



Degradasi Lignin dan Selulosa dari Jerami Padi dengan Proses Ozonasi

Emma Savitri^{a†}, Edy Purwanto^a

Limbah jerami padi merupakan produk samping hasil pertanian yang jumlahnya sangat besar dan belum dimanfaatkan secara optimal di Indonesia. Beberapa penelitian telah mempelajari proses degradasi biomassa untuk menjadi bahan yang lebih berguna dengan berbagai metode. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mendegradasi biomassa adalah dengan proses ozonasi karena proses yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mendegradasi kandungan lignin dan selulosa yang terdapat pada jerami padi untuk menghasilkan produk turunan yang memiliki banyak aplikasi dan bernilai ekonomis baik di bidang pangan maupun farmasi. Penelitian dilakukan di dalam reaktor *semi-batch* berpengaduk dengan mencampur jerami padi dan larutan asam dan mengalirkan ozon ke dalam campuran selama waktu dan suhu tertentu dengan proses pengambilan sampel setiap 30 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah lignin menurun dengan semakin lamanya waktu reaksi. Kecenderungan hasil tersebut berkebalikan untuk variabel suhu reaksi. Penurunan suhu reaksi ozonasi justru menurunkan jumlah lignin di jerami padi karena proses degradasi yang semakin baik. Hal yang sama juga dialami oleh selulosa pada jerami padi. Jumlah selulosa menurun dengan lamanya proses ozonasi pada suhu yang rendah. Penurunan jumlah lignin dan selulosa dalam jerami padi optimum terjadi pada suhu ozonasi 20 °C baik untuk pH 4 maupun pH 9. Produk degradasi yang dapat diperoleh dan dianalisa pada proses ozonasi jerami padi antara lain produk glukosa, fruktosa dan sukrosa.

Rice straw waste is an agricultural by-product in large quantities and has not been optimally utilized in Indonesia. Several research has studied the biomass degradation process to produce a more valuable product through various methods. One of the degradation methods that can be used to degrade biomass is the ozonation process because of the environmentally friendly process. This research aims to degrade the lignin and cellulose content in rice straw to produce valuable products that have many applications both in the food and pharmaceutical industries. The research was carried out in a stirred semi-batch reactor by reacting rice straw fiber on the acid solution with ozone during a period of time and a certain temperature. The results showed that the amount of lignin and cellulose decreased in line with prolonged time. The decrease in ozonation temperature was also reducing the amount of lignin and cellulose in rice straw because of the better degradation process. The decrease in lignin and cellulose content was achieved at 20 °C for both pH 4 and pH 9 of the system. The degradation products that can be obtained and analyzed in the process of rice straw ozonation were including glucose, fructose, and sucrose.

Received

10 October 2018

Received in revised form

-

Accepted

28 December 2018

Published

31 December 2019

DOI: 10.37889/mpi.2019.22.2.5

Kata kunci: Degradasi, jerami padi, lignin, ozonasi, selulosa.

Pendahuluan

Jerami padi merupakan limbah hasil pertanian tanaman padi yang jumlahnya melimpah di Indonesia. Produksi padi nasional periode 2010–2017 terus meningkat. Pada tahun 2017 angka produksi padi mencapai 81.382.451 ton, tumbuh sebesar 2,56% dari tahun sebelumnya.¹ Dengan melihat pertumbuhan produksi padi setiap tahunnya, berarti terjadi peningkatan jumlah limbah jerami padi. Saat ini limbah jerami padi belum dimanfaatkan secara optimal, hanya digunakan sebagai pakan ternak, kompos dan sisanya dibakar untuk menghindari penumpukan. Pembakaran jerami padi ini menyebabkan gas emisi rumah kaca, kontaminasi dan polusi.²

Secara kimia jerami padi tersusun atas selulosa (32–47%), hemiselulosa (19–27%) dan lignin (5–24%).^{3–4} Karena kandungan yang dimiliki ini, maka jerami padi merupakan biomassa yang berpotensi sebagai bahan baku produksi bahan bakar bioetanol.⁵ Selain itu dengan menurunkan berat molekul rantai panjangnya maka aplikasi dapat lebih luas.

Banyak metode dapat digunakan untuk menurunkan berat molekul dari selulosa, diantaranya hidrolisis dengan cara kimia,⁶ enzimatis,⁷ superkritis baik menggunakan air, metanol dan aseton.^{8–10} Metode-metode tersebut digunakan untuk mendegradasi selulosa untuk menghasilkan mono-, di- dan tri-glukosa, oligosakarida dan selulosa dengan berat molekul rendah. Penggunaan hidrolisis secara kimiawi merupakan metode hidrolisis yang tidak ramah lingkungan karena biasanya digunakan asam atau basa kuat yang beracun dan menghasilkan limbah. Hidrolisis dengan cara enzimatis membutuhkan waktu yang lama untuk dapat mendegradasi rantai

^a Teknik Kimia, Universitas Surabaya, Raya Kalirungkut Tenggiling, Surabaya 60290, Indonesia.

† Corresponding author: savitri_ma@staff.ubaya.ac.id.

panjang. Metode superkritik biasanya menggunakan peralatan mahal untuk memenuhi kondisi operasi agar berjalan pada suhu dan tekanan tinggi.

Degradasi dengan menggunakan metode ozonasi merupakan salah satu metode alternatif degradasi yang efektif dan ramah lingkungan. Ozon merupakan reagen oksidator yang sangat kuat dan mudah dihilangkan dari media reaksi. Hal ini menyebabkan proses degradasi akan berjalan dengan cepat dan tidak dibutuhkan proses pemisahan produk dari medianya.¹¹ Melalui proses degradasi dengan menggunakan proses ozonasi, maka dimungkinkan untuk memecahkan rantai panjang dari selulosa, hemiselulosa dan lignin untuk menghasilkan produk turunan yang lebih berharga secara ekonomis.

Disosiasi ozon tidak akan berjalan secara efisien jika ozon digunakan secara sendiri. Kombinasi ozonasi dengan adanya asam lemah ataupun basa dengan konsentrasi rendah berpotensi untuk menghasilkan radikal hidroksil yang bersifat reaktif dan bertanggung jawab terhadap pemutusan ikatan glikosidik yang dimiliki oleh selulosa, hemiselulosa dan lignin. Metode kombinasi ini jika berhasil diaplikasikan akan memudahkan proses *scale-up*.¹²

Penelitian ini akan memfokuskan pada mekanisme degradasi selulosa dan lignin dengan metode ozonasi. Selain itu penelitian juga akan menginvestigasi pengaruh suhu, waktu degradasi dan pH terhadap perubahan kadar selulosa dan lignin serta konsentrasi gula pereduksi hasil degradasi selulosa.

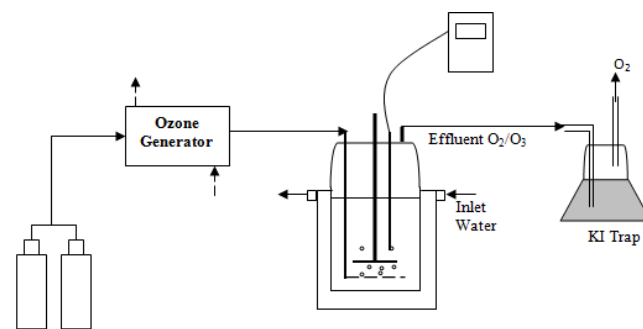
Metode Percobaan

Alat dan Bahan

Pada penelitian ini digunakan jerami padi dari sisa pertanian di daerah Purwodadi, Malang, Jawa Timur. Gas oksigen yang digunakan diperoleh dari PT Samator, Surabaya, Jawa Timur. Potasium iodida (kadar 99%), asam asetat glasial, natrium hidroksida (kadar $\geq 98\%$), asam sulfat (kadar 99,999%), etanol (kadar 95%), benzen dengan standar analitik, potasium sodium tartrat (kadar $\geq 99\%$) dan asam 3,5-dinitrosalisilat diperoleh dari Sigma-Aldrich. Aquadest yang digunakan dihasilkan oleh Laboratorium Teknologi Polimer dan Membran Program Studi Teknik Kimia Universitas Surabaya.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi ozon generator yang digunakan untuk menghasilkan ozon dari gas oksigen dengan spesifikasi H \times D \times W adalah 102 mm \times 184 mm \times 330 mm. Berat sebesar 7 lb dan daya 220 VAC 50–60 Hz atau 12 V DC, 0,2 A dan 24 W. Laju alir ozon yang digunakan 1–120 $\mu\text{g mL}^{-1}$. Reaktor yang digunakan berupa reaktor *stainless steel* volume 2 L yang dilengkapi dengan indikator suhu dan tekanan dan berpengaduk. Dalam reaktor ini, degradasi selulosa dan lignin dilakukan dengan bantuan ozon dan senyawa asam maupun basa. Untuk menghindari gas ozon keluar ke lingkungan, peralatan dilengkapi dengan KI trap berupa rangkaian seri peralatan yang di dalamnya diletakkan senyawa potasium iodida. Pengeringan sampel untuk proses analisa kadar selulosa dan lignin dilakukan dengan menggunakan Universal Oven Memmert GmbH, Jerman. Analisa gula pereduksi dilakukan menggunakan metode DNS dengan bantuan Spektrofotometer UV-Vis (Single Beam) merek InScienPro US-120/PC. Hasil degradasi berupa gula dianalisa menggunakan HPLC merek Agilent dengan kolom karbohidrat dan detektor RID. Laju alir

eluent yang digunakan sebesar 1 mL menit^{-1} dengan *eluent* berupa Aseton Nitrit-Air dengan perbandingan 75:25.



Gambar 1. Skema peralatan yang digunakan dalam penelitian.

Cara Kerja

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan antara lain tahap memberikan perlakuan awal terhadap jerami padi dan tahapan reaksi ozonasi. Sebelum direaksikan, jerami padi dicuci bersih untuk menghilangkan kotoran, dipotong, dikeringkan, dihancurkan dan diayak sampai ukuran ± 40 mesh agar seragam. Setelah itu jerami padi didispersikan ke dalam larutan asam dan dipanaskan maupun didinginkan sampai kondisi yang diinginkan. Konsentrasi ozon ditetapkan tertentu dan oksigen dialirkan ke dalam ozon generator yang telah dihubungkan ke reaktor. Reaksi ozonasi dijalankan pada suhu dan waktu ozonasi tertentu dengan melakukan *sampling* setiap 30 menit. Setelah proses ozonasi, dilakukan pemisahan padatan dan cairan menggunakan kertas saring. Padatan yang merupakan jerami padi tersebut dikeringkan di dalam oven kemudian dianalisa kandungan lignin dan selulosanya. Filtratnya kemudian dianalisa kadar gula nya menggunakan metode DNS sehingga diperoleh konsentrasi gula reduksi total yang dihasilkan selama proses dan dianalisa dengan menggunakan HPLC untuk mengetahui jenis gula yang dihasilkan oleh selulosa yang telah terdegradasi. Sampel diuji kadar selulosa (SNI 0444:2009), kadar lignin (SNI 0492:2008), dan jumlah gula pereduksi yang dihasilkan oleh proses ozonasi.

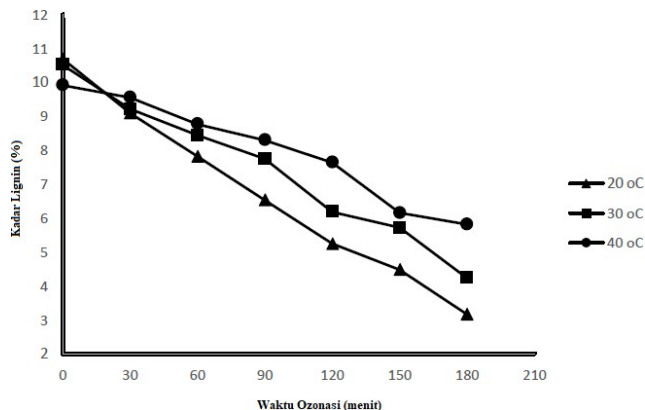
Hasil dan Pembahasan

Karakteristik awal jerami padi yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kandungan lignin sebesar 11–12% dan kandungan selulosa sebesar 50–56%. Penelitian dilakukan untuk mempelajari pengaruh suhu dan waktu ozonasi serta kondisi pH terhadap reaksi ozonasi. Pengaruh variabel proses diamati dengan melihat perubahan variabel proses terhadap perubahan kadar lignin, selulosa, dan jumlah gula pereduksi yang dihasilkan oleh sistem setelah proses ozonasi. Pada penelitian ini konsentrasi ozon yang digunakan sebesar 5,8% mol dengan suhu ozonasi sebesar 20–40 °C dan waktu proses hingga 180 menit.

Karena struktur jerami padi terdiri dari selulosa dan hemiselulosa yang diikat kuat oleh lignin maka proses degradasi diawali oleh hilangnya atau terdegradasinya lignin dalam proses ozonasi. Secara teoritis, lignin dapat terdegradasi menjadi *styrene*, *p-cresol*, *veratrylglycol*, *veratrylglycerol- β guaiacyl ether* dan lain-lain. Tetapi dalam penelitian ini perubahan kadar lignin hanya diamati melalui penurunan kadar lignin total dalam jerami padi dengan

menggunakan analisa sesuai dengan prinsip SNI 0492:2008. Selulosa juga akan terdegradasi menjadi mono-, di-, tri- dan oligo sakarida.

Pengaruh suhu ozonasi dan kondisi pH terhadap proses degradasi diamati dengan melihat perubahan kadar lignin dalam jerami padi. Perubahan tersebut dapat dilihat dari Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Pengaruh suhu ozonasi terhadap perubahan kadar lignin dalam jerami padi pada sistem pH 4.

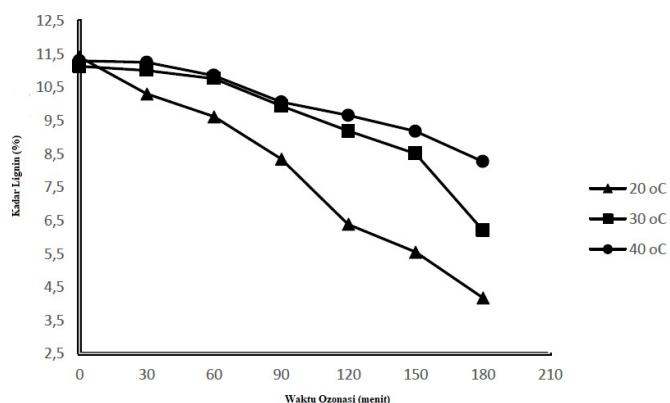
Suhu reaksi degradasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap degradasi lignin dalam jerami padi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2 dan 3. Penggunaan suhu ozonasi 20–40 °C menurunkan kadar lignin dari 11–12% menjadi 3–6% pada pH sistem 4 dan 4,3–8,5% pada pH sistem 9. Baik pada pH sistem 4 maupun 9, laju degradasi lignin mengalami peningkatan dengan penurunan suhu ozonasi. Suhu 20 °C memberikan penurunan kadar lignin terbanyak baik untuk kedua sistem pH.

Tabel 1. Kelarutan ozon dalam air pada berbagai suhu¹³

| Suhu (°C) | Kelarutan Ozon (kg m ⁻³) |
|-----------|--------------------------------------|
| 0 | 1,09 |
| 10 | 0,78 |
| 20 | 0,57 |
| 30 | 0,4 |
| 40 | 0,27 |
| 50 | 0,19 |
| 60 | 0,14 |

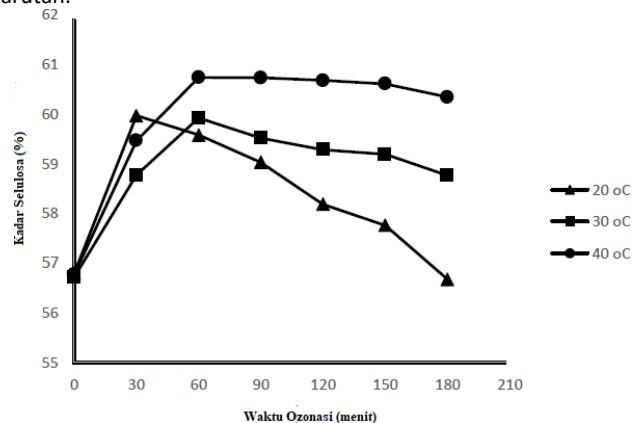
Pada penelitian ini sistem reaksi merupakan reaksi heterogen dimana proses perpindahan massa reaktan merupakan faktor yang penting disamping kecepatan reaksi. Dalam hal ini difusi gas ozon ke dalam sistem cairan dan padatan (jerami padi) menjadi sangat penting. Ozon akan berdifusi/terlarut dalam sistem cairan kemudian berdifusi ke dalam sistem padatan dan bereaksi dengan lignin di dalam jerami. Oleh karena itu kelarutan ozon ke dalam cairan menentukan kecepatan degradasi lignin. Kelarutan ozon di dalam cairan berkurang dengan peningkatan suhu ozonasi. Penurunan kelarutan ozon akan menurunkan jumlah ozon di dalam cairan yang berperan dalam proses oksidasi lignin dalam jerami padi. Hal ini menyebabkan kecepatan degradasi lignin menjadi

menurun dengan kenaikan suhu reaksi. Hubungan antara suhu ozonasi dan kelarutan ozon dalam cairan ditunjukkan oleh Tabel 1.



Gambar 3. Pengaruh suhu ozonasi terhadap perubahan kadar lignin dalam jerami padi pada pH sistem 9.

Saat ozon terlarut dalam air, ozon mengalami reaksi simultan yaitu reaksi oksidasi dan dekomposisi. Oleh karena itu, proses ozonasi selalu melibatkan dua spesi yaitu radikal OH dan gas ozon. Reaksi oksidasi secara langsung terjadi karena adanya ozon. Selain itu ozon dapat terdekomposisi menjadi radikal OH. Radikal OH ini merupakan oksidan yang sangat kuat dalam air. Reaksi tidak langsung oleh ozon menghasilkan radikal OH yang kemudian akan berperan dalam mengoksidasi molekul organik dalam air. Dengan adanya peran perpindahan massa reaktan disamping reaksi kimia maka selain suhu ozonasi, ukuran partikel dari jerami padi dan adanya sistem pengadukan juga akan membantu proses perpindahan massa baik dari ozon maupun radikal OH. Pada penelitian ini, ukuran partikel jerami padi dan sistem pengadukan tidak divariasikan tetapi ditetapkan yaitu partikel sebesar 40 mesh dan 400 rpm. Selain itu pada reaktor, ozon dialirkan dengan menggunakan sistem *bubbling* dengan tujuan membantu proses transfer massa ozon ke dalam larutan sehingga reaksi oksidasi berjalan dengan baik. Sistem *bubbling* merupakan ozon yang digelembungkan saat masuk dalam larutan.

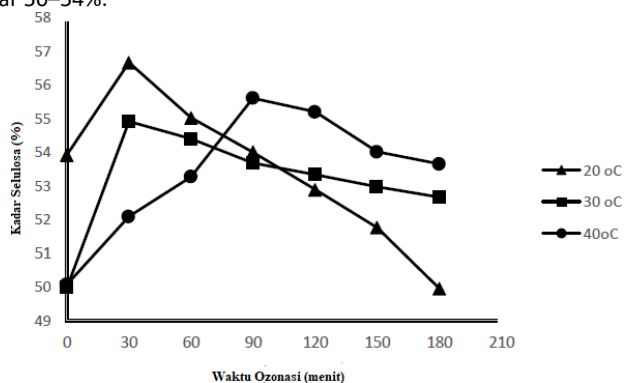


Gambar 4. Pengaruh suhu ozonasi terhadap perubahan kadar selulosa dalam jerami padi pada sistem pH 4.

Gambar 2 dan 3 juga menunjukkan pengaruh waktu ozonasi terhadap kadar lignin. Dengan semakin panjangnya proses ozonasi maka oksidator dari ozon maupun radikal juga semakin banyak yang berkontak dengan struktur lignin sehingga struktur lignin terdegradasi menjadi molekul yang lebih kecil.

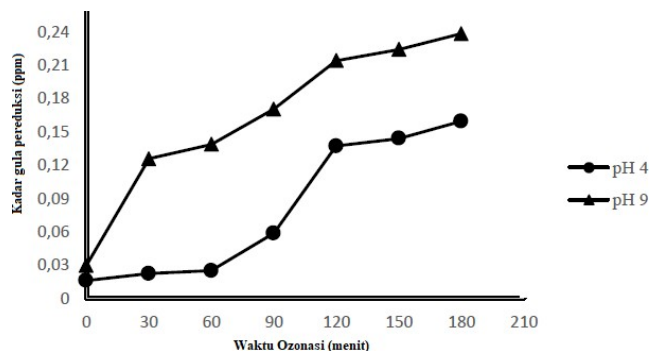
Pengaruh suhu ozonasi terhadap kandungan selulosa dari jerami padi dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5. Gambar 4 menunjukkan kurva pengaruh suhu terhadap kadar selulosa pada proses ozonasi dengan sistem pH 4. Dari hasil penelitian diperoleh hasil bahwa kadar selulosa awal yang berkisar 56% mengalami peningkatan kadar selulosanya dalam periode 60 menit proses, dengan kadar selulosa mencapai sekitar 59–61%. Setelah waktu ozonasi 60 menit hingga 180 menit kadar selulosa menurun hingga sekitar 56–60%.

Untuk sistem dengan pH 9 diperoleh kecenderungan kurva yang sama seperti halnya pada pH sistem 4. Kadar selulosa awal sekitar 50–54% mengalami peningkatan dalam periode ozonasi 30–60 menit yang dilanjutkan dengan penurunan kadar selulosanya sekitar 50–54%.



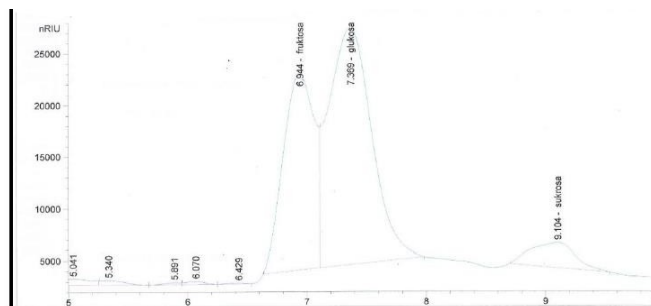
Gambar 5. Pengaruh suhu ozonasi terhadap perubahan kadar selulosa dalam jerami padi pada pH sistem 9.

Profil kadar selulosa ini dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain pada awal waktu ozonasi sekitar 30–60 menit terjadi penurunan kadar lignin dalam jerami padi yang menyebabkan kenaikan kadar selulosa dalam jerami. Secara teori jerami padi tersusun atas selulosa, hemiselulosa dan lignin, dimana selulosa dan hemiselulosa membangun struktur kristalin sedangkan lignin yang berperan sebagai pengikat dan perekat bersifat amorf. Ketika proses oksidasi terjadi baik oleh ozon maupun radikal hidroksil maka struktur lignin terdegradasi di awal proses, sehingga dengan terdegradasinya struktur lignin maka kadar selulosa dalam jerami akan meningkat. Setelah jumlah lignin menurun maka struktur selulosa menjadi semakin terbuka dan tidak terlindung oleh lignin, oleh karena itu ozon maupun radikal hidroksi menyerang struktur selulosa sehingga kadar selulosa mulai menurun pada periode setelah 30–60 menit pertama proses. Dari Gambar 4 dan 5 terlihat bahwa suhu ozonasi 20 °C memberikan perubahan kenaikan kadar selulosa yang lebih tinggi dibandingkan dengan peningkatan kadar selulosa untuk suhu ozonasi 30 dan 40 °C. Hal ini dapat dipahami karena pada waktu awal proses ozonasi tersebut penurunan kadar lignin juga lebih tinggi dibandingkan dengan kadar lignin pada suhu yang lebih tinggi. Setelah struktur selulosa terbuka maka kecepatan penurunan kadar selulosa pada suhu ozonasi 20 °C terlihat lebih besar dibandingkan kecepatan penurunan kadar selulosa pada suhu ozonasi 30 dan 40 °C. Hal ini sesuai dengan pembahasan sebelumnya dimana dengan suhu ozonasi yang lebih rendah maka jumlah ozon yang dapat terlarut dalam sistem cairan akan semakin besar sehingga jumlah ozon maupun radikal hidroksi yang terbentuk dan menyerang struktur lignin dan selulosa juga semakin besar.



Gambar 6. Profil peningkatan kadar gula pereduksi pada sistem dengan suhu 20 °C untuk waktu ozonasi 180 menit.

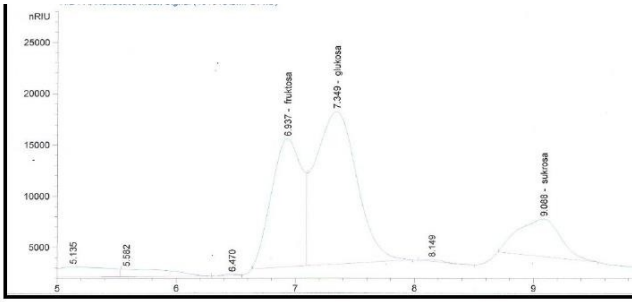
Dari Gambar 2–5, pH sistem terlihat juga memberikan pengaruh terhadap proses degradasi baik lignin maupun selulosa. Adanya ozon pada reaksi dengan bahan organik dipengaruhi oleh pH. Pada pH rendah, ozon akan bereaksi dengan senyawa yang memiliki gugus spesifik melalui reaksi selektif seperti elektrofilik, nukleofilik, atau reaksi tambahan dipolar (ozonasi langsung). Pada kondisi netral, ozon akan terdekomposisi menghasilkan radikal OH yang merupakan oksidator kuat dan bereaksi dengan senyawa organik dan anorganik yang beragam pada air (ozonasi tidak langsung). Pada umumnya, ozonasi langsung mendominasi pada pH rendah (pH < 4), ozonasi langsung dan tidak langsung terjadi pada pH 4–9, dan ozonasi tidak langsung mendominasi pada pH tinggi (pH > 9). Pada penelitian ini dimungkinkan kedua reaksi baik oksidasi langsung maupun tidak langsung terjadi secara simultan.



Gambar 7. Hasil spektrogram analisa sampel pada suhu 20 °C dengan waktu 180 menit pH 4.

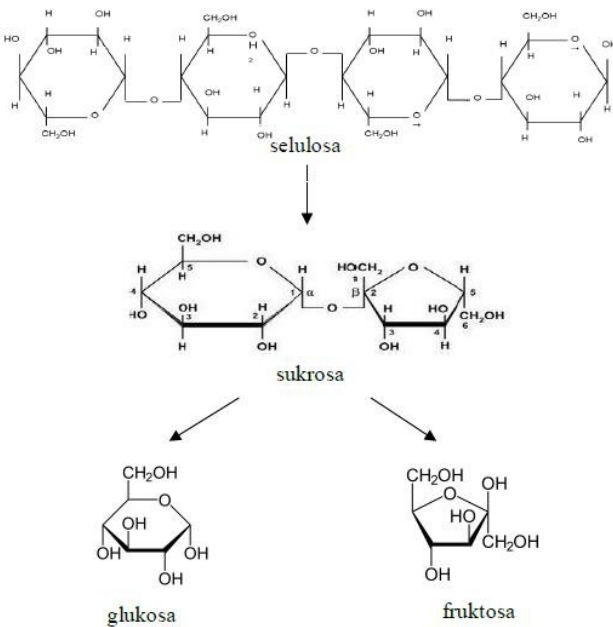
Pengaruh pH terhadap total gula pereduksi yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan peningkatan jumlah gula pereduksi yang signifikan untuk pH sistem 9 dibandingkan untuk pH sistem 4. Adanya ion OH⁻ dari sistem mendorong sistem ke arah dominasi reaksi oksidasi secara tidak langsung dengan terdekomposisinya ozon menjadi radikal hidroksi yang kemudian berperan dalam pemutusan ikatan glikosidik dari rantai selulosa menjadi produk gula.

Dari hasil diperoleh bahwa proses degradasi selulosa dengan metode ozonasi terbukti dapat menghasilkan gula disakarida, gula monosakarida dan produk-produk lain yang lebih sederhana. Gambar 7 dan 8 menunjukkan hasil spektrogram dari sistem setelah proses ozonasi pada suhu 20 °C untuk periode waktu ozonasi 180 menit pada pH 4 dan 9.



Gambar 8. Hasil spektrogram analisa sampel pada suhu 20 °C dengan waktu 180 menit pH 9.

Dari Gambar 7 dan 8 terlihat bahwa hasil degradasi dari selulosa yang dapat dianalisa berupa sukrosa, fruktosa dan glukosa. Dari hasil analisa jenis gula yang diperoleh maka kemungkinan mekanisme degradasi yang terjadi dari sistem degradasi selulosa dengan proses ozonasi dapat diskemakan pada Gambar 9. Selulosa terdegradasi menjadi sukrosa yang kemudian terdegradasi lanjut menjadi glukosa dan fruktosa.



Gambar 9. Skema kemungkinan mekanisme degradasi selulosa dengan proses ozonasi.

Kesimpulan

Lignin dan selulosa dalam jerami padi dapat didegradasi dengan menggunakan proses ozonasi. Peningkatan suhu ozonasi berpengaruh terhadap kelarutan ozon terhadap air sehingga menyebabkan penurunan kecepatan degradasi pada lignin dan selulosa dan peningkatan kadar total gula pereduksi. Peningkatan waktu ozonasi juga berperan dalam menurunnya

kadar lignin dan selulosa serta terbentuknya gula pereduksi karena proses degradasi. pH sistem juga berpengaruh dalam proses degradasi baik lignin maupun selulosa. Gula pereduksi yang dapat terdeteksi pada penelitian ini sebagai hasil degradasi selulosa adalah glukosa, fruktosa dan sukrosa.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan kepada Audrey Bernarda, J.P. yang membantu penulis dalam melakukan penelitian di laboratorium.

Referensi

- 1 Anonim, "Produksi Padi Nasional 2010 - 2017" <https://lo-kadata.beritagar.id/chart/preview/produksi-padi-nasional-2010-2017-1515999290>, diakses tanggal 27 September 2018.
- 2 S. Sangon, A. J. Hunt, T.M. Attard, P.Mengchang, Y. Ngernyen dan N. Supanchaiyamat, Valorisation of Waste Rice Straw for the Production of Highly Effective Carbon Based Adsorbents for Dyes Removal, *J. Clean. Prod.*, 2018, 172, 1128–1139.
- 3 G. Garrote, H. Dominguez dan J. Parajo, Autohydrolysis of Corncob: Study of Nonisothermal Operation for Xylooligosaccharide Production, *J. Food Eng.*, 2002, 52, 211–218.
- 4 B. C. Saha, Hemicellulose Bioconversion, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 2003, 30, 279–291.
- 5 P. Binod, R. Sindhu, R. R. Singhanian, S. Vikram, L. Devi, S. Nagalakshmi, N. Kurien, R. K., Sukumaran dan A. Pandey, Bioethanol Production from Rice Straw: an overview, *Bioresour. Technol.*, 2010, 101, 4767–4774.
- 6 Y.-Z. Lai, *Chemical Degradation in Wood and Cellulosic Chemistry Chap. 10. 2nd ed. Rev.*, Marcel Dekker, Inc., 2001, 443–512.
- 7 Y. H. Zhang dan L. R. Lynd, Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: noncomplexed cellulase systems, *Biotechnol. Bioeng.*, 2004, 88, 797–824.
- 8 T. Sakaki, M. Shibata, T. Sumi dan S. Yasuda, Saccharification of Cellulose Using a Hotcompressed Water-flow Reactor, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002, 41, 661–665, 2002.
- 9 Y. Ishikawa dan S. Saka, Chemical Conversion of Cellulose as Treated in Supercritical Methanol, *Cellulose*, 2001, 8, 189–195.
- 10 P. Kö, G. Borchers, J. O. Metzgerand dan J. Metzger, Thermal Degradation of Chitin and Cellulose, *J. Anal. Pyrol.*, 1991, 19, 119–129.
- 11 E. Savitri dan E. Purwanto, The Chitosan Degradation by Ozonation Process to Produce Glucosamine and Oligomers Chitosan, *Proceeding Polymer Processing Society*, 2016, 32.
- 12 W. Yue, P. Yao, Y. Wei dan H. Mo, Synergetic Effect of Ozone and Ultrasonic Radiation on Degradation of Chitosan, *Polym. Degrad and Stab.*, 2008, 93, 1814–1821.