyawa solketal.

Solketal merupakan senyawa kimia dalam bentuk cairan tidak berwarna, berminyak, tidak berbau, memiliki titik didih 188-189 °C dan dapat larut dalam air dan pelarut organik seperti alkohol dan eter. Solketal sebagai bioaditif pada bahan bakar minyak (bensin) memiliki kegunaan untuk mengurangi emisi partikular dan meningkatkan sifat aliran dingin pada transportasi cair bahan bakar. Selain itu bioaditif ini membantu mengurangi pembentukan *gum* (getah minyak), meningkatkan stabilitas oksidasi dan meningkatkan nilai oktan sampai dengan 2,5 point sehingga proses *ignition* menjadi lebih cepat (Manjunathan dkk, 2014; Nanda dkk, 2016). Solketal juga lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan aditif lainnya, yaitu metil tertier butil eter (MTBE) (Nanda dkk, 2014). Solketal juga tidak hanya berguna sebagai bioaditif saja. Dalam industri polimer, solketal digunakan sebagai pelarut dan *plasticizer*. Dalam industri farmasi, solketal juga berfungsi sebagai pelarut dan *suspending agent*. (Nanda dkk, 2016).

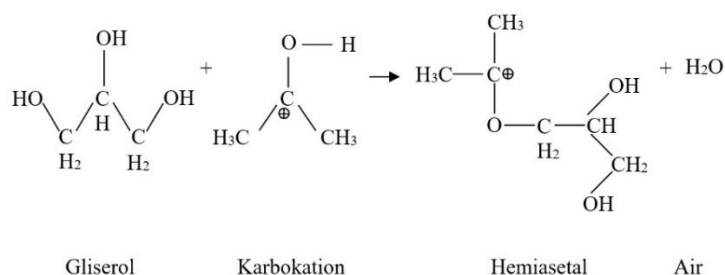
Konversi gliserol menjadi bioaditif dilakukan melalui reaksi asetalisasi gliserol dengan senyawa karbonil. Salah satu senyawa karbonil yang dapat digunakan adalah aseton. Katalis berbasis asam ditambahkan dalam reaksi untuk mempercepat konversi gliserol menjadi bioaditif. Mekanisme reaksi pembentukan solketal diawali dengan pembentukan senyawa karbon karbonil bermuatan positif atau karbokation. Karbokation ini terbentuk adanya proses

interaksi kuat antar atom oksigen dari aseton dengan situs aktif asam pada katalis. Reaksi pembentukan karbokation ini dapat dilihat pada Gambar 1.



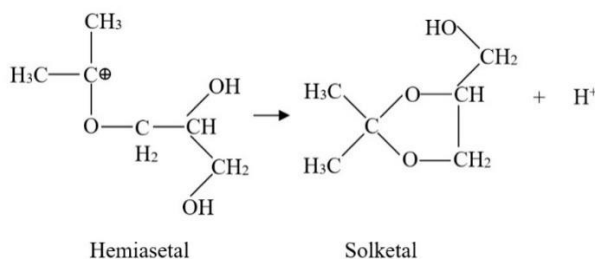
Gambar 1. Pembentukan karbokation

Karbokation yang terbentuk akan segera diserang oleh kelompok -OH dari gliserol dan terbentuk senyawa hemiasetal dan sejumlah air. Reaksi pembentukan senyawa hemiasetal dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pembentukan senyawa hemiasetal

Tahap akhir dari mekanisme reaksi asetalisasi ini adalah proses siklisasi senyawa hemiasetal. Siklisasi dilakukan oleh serangan dari pasangan elektron yang ada pada gugus hidroksil yang berdekatan dengan atom karbon tersier, sehingga mengarah pada pembentukan solketal. Proses siklisasi hemiasetal dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses siklisasi senyawa hemiasetal

Untuk memperoleh konversi reaktan yang optimum, maka interaksi antar molekul dalam reaktan harus ditingkatkan sehingga proses pembentukan produk menjadi maksimal. Usaha-usaha untuk meningkatkan interaksi antar molekul dalam reaktan dapat dilakukan dengan jalan, yaitu meningkatkan suhu, memperbesar perbandingan reaktan, memperbesar konsentrasi atau jumlah katalis yang digunakan dalam reaksi (Nuryoto dkk, 2016).

Peningkatan suhu akan menyebabkan energi kinetik pada molekul-molekul reaktan meningkat hingga energi aktivasi terlampaui. Reaksi dapat berlangsung apabila energi aktivasi tercapai, sehingga dengan kata lain peningkatan suhu reaksi dapat mempercepat proses konversi gliserol menjadi senyawa bioaditif solketal. Reaksi asetalisasi gliserol dengan aseton menggunakan katalis asam padat akan aktif berkerja pada suhu diatas 65 °C (Manjunathan dkk, 2014). Penggunaan katalis *ion exchanger* untuk konversi gliserol menjadi bioaditif akan aktif berkerja pada suhu reaksi lebih dari 40 °C (da Silva dkk, 2017). Kegagalan reaksi asetalisasi gliserol dengan aseton dapat terjadi apabila suhu reaksi diatas 70 °C dan menyebabkan penurunan proses konversi gliserol (Nuryoto dkk, 2016).

Banyaknya jumlah zat yang digunakan pada reaksi dinyatakan dalam besaran konsentrasi. Konsentrasi yang diperbesar dalam reaksi dengan menambahkan jumlah reaktan akan mempengaruhi proses tumbukan antar molekul-molekul reaktan. Semakin besar konsentrasi reaktan, maka semakin besar molekul-molekul reaktan yang bertumbukan dan membentuk senyawa baru sehingga konversi reaktan semakin optimum. Dalam konversi gliserol menjadi senyawa bioaditif ini untuk memperbesar konsentrasi dilakukan dengan cara menambahkan aseton secara berlebihan.

Katalis berbasis asam ditambahkan dalam reaksi asetalisasi gliserol dengan aseton untuk mempercepat laju reaksi. Katalis homogen seperti asam sulfat, asam klorida, asam fosfat atau asam p-toluenasulfonat dapat digunakan

untuk reaksi asetalisasi ini. Namun korosifitas dan pemisahan produk dengan katalis menjadi kendala dalam penggunaan katalis homogen. Oleh karenanya penggunaan katalis heterogen lebih disukai dalam reaksi asetalisasi gliserol dengan aseton.

Katalis heterogen seperti katalis asam padat dan katalis *ion exchanger* dapat digunakan untuk reaksi asetalisasi gliserol dengan aseton. Katalis asam padat seperti tungstated ZrO_2 , molybated ZrO_2 , dan sulfated ZrO_2 , digunakan oleh Reddy dkk (2011) untuk proses konversi gliserol menjadi solketal. Konversi gliserol yang diperoleh sebesar 80 %, 88 % dan 98 %. Katalis asam padat lainnya yang dapat digunakan untuk proses konversi gliserol menjadi bioaditif antara lain silika tersulfonasi (Vicente dkk, 2010), TiO_2-SiO_2 (Fan dkk, 2012), karbon aktif yang diimpregnasi menggunakan nikel(II) nitrat heksahidrat ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) dan zirkonium(III) klorida ($ZrCl_3$) (Khayoon dan Hameed, 2013) dan SnF_2 (da Silva dkk, 2016). Namun penggunaan katalis asam padat yang disebutkan memerlukan proses preparasi yang cukup lama dan bahan kimia lain yang cukup mahal. Zeolite juga dapat digunakan sebagai katalis untuk proses konversi gliserol, tetapi zeolite alam memiliki kandungan pengotor yang dapat mengganggu proses konversi. Sedangkan zeolite sintesis seperti zeolite ZSM-5 hanya mampu memberikan konversi gliserol sebesar 20 % saja dalam waktu reaksi 0,6 jam dan zeolite beta memberikan konversi gliserol sebesar 60 % dalam waktu reaksi 1 jam (da Silva dkk, 2009).

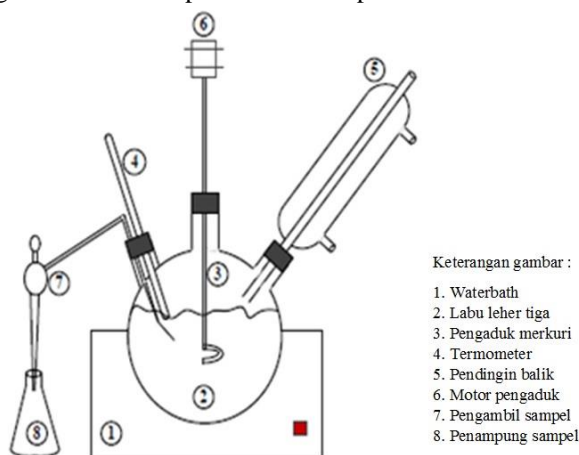
Katalis *ion exchanger* dengan jenis penukar kation lebih mudah ditemukan, berlimpah dan spesifikasinya sudah sesuai standar pabrikasi. Katalis *ion exchanger* seperti Amberlyst-15 merupakan katalis komersial yang murah, mudah didapatkan dan aman bagi lingkungan. Katalis ini memiliki gugus aktif berupa ion H^+ . Situs aktif asam (H^+) pada katalis inilah yang mengawali reaksi asetalisasi gliserol dengan aseton yaitu pembentukan karbokation dari senyawa aseton. Katalis Amberlyst-15 diklaim dapat memberikan konversi gliserol yang paling optimum diantara katalis *ion exchanger* lainnya, yaitu sebesar 95 % dalam waktu reaksi 0,25 jam (Malleham dkk, 2016). Katalis *ion exchanger* lainnya seperti Indion 225 Na hanya dapat memberikan konversi sebesar 51,89 % dalam waktu reaksi 90 menit (Nuryoto dkk, 2016). Sedangkan katalis *ion exchanger* Amberlyst-36 hanya dapat mengkonversi gliserol menjadi bioaditif sebesar 88 % dalam waktu reaksi 8 jam (Malleham dkk, 2016). Oleh karena itu, katalis *ion exchanger* Amberlyst-15 ini sangat tepat digunakan dalam proses konversi gliserol menjadi senyawa bioaditif solketal.

Pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah yaitu diantaranya mekanisme reaksi pada konversi gliserol menjadi senyawa bioaditif solketal, usaha-usaha yang dapat dilakukan untuk memperoleh konversi reaktan yang optimum dan pengaruh usaha tersebut dalam proses konversi gliserol. Dengan berbekal informasi ilmiah ini, diharapkan gliserol sebagai produk samping dari industri biodiesel dapat dimanfaatkan secara maksimal dan untuk proses studi selanjutnya seperti kinetika reaksi.

Metode Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari gliserol ($C_3H_5(OH)_3$) dengan kemurnian 98 % dari PT. Brataco Chemical Yogyakarta, aseton (C_3H_6O) dengan kemurnian 99,5 % dari Merck dan katalis *ion exchanger* Amberlyst-15 yang disuplai dari Sigma-Aldrich.

Penelitian ini dilakukan secara *batch* dalam reaktor dengan kondisi suhu tetap dan tekanan atmosferik. Labu leher tiga berfungsi sebagai reaktor dan dilengkapi dengan pendingin balik, motor pengaduk, pengaduk merkuri, termometer dan *waterbath*. Rangkaian alat untuk penelitian ini dapat dilihat dalam Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian alat penelitian

Prosedur penelitian ini diawali dengan memasukan gliserol dan aseton dengan perbandingan mol tertentu ke dalam reaktor. Motor pengaduk dijalankan dengan kecepatan perputaran sebesar 500 rpm. Pengatur suhu pada *waterbath* diatur agar tercapai suhu reaksi diinginkan. Ketika kedua reaktan telah mencapai homogenitas dan suhu reaksi yang diinginkan, katalis dengan berat tertentu dimasukkan ke dalam reaktor dan dicatat sebagai waktu awal reaksi ($t = 0$). Sampel diambil setelah penambahan katalis dan dianalisis kadar gliserol bebas awal (Gb_0). Waktu reaksi asetalisasi gliserol dan aseton berlangsung selama 3 jam. Setiap 30 menit diambil sampel untuk analisis kadar gliserol bebas per waktu (Gb_n).

Analisis kadar gliserol bebas dilakukan dengan metode titrasi iodometri. Konversi gliserol (X_G) dihitung dengan rumus berikut ini.

$$X_G = \frac{Gb_0 - Gb_n}{Gb_0} \times 100\% \tag{1}$$

Hasil dan Pembahasan

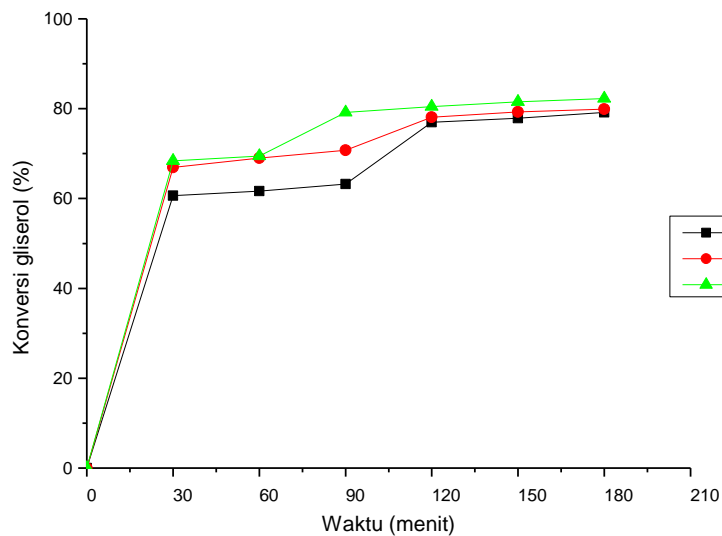
Variabel penelitian berupa suhu reaksi, perbandingan mol reaktan dan jumlah katalis yang ditambahkan dalam reaksi asetalisasi ini diharapkan dapat memberikan konversi gliserol yang optimum, sehingga proses konversi gliserol menjadi bioaditif menjadi efektif dan efisien.

Pengaruh suhu

Suatu reaksi dapat berlangsung apabila energi aktivasi terlampaui dan salah satu parameter yang mempengaruhi energi aktivasi adalah suhu. Semakin besar suhu reaksi yang digunakan, maka semakin kecil energi aktivasinya sehingga reaksi lebih cepat berlangsung dan konversi reaktan menjadi produk lebih cepat juga. Pengaruh suhu terhadap konversi gliserol menjadi senyawa bioaditif solketal dipelajari pada perbandingan mol gliserol-aseton sebesar 1:4 dan jumlah katalis yang digunakan sebesar 3 % (dari massa gliserol). Suhu reaksi yang digunakan dalam konversi gliserol ini divariasikan dari suhu 40 °C, 50 °C dan 60 °C. Hasil pengamatan dapat dilihat pada Tabel 1. dan Gambar 5.

Tabel 1. Data konversi gliserol pada variasi suhu

Waktu (menit)	Konversi gliserol, X_G (%)		
	40 °C	50 °C	60 °C
0	0,00	0,00	0,00
30	60,64	66,93	68,40
60	61,64	68,98	69,44
90	63,23	70,76	79,17
120	76,97	78,13	80,48
150	77,90	79,28	81,52
180	79,16	79,92	82,26



Gambar 5. Pengaruh suhu reaksi terhadap konversi gliserol.

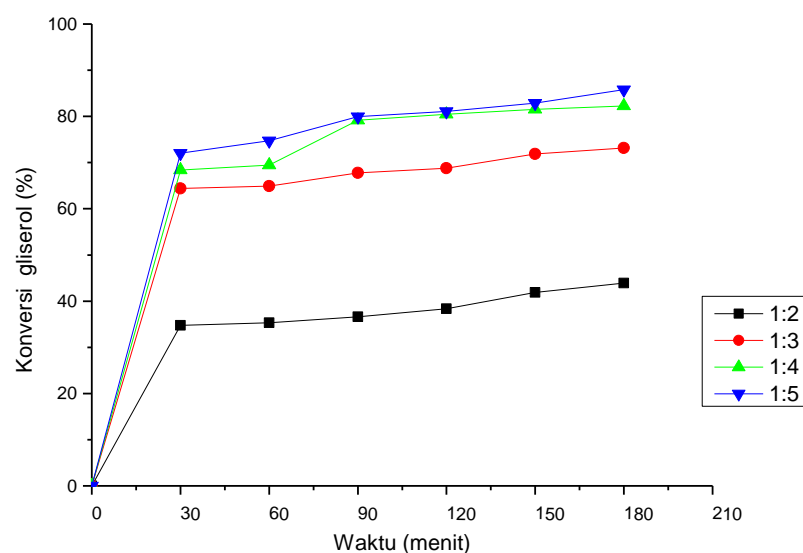
Hasil pengamatan menunjukkan konversi gliserol yang diperoleh cukup tinggi dalam waktu reaksi selama 30 menit untuk ketiga variasi suhu tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa katalis *ion exchanger* telah aktif berkerja dalam kurun waktu tersebut. Pada waktu reaksi 120 menit, konversi gliserol cukup naik secara signifikan pada suhu 40 °C dan 50 °C, yaitu sebesar 76,97 % dan 78,13 %. Kenaikan konversi gliserol pada suhu 40 °C dan 50°C setelah waktu reaksi selama 120 menit tetap terjadi namun tidak terlalu signifikan. Konversi gliserol meningkat sangat signifikan hanya dalam waktu reaksi selama 90 menit untuk suhu reaksi 60 °C, yaitu sebesar 79,17 %. Setelah waktu reaksi 90 menit masih terjadi kenaikan gliserol walaupun tidak terlalu signifikan. Hal ini menunjukkan semakin tinggi suhu reaksi yang digunakan, maka semakin cepat laju reaksi dan proses konversi reaktan menjadi produk. Bahkan setelah waktu reaksi selama 3 jam, suhu reaksi 60 °C memberikan konversi gliserol tertinggi dibandingkan suhu reaksi 40 °C dan 50 °C. Hal serupa diperoleh Ilgen dkk (2016) yang mana melakukan variasi suhu 20 °C, 35 °C dan 60 °C untuk konversi gliserol menjadi bioaditif menggunakan katalis *ion exchanger* dengan jenis Amberlyst-46. Hasil pengamatan menunjukkan yield bioaditif tertinggi diperoleh dengan menggunakan suhu reaksi 60 °C untuk proses konversi gliserol menjadi biaditif, yaitu sebesar 84 %. Oleh karena itu suhu 60 °C merupakan suhu yang optimum untuk proses konversi gliserol menjadi bioaditif menggunakan katalis *ion exchanger*. Suhu reaksi ini digunakan untuk pengamatan selanjutnya.

Pengaruh perbandingan reaktan

Konsentrasi yang besar dalam reaksi akan mengakibatkan jumlah tumbukan antara molekul-molekul reaktan juga besar. Semakin besar molekul-molekul reaktan yang bertumbukan, maka semakin besar laju reaksi dan konversi reaktan lebih cepat. Pengaruh perbandingan reaktan antara gliserol dan aseton terhadap konversi gliserol diamati pada kondisi suhu reaksi 60 °C dan jumlah katalis sebesar 3 % (dari massa gliserol). Perbandingan mol gliserol dan aseton divariasikan dari 1:2 sampai dengan 1:5. Hasil pengamatan pengaruh perbandingan reaktan terhadap konversi gliserol tersaji pada Tabel 2. dan Gambar 6.

Tabel 2. Data konversi gliserol pada variasi perbandingan reaktan

Waktu (menit)	Konversi gliserol, X_G (%)			
	1:2	1:3	1:4	1:5
0	0,00	0,00	0,00	0,00
30	34,76	64,39	68,40	72,03
60	35,31	64,91	69,44	74,75
90	36,63	67,78	79,17	79,93
120	38,36	68,75	80,48	81,07
150	41,91	71,85	81,52	82,89
180	43,92	73,15	82,80	85,80



Gambar 6. Pengaruh perbandingan reaktan terhadap konversi gliserol

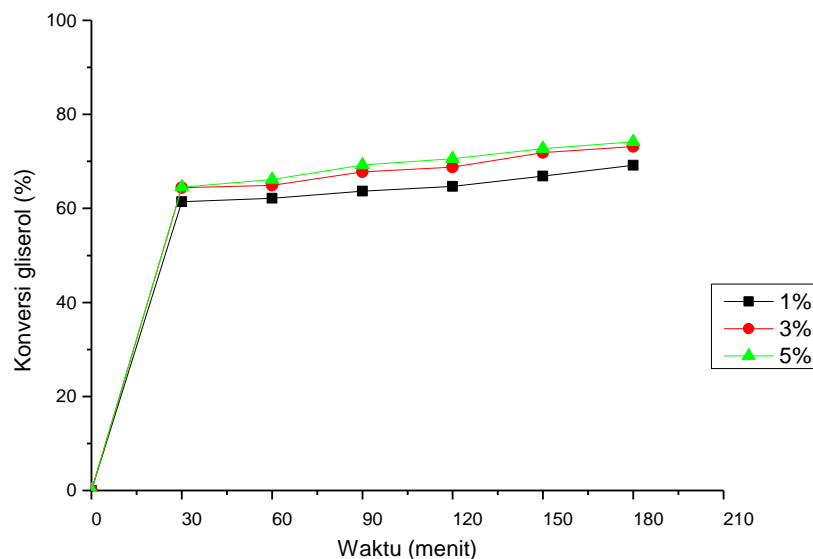
Hasil pengamatan pengaruh perbandingan reaktan terhadap konversi gliserol memperlihatkan konversi gliserol yang meningkat setiap 30 menit dalam waktu reaksi 3 jam. Dari Tabel 2. dan Gambar 6. ditunjukkan bahwa semakin besar perbandingan mol gliserol dan aseton yang digunakan dalam reaksi, semakin besar konversi gliserol yang diperoleh. Konversi gliserol diperoleh sebesar 43,92 % untuk perbandingan reaktan 1:2, 73,15 % untuk perbandingan reaktan 1:3, 82,80 % untuk perbandingan reaktan 1:4, dan konversi tertinggi sebesar 85,80 % untuk perbandingan reaktan 1:5. Hal ini seperti yang dilakukan oleh Ilgen dkk (2016) dimana variasi perbandingan reaktan sebesar 1:1, 1:3, 1:6 dan 1:9 memberikan yield bioaditif solketal yang semakin meningkat. Pada Gambar 6. terlihat bahwa kenaikan konversi gliserol meningkat sangat signifikan pada perbandingan reaktan 1:3. Kenaikan konversi gliserol tetap terjadi dengan menggunakan perbandingan reaktan 1:4 dan 1:5 dalam reaksi namun tidak terlalu signifikan. Oleh karena itu perbandingan mol gliserol dan aseton sebesar 1:3 dianggap sebagai perbandingan reaktan yang optimal dan digunakan untuk mempelajari pengaruh jumlah katalis terhadap konversi gliserol menjadi bioaditif.

Pengaruh jumlah katalis

Katalis merupakan sebuah substansi atau zat yang mempengaruhi laju reaksi tetapi tidak mengalami perubahan oleh reaksi (Fogler, 2006). Katalis bekerja dengan cara menciptakan jalur reaksi dengan energi aktivasi yang lebih rendah, sehingga reaksi dapat berlangsung lebih cepat atau dengan kata lain proses konversi reaktan menjadi produk lebih cepat. Jumlah katalis yang ditambahkan akan mempengaruhi jumlah total luas situs asam aktif yang digunakan dalam reaksi. Semakin besar katalis yang ditambahkan, maka semakin besar jumlah total luas situs asam aktif keseluruhan dan semakin cepat reaktan yang terkonversi menjadi produk. Pengaruh jumlah katalis terhadap konversi gliserol menjadi bioaditif diamati dengan memvariasikan sebesar 1 %, 3 %, dan 5 % dari massa gliserol yang digunakan dalam reaksi. Suhu reaksi 60 °C dan perbandingan reaktan sebesar 1:3 merupakan kondisi optimum dari hasil pengamatan sebelumnya menjadi bekal untuk mengamati pengaruh jumlah katalis yang digunakan dalam konversi gliserol menjadi bioaditif. Hasil pengamatan ini dapat dilihat pada Tabel 3. dan Gambar 7.

Tabel 3. Data konversi gliserol pada variasi jumlah katalis

Waktu (menit)	Konversi gliserol, X_G (%)		
	1 %	3 %	5 %
0	0,00	0,00	0,00
30	61,41	64,39	64,50
60	62,17	64,91	66,15
90	63,68	67,78	69,26
120	64,67	68,75	70,60
150	66,85	71,85	72,71
180	69,14	73,15	74,15



Gambar 7. Pengaruh jumlah katalis yang digunakan terhadap konversi gliserol

Hasil pengamatan menunjukkan pemerolehan konversi gliserol yang cukup besar yaitu 69,16 % dengan menggunakan katalis sebanyak 1% dari massa gliserol. Hal ini menunjukkan katalis *ion exchanger* memiliki unjuk kerja yang sangat baik dalam mengkonversi gliserol menjadi bioaditif. Konversi gliserol meningkat cukup besar pada penggunaan katalis sebesar 3 %, yaitu 73,15 %. Penggunaan katalis yang lebih besar yaitu 5 % tetap memberikan peningkatan konversi gliserol namun tidak terlalu besar dan cenderung sama dengan penggunaan jumlah katalis yang lebih rendah, yaitu sebesar 74,15 %. Oleh karena itu, jumlah katalis sebesar 3 % dapat digunakan untuk proses konversi gliserol menjadi senyawa bioaditif solketal.

Kesimpulan

Hasil penelitian dan pembahasan secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa meningkatnya suhu, perbandingan reaktan yang diperbesar dan memperbesar jumlah katalis yang digunakan dapat mempengaruhi konversi gliserol menjadi senyawa bioaditif solketal. Dari variasi suhu, perbandingan reaktan dan jumlah katalis yang digunakan menghasilkan kondisi terbaik yang memberikan konversi gliserol secara optimum. Kondisi terbaik yang memberikan konversi gliserol optimum adalah suhu reaksi 60 °C, perbandingan mol gliserol dan aseton sebesar 1:3, dan jumlah katalis sebesar 3 % (dari massa gliserol). Konversi gliserol yang diperoleh sebesar 73,15 %.

Daftar Pustaka

- da Silva, C. X. A., Goncalves, V. L. C., Mota, C. J. A. (2009), "Water-tolerant zeolite catalyst for the acetalisation of glycerol". *Green Chemistry*. Vol 11 pp 38-41
- da Silva, M. J., Rodrigues F. A., Julio, A. A. (2017), "SnF₂-catalyst glycerol ketalization : A friendly environmentally process to synthesize solketal at room temperature over on solid and reusable Lewis acid". *Chemical Engineering Journal*. Vol 307 pp 828-835
- Fan, C. N., Xu C. H., Liu, C. Q., Huang, Z. Y., Liu, J. Y., Ye, Z. X. (2012), "Catalytic acetalization of biomass glycerol with acetone over TiO₂-SiO₂ mixed oxides". *Reaction Kinetics*. Vol 107 pp 189-202
- Fogler, H. S. (2006), "*Elements of Chemical Reaction Engineering*". 4th Edition. Pearson Education, Inc. pp 646
- Ilgen, O., Yerlikaya, S., Akyurek, F. O., (2016), "Synthesis of solketal from glycerol and acetone over Amberlyst-46 to produce an oxygenated fuel additive". *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. Paper 8895 (OnlineFirst)
- Khayoon, M. S., Hameed, B. H. (2013), "Solventless axetalization of glycerol with acetone to fuel oxygenated over Ni-Zr supported on mesoporous activated carbon catalyst". *Applied Catalyst A : General*. Vol 464-465 pp 191-199
- Mallesham, B., Rao, B. G., Reddy, B. M. (2016), "Production of biofuel additives by esterification and acetalization of bioglycerol". *Comptes Rendus Chimie*. Vol 19 pp 1194-1202
- Manjunathan, P., Maradur, S. P., Halgeri, A. B., Shanbhag, G. V. (2014), "Room temperature synthesis of solketal from acetalization of glycerol with acetone : Effect of crystallite size and the role of acidity of beta zeolite". *Journal of Molecular Catalysis A : Chemical*. Vol. 396 pp 47-54
- Nanda, M. R., Tuan, Z., Qin W., Ghaziaskar, H. S., Poirier, M., Xu C. (2014), "A new continuous-flow process for catalytic conversion of glycerol to oxygenated fuel additive : Catalyst screening", *Applied Energy*, Vol 123 pp 75-81
- Nanda, M. R., Zhang, Y., Yuan, Z., Qin, W., Ghaziaskar, H. S., Xu C. (2016), Catalytic conversion of glycerol for sustainable production of solketal as a fuel additive : A review", *Renewable and Sustainable energy Reviews*. Vol 56 pp 1022-1031
- Nuryoto, Hary S., Wahyudi, B. S., Indra, P. (2016), "Sintesis bioaditif gasoline melalui ketalisasi gliserol menggunakan katalisator padat". *Jurnal Bahan Alam Terbarukan* 5. Vol 2 pp 74-83
- Reddy, P. S., Sudarsanam, P., Mallesham, B., Raju G., Reddy, B. M. (2011), "Acetalisation of glycerol with acetone over zirconia and promoted zirconia catalyst under mild reaction conditions". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Vol 17 pp 377-381
- Vicente, G., Melero, J. A., Morale, G., Paniagua, M., Martin E. (2010), "Acetalisation of bio-glycerol with acetone to produce solketal over sulfonic mesostructured silicas". *Green Chemistry*. Vol 12 pp 899-907