

Optimasi Aktivasi Arang Aktif dari Arang Hidro Tempurung Buah Kelapa Sawit Menggunakan Metodologi Permukaan Respon

(Optimization of Activated Carbon from Oil Palm Shell Hydrochar Using Response Surface Methodology)

Ismail Budiman^{1,2*}, Dede Hermawan^{1*}, Fauzi Febrianto¹, Subyakto², Gustan Pari³

¹Forest Products Department, Faculty of Forestry, Bogor Agricultural University, Kampus IPB Dramaga, Bogor, Indonesia

²Research Center for Biomaterials LIPI, Jl Raya Bogor km 46 Cibinong. Bogor, Indonesia

³Forest Products Research and Development Center, Research Development and Innovation Agency, Ministry of Environment and Forestry, Jl. Gunung Batu Bogor, Indonesia

*Penulis korespondensi: mr.dede.hermawan@gmail.com

Abstract

In this study, activated carbon was prepared using hydrochar derived from oil palm shell through hydrothermal carbonization (HTC), and activated by 5% kalium hydroxide (KOH). The activation process was carried out using a temperature of 700 °C - 800 °C, with activation time of 60-120 minutes. The parameters of the activation process were optimised by response surface methodology (RSM). The central composite design (CCD) is used to determine the effect of activation temperature and activation time on some responses i.e. proximate analysis, ultimate analysis, methylene blue number, iodine number, electrical conductivity, yield percentage, and some gas pollutants adsorption. The results showed that almost all of activated charcoal met the technical standard of activated charcoal of SNI 06-3730-1995 for moisture content, ash content, volatile matter, fixed carbon, iodine number, and methylene blue number. The optimum conditions for the activation process involving the response observed were at 787.85 °C for 116.52 minutes

Keywords: activated carbon, central composite design, oil palm shell, optimization, response surface methodology

Abstrak

Pada penelitian ini dilakukan aktivasi karbon menggunakan 5% kalium hidroksida (KOH) dengan bahan arang hidro yang berasal dari tempurung buah kelapa sawit melalui proses karbonisasi hidrotermal (KHT). Proses aktivasi dilakukan menggunakan suhu pada rentang 700-800 °C, selama 60-120 menit, setelah arang hidro direndam terlebih dahulu menggunakan larutan kalium hidroksida (KOH) 5%. Parameter proses aktivasi dioptimasi dengan menggunakan metodologi permukaan respon (RSM). Pada penelitian ini digunakan desain komposit terpusat (CCD) untuk mengetahui pengaruh suhu dan waktu aktivasi terhadap beberapa respon seperti data analisis proksimat, analisis ultimat, bilangan biru metilena, bilangan iodin, konduktivitas listrik, rendemen, dan daya jerap beberapa polutan berbentuk gas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arang aktif pada berbagai variasi suhu dan waktu aktivasi memenuhi standar arang teknis SNI 06-3730-1995 untuk kadar air, kadar abu, zat terbang, karbon terikat, bilangan iodin, dan bilangan biru metilena. Adapun kondisi optimum proses aktivasi karbon dengan melibatkan respon adalah pada suhu 787,85 °C selama 116,52 menit.

Kata kunci: desain komposit terpusat, karbon aktif, metodologi permukaan respon, optimasi, tempurung buah sawit

Pendahuluan

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan salah satu tanaman berlignoselulosa yang keberadaannya berlimpah di Indonesia. Berdasarkan data Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian (2016) mengenai Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2015-2017, disebutkan bahwa total luas area perkebunan sawit di Indonesia pada tahun 2015 adalah 11260277 ha dan perkiraan luas pada tahun 2017 adalah 12307677 ha. Sedangkan data produksi minyak sawit (*crude palm oil* - CPO) dan inti sawit (*palm kernel oil* - PKO) pada tahun 2015 berturut-turut sebesar 31070015 ton dan 6214003 ton, serta perkiraan produksi tahun 2017 berturut-turut adalah 35359384 ton dan 7071877. Hambali dan Rivai (2017) menyatakan bahwa berdasarkan data luas areal dan produksi minyak tersebut, dapat diperoleh data limbah yang dihasilkan pada tahun 2015 untuk tandan kosong kelapa sawit, tempurung buah, batang dan pelepah berturut-turut sebesar 30,62 juta ton, 8,41 juta ton, 34,13 juta ton dan 124,03 juta ton. Besarnya potensi dari limbah tanaman kelapa sawit ini dapat dimanfaatkan untuk memperoleh bahan yang memiliki nilai lebih secara ekonomis dan juga mengurangi keberadaan limbah untuk keberadaan lingkungan yang lebih baik.

Salah satu pemanfaatan limbah tanaman sawit, khususnya tempurung buah sawit untuk menambah nilai manfaat dan ekonomis adalah dengan menjadikannya arang aktif. Arang aktif dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, diantaranya adalah sebagai kapasitor dan superkapasitor (Jain *et al.* 2013, Lee *et al.* 2016), bahan penyerap bahan pencemar (polutan), adsorben untuk biru metilena

(Islam *et al.* 2017), karbon dioksida dan metana (Falco *et al.* 2013), serta pewarna sintetis tekstil Rhodamin B (Jain *et al.* 2015).

Pembuatannya arang aktif secara umum dapat diperoleh melalui dua tahap karbonisasi, yaitu melalui karbonisasi suhu rendah (di bawah 400 °C), dan melalui aktivasi pada suhu tinggi (600 °C). Karbonisasi suhu rendah dapat dilakukan dengan pirolisis (cara kering), dan hidrotermal (cara basah, menggunakan media air).

Penggunaan karbonisasi hidrotermal pada saat ini banyak digunakan oleh peneliti dikarenakan berbagai keunggulannya dibandingkan dengan cara pirolisis. Keuntungan tersebut diantaranya karena memiliki pori berukuran medium dan digolongkan ke dalam kelompok mesopori (2-50 nm) sebanyak 67% lebih banyak dari proses karbonisasi suhu rendah lainnya (Jain *et al.* 2014). Hal ini menjadikan arang hidro sebagai bahan awal (*precursor*) yang sangat baik untuk dijadikan sebagai arang aktif (Jain *et al.* 2016).

Kualitas arang aktif dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya jenis bahan baku, activator, proses karbonisasi awal (suhu rendah), suhu aktivasi, serta lamanya waktu aktivasi. Dua faktor terakhir yaitu suhu dan waktu aktivasi, cukup berpengaruh dalam menghasilkan arang aktif yang berkualitas tinggi. Suhu dan lamanya waktu aktivasi yang optimal akan menghasilkan arang aktif dengan kualitas yang juga optimal.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui suhu dan waktu aktivasi optimal dari arang aktif yang berasal dari arang hidro tempurung buah kelapa sawit. Metode permukaan respon (*Response surface methodology*, RSM) digunakan untuk mencari titik optimal dari suhu dan

waktu aktivasi, sedangkan desain komposit terpusat (*Central Composite Design*, CCD) digunakan untuk mengetahui pengaruh suhu dan waktu aktivasi terhadap beberapa respon seperti bilangan iodin, bilangan biru metilena, konduktivitas listrik, persentase rendemen, kandungan unsur karbon yang didapatkan dari pengujian unsur elemental, serta daya jerap beberapa polutan berbentuk gas.

Metode Penelitian

Bahan dan alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa arang hidro dari tempurung buah kelapa sawit yang dihasilkan melalui proses hidrotermal dengan suhu 250 °C selama 8 jam, dan kalium hidroksida (KOH) sebagai aktivator. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tungku karbonisasi (*retort pyrolysis*), desikator, oven, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) JEOL JSM 6360 LA – 20 kV, *X-Ray Diffraction* (XRD) SHIMADZU 7000 series – 40 kV, 628 Series Elemental Determinators Leco, dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Perkin Elmer 4000.

Pembuatan arang aktif

Bahan baku penelitian berupa arang hidro tempurung buah kelapa sawit terlebih dahulu direndam dalam larutan KOH 5%. Setelah 24 jam, arang hidro kemudian dibilas sampai dengan air bilasan mendekati pH netral. Setelah itu arang hidro ditiriskan dan dikeringkan dalam oven dengan suhu 60 °C selama 24 jam. Selanjutnya arang hidro tersebut dikarbonisasi menggunakan tungku pirolisis dengan rentang suhu 700-800 °C selama 60-120 menit.

Rancangan penelitian

Optimasi dilakukan pada aktivasi arang terhadap dua faktor, yaitu suhu aktivasi dan lama aktivasi. Hasil dari sifat arang dan daya jerap terhadap polutan digunakan sebagai peubah respon. Optimasi dilakukan menggunakan *Rotatable CCD* (Cochran dan Cox 1992) dengan nilai $\alpha=1.41421$. Jumlah titik percobaan 13, terdiri dari 2^2 titik faktorial, 4 titik bintang dan 5 titik pusat, masing-masing dengan 1 ulangan. Model polinomial kuadratik dibangun pada data menggunakan persamaan regresi sebagai berikut :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_{11} X_{1i}^2 + \beta_{22} X_{2i}^2 + \beta_{12} X_{1i} X_{2i} + \varepsilon_i$$

dengan Y_i adalah peubah respon dari pengamatan ke- i (sifat arang dan daya jerap terhadap polutan), X_{1i} adalah peubah bebas suhu aktivasi dari pengamatan ke- i , X_{2i} adalah waktu aktivasi dari pengamatan ke- i , β_0 adalah koefisien intersep, β_1 , β_2 , β_{12} , β_{11} , β_{22} adalah koefisien regresi, dan ε_i adalah galat dari pengamatan ke- i .

Adapun suhu dan waktu aktivasi yang digunakan berdasarkan rancangan CCD dapat dilihat pada Tabel 1.

Pengujian arang aktif

Beberapa pengujian dilakukan terhadap arang aktif dari arang hidro tempurung buah sawit ini, diantaranya pengujian proksimat, pengujian bilangan iodin, pengujian bilangan biru metilena, pengujian analisis elemental, pengujian kemampuan penyerapan arang terhadap beberapa bahan polutan berupa gas (formaldehida, ammonia, benzene, kloroform, SO_x dan NO_x), dan pengujian konduktivitas listrik.

Pengujian lain seperti SEM, XRD, FTIR, dan Py-GCMS, dilakukan terhadap beberapa contoh uji arang aktif setelah terpilih arang aktif terbaik berdasarkan pengujian respon-respon di atas.

Tabel 1 Suhu dan waktu aktivasi arang aktif berdasarkan rancangan *Central Composite Design*

No	A	B	Tipe	Suhu aktivasi (°C)	Waktu Aktivasi (menit)
1	-1	-1	Titik sudut	700	60
2	1	-1	Titik sudut	800	60
3	-1	1	Titik sudut	700	120
4	1	1	Titik sudut	800	120
5	-	0	Titik star	679,29	90
6	4	0	Titik star	820,7	90
7	0	1,41421	Titik star	750	47,57
8	0	14	Titik star	750	132,43
9	0	0	Titik tengah	750	90
10	0	0	Titik tengah	750	90
11	0	0	Titik tengah	750	90
12	0	0	Titik tengah	750	90
13	0	0	Titik tengah	750	90

Optimasi Suhu dan waktu aktivasi arang aktif

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan *Response Surface Methodology (RSM)* dengan bantuan piranti lunak Minitab® Release 16. Kesesuaian model dianalisis berdasarkan analisis ragam. Validasi model dievaluasi dengan melakukan percobaan pada kondisi optimum.

Hasil dan Pembahasan

Pengujian proksimat, bilangan iodin, dan bilangan biru metilena

Pengujian proksimat dilakukan untuk mengetahui kadar air, kadar abu, zat terbang, karbon terikat. Pengujiannya berdasarkan ASTM D212. Selain pengujian proksimat, juga dihitung bilangan iodin dan bilangan biru metilena. Pengukuran bilangan iodin dilakukan

berdasarkan ASTM D4607-94, dengan tujuan untuk menduga mikropori yang terdapat pada arang aktif. Sedangkan pengukuran bilangan biru metilena dilakukan berdasarkan metode dari Chemvron Carbon Company, dengan tujuan untuk mengetahui kemampuan bahan dalam menyerap warna dan senyawa yang memiliki berat molekul yang tinggi, yang berkorelasi dengan material berpori mesopori dan makropori (Raposo *et al.* 2009).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua arang aktif memenuhi syarat mutu arang aktif teknis yang ditetapkan standar SNI 06-3730-1995 untuk kadar air, zat terbang, dan karbon terikat, namun hanya sebagian arang aktif yang dapat memenuhi syarat untuk kadar abu, bilangan iodin dan bilangan biru metilena. Adapun hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil pengujian proksimat, bilangan iodin dan bilangan biru metilena dari arang aktif tempurung buah kelapa sawit

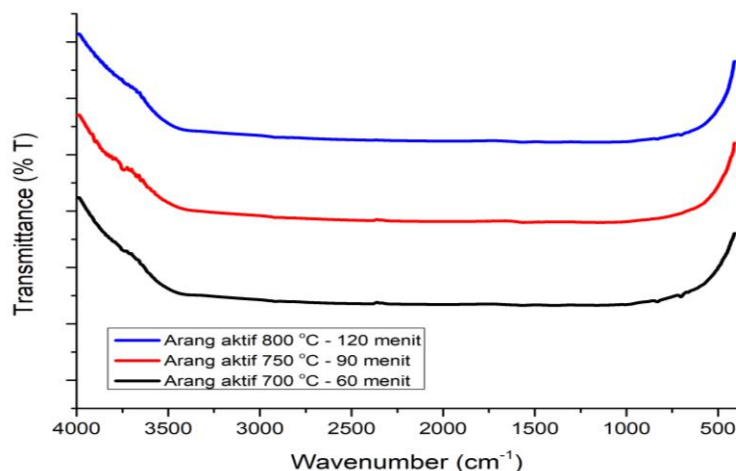
No	Suhu dan waktu aktivasi arang aktif	Kadar air (%)	Kadar abu (%)	Zat terbang (%)	Karbon terikat (%)	Bilangan iodin (mg g ⁻¹)	Bilangan biru metilena (mg g ⁻¹)
1	679,29 °C – 90 menit	5,26	12,84	20,57	66,59	631,56	110,99
2	700 °C – 60 menit	4,31	11,82	20,18	68,00	676,45	116,31
3	700 °C – 120 menit	2,77	7,41	23,41	69,18	763,43	120,62
4	750 °C – 45,57 menit	3,08	8,19	17,91	73,90	743,14	109,61
5	750 °C – 90 menit	2,69	6,02	20,04	73,94	863,20	126,34
6	750 °C – 90 menit	2,66	5,64	17,44	76,92	767,70	122,48
7	750 °C – 90 menit	2,69	4,03	17,94	78,03	783,80	128,60
8	750 °C – 90 menit	2,46	6,52	20,00	73,48	797,10	123,28
9	750 °C – 90 menit	2,17	6,29	19,75	73,96	775,20	124,96
10	750 °C – 132,43 menit	2,66	4,57	18,90	76,53	803,90	124,14
11	800 °C – 60 menit	2,14	4,13	19,16	76,71	775,40	123,74
12	800 °C – 120 menit	1,93	4,89	19,29	75,82	813,75	128,44
13	820,7 °C – 90 menit	2,20	4,27	17,95	77,78	805,83	129,23
SNI No. 06-3730-1995		< 15	< 10	< 25	> 65	>750	>120

Nilai kadar air arang aktif tempurung kelapa sawit berkisar antara 1,93-5,26%, dan memenuhi syarat mutu arang aktif teknis (SNI 06-3730-1995), yang mensyaratkan kadar air maksimal arang aktifnya adalah 15%. Hal yang sama juga untuk nilai zat terbang (17,44-23,41%) dan karbon terikat (66,59-78,03%), di mana semua arang aktif tempurung kelapa sawit memenuhi syarat mutu arang aktif teknis (zat terbang <25%, karbon terikat >65%). Hal yang berbeda terjadi pada nilai kadar abu (4,03-12,84%), bilangan iodin (631,56-863,20 mg g⁻¹), dan bilangan biru metilena (110,99-129,23 mg g⁻¹), dimana tidak semua arang aktif dapat memenuhi syarat mutu teknis (kadar abu <10%, bilangan iodin >750 mg g⁻¹, bilangan biru metilena >120 mg g⁻¹).

Jika dilihat nilainya, nilai kadar abu yang tidak memenuhi standar SNI diperoleh dari aktivasi dengan kombinasi suhu dan waktu aktivasi 679,29 °C - 90 menit dan 700 °C - 60 menit, sedangkan bilangan iodin dan bilangan biru metilena dihasilkan dari kombinasi suhu dan waktu

aktivasi seperti di atas, ditambah dengan aktivasi pada 750 °C selama 45,57 menit. Khusus untuk bilangan iodin dan bilangan biru metilena, hal tersebut dapat terjadi karena kombinasi suhu dan waktu yang cukup rendah belum dapat menghasilkan pori berukuran mesopori dan makropori seperti pada kombinasi suhu dan waktu lainnya.

Proses aktivasi pada suhu tinggi dapat menyebabkan kandungan karbon terikat, bilangan iodin, dan bilangan biru metilena jauh lebih besar dibandingkan dengan bahan bakunya berupa arang hidro dari tempurung sawit yang dihasilkan melalui proses karbonisasi hidrotermal menggunakan suhu rendah. Hal ini terjadi karena adanya penguraian bahan organik yang meninggalkan lebih banyak unsur karbon. Selain itu terbentuk juga pori berukuran mesopori ataupun makropori yang berpengaruh terhadap sifat penyerapan iodin dan biru metilena. Hilangnya bahan organik pada tempurung buah kelapa sawit seiring dengan aktivasi pada suhu tinggi dapat dijelaskan dengan

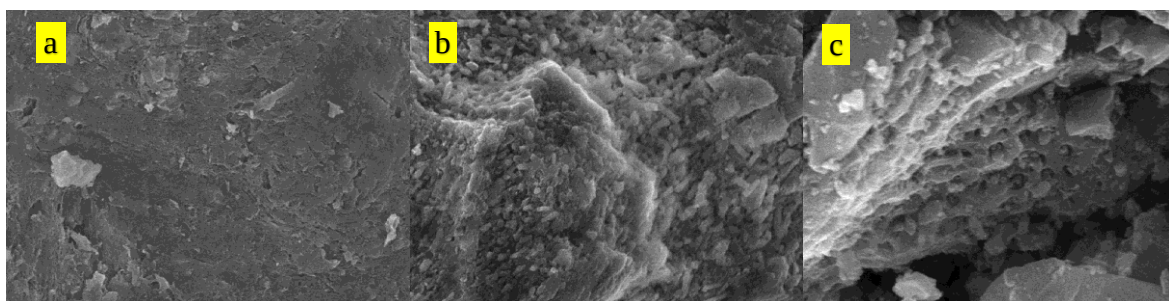


Gambar 1 Spektra FTIR arang aktif tempurung kelapa sawit.

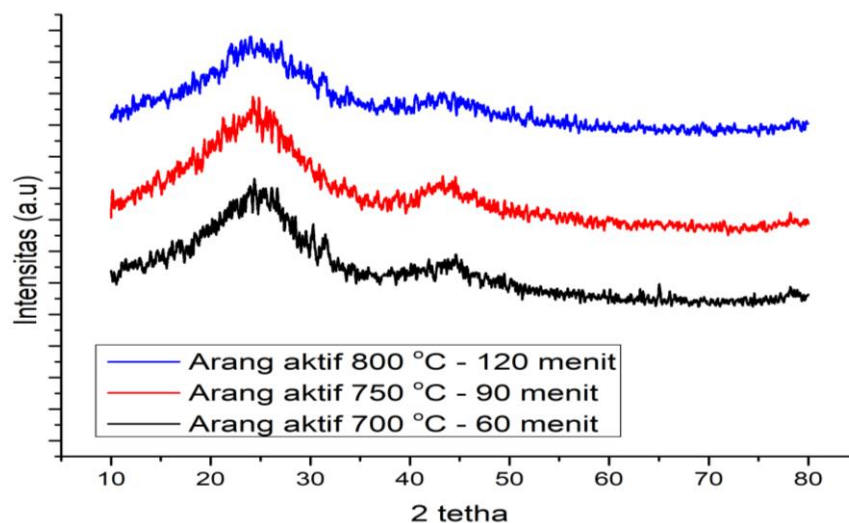
menggunakan hasil pengujian FTIR seperti yang terlihat pada Gambar 1, sedangkan terbentuknya pori pada permukaan arang aktif dapat dilihat dengan menggunakan SEM seperti terdapat pada Gambar 2.

Bahan baku berupa tempurung buah sawit dan arang hidro hasil proses hidrotermal pada suhu rendah masih terdapat ikatan O-H (hidroksil) yang cukup tinggi, yang mengindikasikan masih terdapatnya selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Yang *et al.* (2007) menyatakan bahwa selulosa diindikasikan dengan adanya ikatan -OH dan C-O, hemiselulosa diindikasikan dengan adanya ikatan C=O (aldehida), dan lignin diindikasikan dengan banyaknya

ikatan C=C (cincin aromatik), -O-CH₃ (metoksil), dan ikatan regangan C-O-C. Setelah diaktivasi dengan menggunakan suhu 700-800 °C selama 60-120 menit, dapat dilihat bahwa ikatan-ikatan tersebut banyak yang tereduksi. Ikatan yang terbentuk dari arang aktif ini didominasi oleh ikatan C=C aromatik di sekitar bilangan gelombang 700 cm⁻¹, 1600 cm⁻¹, dan 3000 cm⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa aktivasi pada suhu tinggi dapat meningkatkan keberadaan senyawa aromatik sebagai penyusun struktur heksagonal arang aktif. Perubahan struktur heksagonal pada arang aktif tempurung buah kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2 Hasil SEM permukaan tempurung buah sawit perbesaran 2000x (a), arang hidro 225 °C – 8 jam perbesaran 2000x (b), dan arang aktif 750 °C – 90 menit perbesaran 5000x (c).



Gambar 3 XRD arang aktif tempurung kelapa sawit.

Berdasarkan Gambar 2, dapat terlihat bahwa arang aktif memiliki permukaan dengan penampakan pori yang cukup jelas. Hal ini terjadi karena aktivasi pada suhu tinggi menyebabkan tereduksinya bahan organik pada permukaan arang hidro.

Berdasarkan Gambar 3, dapat dilihat bahwa sudut difraksi dari arang aktif tempurung buah sawit berturut-turut untuk arang aktif 700 °C- 60 menit, 750 °C-90 menit, dan 800 °C-120 menit adalah 21,96°, 21,92°, dan 22,06°. Selain itu pada arang aktif tersebut telah terbentuk sudut difraksi baru pada sudut 2θ 43,82° (700 °C-60 menit), 2θ 43,72° (750 °C-90 menit), dan 2θ 43,70° (800 °C-120 menit). Hal ini yang membedakan antara struktur arang aktif dengan bahan baku berupa tempurung buah ataupun arang hidro, yang masih belum terbentuk sudut difraksi baru. Pergeseran dan terbentuknya sudut difraksi baru tersebut menunjukkan bahwa struktur kristal tempurung buah kelapa sawit dan arang hidranya, berbeda dengan arang aktifnya. Pada tempurung buah kelapa sawit, struktur kristalnya didominasi oleh struktur kristal pada

selulosa dengan bentuk kristal monoklinik, sedangkan pada struktur kristal arang aktif, struktur kristalnya terbentuk dari senyawa karbon yang membentuk lapisan heksagonal (Pari 2004).

Rendemen, unsur elemental, dan konduktivitas listrik

Rendemen adalah persentase dari perbandingan berat arang aktif yang dihasilkan terhadap bahan bakunya berupa arang hidro tempurung kelapa sawit. Pengujian unsur elemental dilakukan untuk mengetahui proporsi unsur utama yang ada di dalam arang aktif seperti karbon, hidrogen, oksigen, dan nitrogen. Sedangkan pengujian konduktivitas listrik dilakukan untuk mengetahui sifat konduktif listrik dari arang aktif. Besarnya nilai konduktivitas listrik dapat menentukan penggolongan bahan ke dalam konduktor, semi konduktor, ataupun isolator. Hasil rendemen, proporsi unsur elemental, dan konduktivitas listrik terdapat pada Tabel 3.

Nilai rendemen dari arang aktif tempurung sawit berkisar antara 12,85-26,29%. Nilai

rendemen berhubungan erat dengan penggunaan suhu dan waktu aktivasi. Tabel 3 Hasil pengujian unsur elemental, rendemen dan konduktivitas listrik arang aktif tempurung buah kelapa sawit

No	Suhu dan waktu aktivasi arang aktif	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	Rendemen (%)	Konduktivitas listrik ($S\ m^{-1}$)
1	679,29 °C – 90 menit	75,80	2,73	21,19	0,28	25,71	7,46
2	700 °C – 60 menit	79,60	2,93	17,17	0,30	26,29	18,08
3	700 °C – 120 menit	81,17	3,02	15,46	0,35	20,08	20,22
4	750 °C – 45,57 menit	82,82	2,86	14,06	0,26	23,68	37,36
5	750 °C – 90 menit	84,66	2,79	12,24	0,31	22,12	57,99
6	750 °C – 90 menit	84,79	2,81	12,10	0,30	22,07	69,43
7	750 °C – 90 menit	85,01	3,02	11,69	0,28	23,37	58,69
8	750 °C – 90 menit	84,56	2,98	12,14	0,32	22,26	56,02
9	750 °C – 90 menit	84,68	2,96	12,09	0,27	22,82	53,69
10	750 °C – 132,43 menit	83,32	3,22	13,24	0,22	15,42	56,96
11	800 °C – 60 menit	83,52	2,56	13,62	0,30	16,07	41,34
12	800 °C – 120 menit	85,54	2,42	11,75	0,29	12,85	52,50
13	820,7 °C – 90 menit	86,68	2,58	10,40	0,34	13,53	51,86

Keterangan: C: Karbon H: Hidrogen O: Oksigen N: Nitrogen

Semakin tinggi suhu dan semakin lama waktu aktivasi, maka rendemen akan semakin kecil. Hal ini terjadi karena semakin banyaknya bahan organik yang hilang seiring dengan semakin tingginya suhu dan lamanya waktu aktivasi (Gambar 1). Selain itu, aktivasi pada suhu tinggi ini juga menyebabkan terbentuknya pori pada permukaan arang aktif yang berpengaruh terhadap berkurangnya rendemen dan berperan terhadap sifat daya jerap arang aktif terhadap iodine, biru metilena, maupun daya jerap terhadap beberapa polutan berbentuk gas.

Nilai konduktivitas listrik arang aktif tempurung kelapa sawit berkisar antara $7,46-69,43\ S\ m^{-1}$. Nilai ini termasuk ke dalam klasifikasi semikonduktor (nilai konduktivitas listrik $10^{-6}-10^2\ S\ m^{-1}$). Penggunaan suhu yang semakin tinggi dengan waktu aktivasi yang semakin lama cenderung menaikkan nilai konduktivitas listriknya. Hal ini disebabkan karena tereduksinya kandungan bahan organik,

yang selanjutnya arang aktif didominasi oleh unsur karbon yang bersifat konduktif.

Komposisi unsur arang aktif dari tempurung buah sawit dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil pengujian terhadap unsur elemental menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu yang digunakan, menyebabkan semakin tingginya kandungan unsur karbon (75,80-86,68%), dan kecenderungan semakin menurunnya unsur oksigen (10,40-21,19%) dan hidrogen (2,42-3,22%). Kecenderungan ini terjadi karena semakin tingginya suhu aktivasi akan menyebabkan terjadinya pengurangan oksigen dan hidrogen akibat reaksi dekarboksilasi dan dehidrasi. Reaksi ini menyebabkan terputusnya ikatan lemah pada struktur arang tersebut (Nizamuddin *et al.* 2015). Hal ini sesuai dengan hasil pengujian FTIR (Gambar 1) yang menunjukkan bahwa terjadinya penguraian bahan organik dalam berbagai ikatan, yang menyebabkan unsur karbon mendominasi arang aktif.

Daya jerap polutan

Pengujian terhadap kemampuan arang aktif dalam menyerap beberapa bahan pencemar (polutan) dalam bentuk gas juga dilakukan dalam penelitian ini. Beberapa macam bahan kimia seperti benzena, formaldehida, ammonia, kloroform, sulfat (SO_x), dan nitrat (NO_x) digunakan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh suhu dan waktu aktivasi terhadap kemampuan arang aktif dalam menyerap polutan. Hasil pengujian daya jerap polutan terdapat pada Tabel 4.

Daya jerap arang aktif tempurung buah kelapa sawit terhadap benzene (16,48-27,31%), kloroform (20,75-36,04%), sulfat (2,80-3,93%), dan nitrat (4,56-7,06%) memiliki kecenderungan semakin besar seiring dengan semakin tingginya suhu dan semakin lamanya waktu aktivasi. Hal yang berbeda terjadi untuk daya jerap terhadap formaldehida (10,01-22,03%) yang memiliki kecenderungan semakin tinggi nilainya seiring dengan semakin lamanya waktu, dan ammonia (11,97-24,55%) yang memiliki kecenderungan

semakin tinggi nilainya seiring dengan semakin meningkatnya suhu. Perbedaan ini terjadi karena adanya pengaruh yang berbeda dari perlakuan suhu dan waktu terhadap masing-masing respon, yang bisa bersifat linier ataupun kuadratik.

Kemampuan menyerap polutan dari arang aktif dipengaruhi pori yang terbentuk hasil dari aktivasinya, baik oleh jumlah, bentuk, luas permukaan, dan volume pori. Hal lainnya yang juga berpengaruh terhadap daya jerap dari arang aktif adalah berat molekul polutan, gugus fungsi, posisi gugus fungsi, ikatan rangkap, dan struktur rantai dari senyawa serapan. Menurut Guo *et al.* (2007), hal yang dapat menurunkan kapasitas adsorpsi arang aktif secara signifikan adalah proses modifikasi yang dapat menyebabkan tersumbatnya mikropori.

Optimasi suhu dan waktu aktivasi

Optimasi respon berdasarkan suhu dan waktu aktivasi dilakukan untuk mengetahui kombinasi terbaik dalam menghasilkan respon-respon yang diuji.

Tabel 4. Hasil pengujian daya jerap polutan gas dari arang aktif tempurung buah kelapa sawit

No	Suhu dan waktu aktivasi arang aktif	Benzena (%)	Formaldehida (%)	Ammonia (%)	Kloroform (%)	Sulfat (%)	Nitrat (%)
1	679,29 °C – 90 menit	18,71	15,20	11,97	23,91	2,80	4,56
2	700 °C – 60 menit	20,97	14,65	15,86	25,24	3,32	4,61
3	700 °C – 120 menit	22,84	14,69	17,77	28,12	3,75	4,90
4	750 °C – 45,57 menit	16,48	11,81	14,36	20,75	2,99	2,76
5	750 °C – 90 menit	21,91	10,97	15,03	25,79	3,79	4,63
6	750 °C – 90 menit	23,06	10,01	15,18	24,04	3,76	5,34
7	750 °C – 90 menit	22,11	11,97	14,91	24,34	3,32	4,80
8	750 °C – 90 menit	22,40	10,84	15,37	26,62	3,43	4,83
9	750 °C – 90 menit	23,83	11,70	16,35	28,33	3,56	4,75
10	750 °C – 132,43 menit	24,23	17,59	17,47	33,09	3,71	6,38
11	800 °C – 60 menit	24,50	11,32	20,32	31,11	3,36	5,93
12	800 °C – 120 menit	27,31	22,03	24,55	36,04	3,93	7,06
13	820,7 °C – 90 menit	25,14	13,55	21,61	33,37	3,81	6,03

Adapun respon yang digunakan dalam perhitungan optimasi ini diantaranya adalah bilangan iodin, bilangan biru metilena, rendemen, kandungan karbon, konduktivitas listrik, serta daya jerap terhadap beberapa polutan berbentuk gas

seperti formaldehida, kloroform, NOx, SOx, ammonia, dan benzena. Analisis keragaman (ANOVA) terhadap respon yang diujikan dengan peubah tak tetap berupa suhu dan waktu aktivasi, dapat dilihat pada Tabel 5.

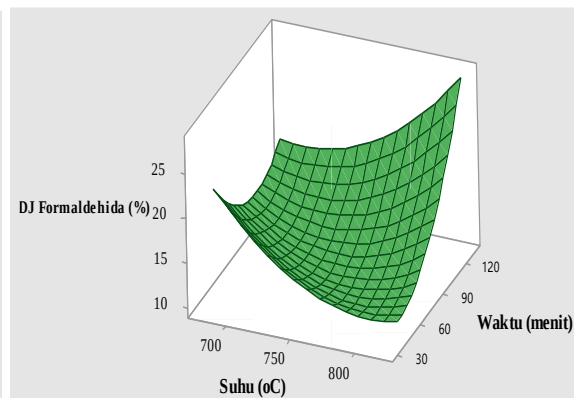
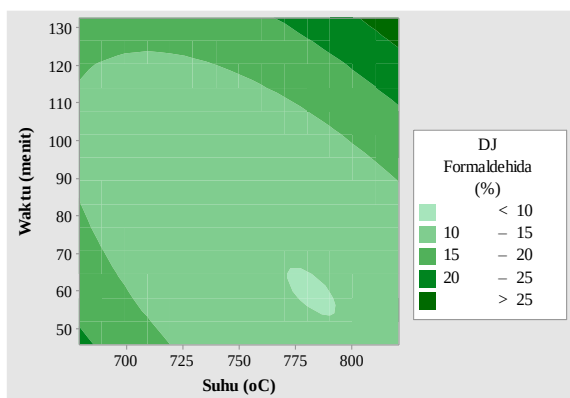
Tabel 5. Analisis keragaman pengujian

Respon	Intersep (nilai p)	Waktu (nilai p)	Waktu* Waktu (nilai p)	Suhu (nilai p)	Suhu* Suhu (nilai p)	Waktu* Suhu (nilai p)	R ² (%)	R ² adj (%)
Bilangan Iodin	796,5 (0,000)	38,2 (0,055)	-17,7 (0,504)	70,5 (0,004*)	-73,5 (0,021*)	-24,9 (0,483)	82,37	69,78
Bilangan Biru	125,08 (0,000)	5,48 (0,014*)	-6,54 (0,037*)	7,25 (0,003*)	-3,26 (0,236)	0,20 (0,955)	84,07	72,70
Metilena	22,599 (0,000)	-3,704 (0,000*)	-3,416 (0,000*)	-6,165 (0,000*)	-3,300 (0,000*)	1,533 (0,064)	98,67	97,62
Rendemen	84,714 (0,000)	0,798 (0,178)	-1,500 (0,106)	4,180 (0,000*)	-3,367 (0,004*)	0,23 (0,837)	92,36	86,90
Kandungan Karbon	58,98 (0,000)	7,66 (0,036*)	-14,69 (0,013*)	20,81 (0,000*)	-32,40 (0,000*)	4,62 (0,465)	94,34	90,29
Konduktivitas listrik	11,024 (0,000)	3,289 (0,001*)	4,266 (0,003*)	0,170 (0,793)	3,872 (0,005*)	5,46 (0,004*)	91,86	86,05
DJ Formaldehida	25,772 (0,000)	4,50 (0,005*)	2,22 (0,236)	4,78 (0,004*)	3,97 (0,052)	1,05 (0,660)	85,50	75,15
DJ Kloroform	4,861 (0,000)	1,180 (0,010*)	0,015 (0,978)	0,973 (0,023*)	0,758 (0,178)	0,430 (0,549)	77,17	60,86
DJ NOx	3,566 (0,000)	0,364 (0,029*)	-0,092 (0,660)	0,290 (0,063)	-0,140 (0,505)	0,072 (0,797)	65,23	40,39
DJ SOx	15,349 (0,000)	1,851 (0,089)	2,17 (0,172)	4,369 (0,002*)	3,06 (0,066)	1,19 (0,552)	82,54	70,07
DJ Amonia	22,641 (0,000)	2,848 (0,015*)	-1,02 (0,477)	3,011 (0,011*)	-1,02 (0,477)	0,48 (0,798)	76,51	59,73
DJ Benzena								

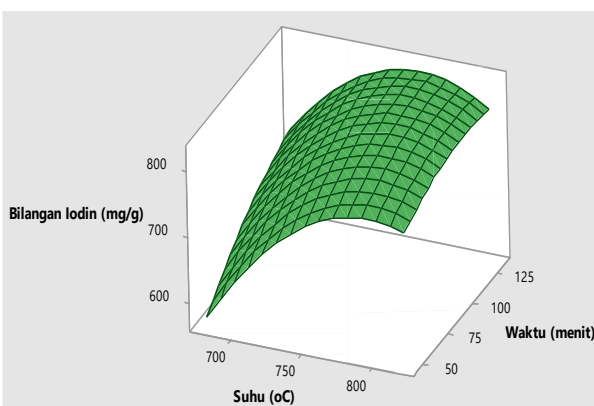
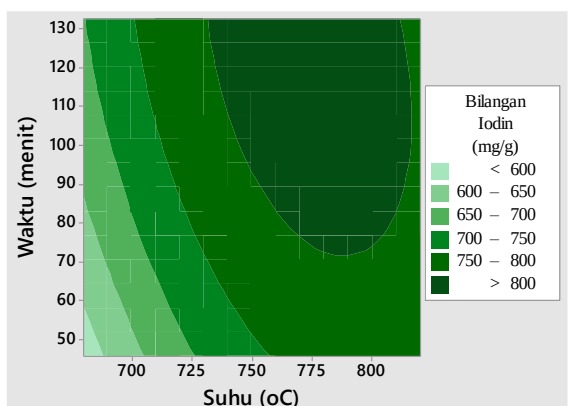
Berdasarkan ANOVA yang ditampilkan pada Tabel 5, dapat dilihat bahwa interaksi antara suhu dan waktu aktivasi hanya terjadi pada daya jerap formaldehida. Artinya bahwa pengaruh suhu tertentu pada berbagai waktu mempunyai pengaruh yang nyata terhadap nilai daya jerap formaldehida. Model yang dihasilkan mampu menjelaskan keragamana dari daya jerap formaldehida sebesar 91,86% (R²) sedangkan sisanya diterangkan oleh faktor lain. Nilai sebaran data daya jerap formaldehida dalam bentuk plot kontur dan plot permukaan respon dapat dilihat pada Gambar 4.

Pengamatan pengaruh suhu dan waktu aktivasi terhadap respon lain ada yang berbentuk linier ataupun kuadratik. Waktu mempunyai pengaruh yang linier, namun tidak signifikan terhadap bilangan iodin. Sedangkan suhu mempunyai pengaruh kuadratik yang signifikan terhadap bilangan iodin. Artinya pada suhu tertentu mempunyai titik maksimum untuk bilangan iodin. Pengaruh suhu tertentu pada berbagai waktu mempunyai pengaruh yang sama, artinya tidak ada interaksi antara suhu dan waktu. Model tersebut mampu menjelaskan keragamana dari bilangan iodin sebesar 82,37% (R²), sedangkan sisanya diterangkan oleh faktor lain. Nilai sebaran data bilangan iodin

dalam bentuk plot kontur dan plot permukaan respon dapat dilihat pada



Gambar 4 Pengaruh suhu dan waktu terhadap daya jerap formaldehida dalam bentuk plot kontur (a), dan plot permukaan respon (b).



Gambar 5 Pengaruh suhu dan waktu terhadap bilangan iodine dalam bentuk plot kontur (a), dan plot permukaan respon (b).

Pengaruh suhu dan waktu aktivasi pada respon lainnya berbeda-beda. Pada bilangan biru metilena, waktu mempunyai pengaruh kuadratik yang signifikan, sedangkan suhu mempunyai pengaruh linier yang signifikan. Pada respon rendemen, dan konduktivitas listrik, baik waktu maupun suhu aktivasi mempunyai pengaruh kuadratik yang signifikan terhadap respon. Hampir sama dengan keduanya, pada respon kandungan karbon, pengaruh suhu aktivasi mempunyai pengaruh kuadratik yang signifikan, namun waktunya mempunyai pengaruh kuadratik yang tidak signifikan. Hal yang berbeda terjadi pada respon daya jerap

Gambar 5.

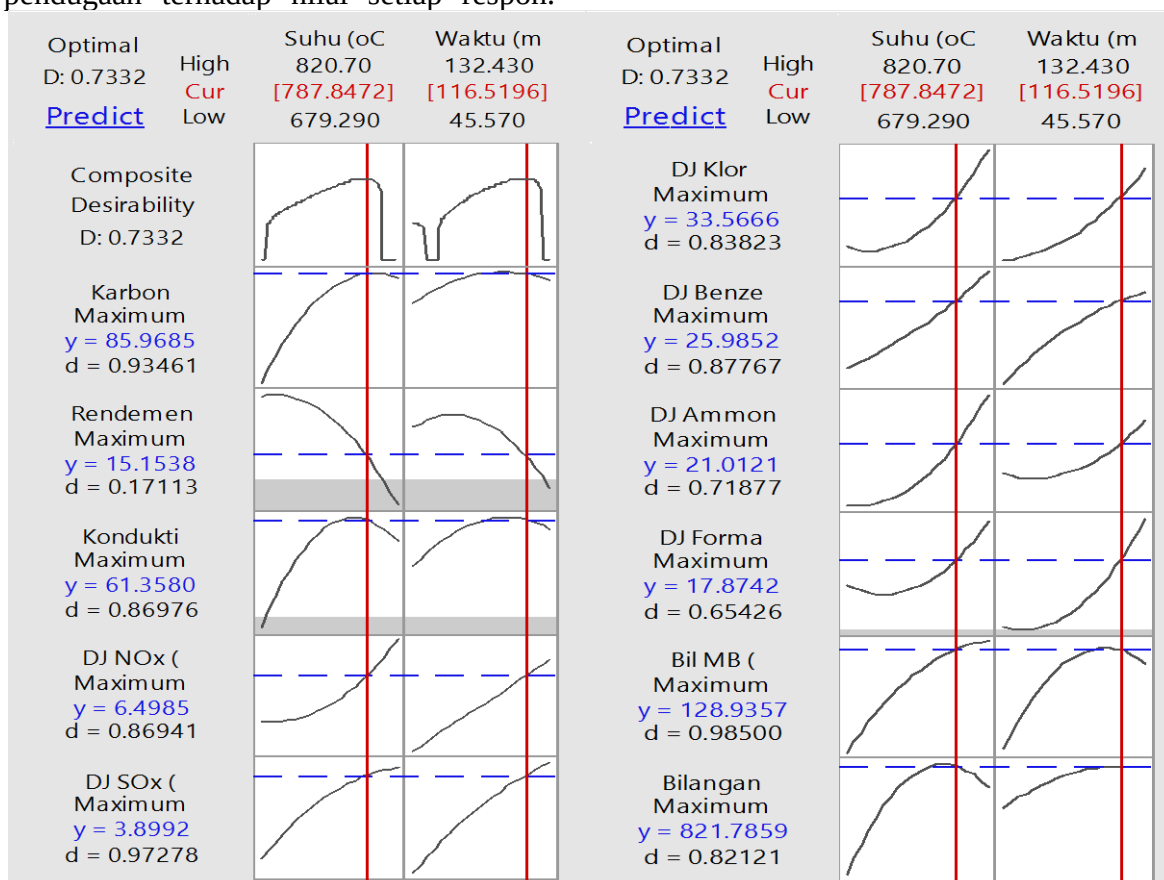
kloroform, NO_x, SO_x, ammonia, dan benzene, dimana waktu dan suhu aktivasi mempunyai pengaruh yang linier terhadap respon.

Pemilihan kondisi optimum dari seluruh respon yang diujidilakukan dengan menggunakan *profiling plot*. Dikarenakan kondisi optimum setiap respon berbeda, maka penentuan kondisi optimum ini merupakan kompromi dari semua respon. Hasil dari pemilihan kondisi optimum dapat dilihat pada Gambar 6.

Berdasarkan pemilihan kondisi optimum dengan menggunakan semua respon yang diuji, dihasilkan suhu optimum sebesar

787,85 °C dan waktu aktivasi optimum sebesar 116,52 menit. Berdasarkan kondisi optimum ini, dapat dilakukan juga pendugaan terhadap nilai setiap respon.

Nilai dugaan respon pada kondisi optimum dapat dilihat pada Tabel 6.



Gambar 6 Pemilihan kondisi optimum menggunakan *profiling plot*.

Tabel 6 Nilai dugaan respon pada kondisi suhu dan waktu aktivasi optimum

Respon	Nilai dugaan respon
Bilangan Iodin	821,79 mg/g
Bilangan Biru metilena	128,94 mg/g
Rendemen	15,15 %
Kandungan Karbon	85,97 %
Konduktivitas listrik	61,36 S m ⁻¹
DJ Formaldehida	17,87 %
DJ Kloroform	33,57 %
DJ NOx	6,50 %
DJ Sox	3,90 %
DJ Amonia	21,01 %
DJ Benzena	25,99 %

Kesimpulan

Arang aktif yang dihasilkan dari tempurung buah sawit yang sebelumnya telah melalui proses karbonisasi hidrotermal hampir semuanya dapat memenuhi standar mutu arang teknis SNI 06-3730-1995. Aktivasi terhadap arang hidro tempurung buah sawit menyebabkan tereduksinya berbagai gugus fungsi dan unsur-unsur selain karbon. Aktivasi juga meningkatkan keberadaan senyawa aromatik sebagai penyusun struktur heksagonal arang dan arang aktif, serta menimbulkan terbentuknya pori yang lebih banyak. Berdasarkan pengujian analisis keragaman terhadap respon, interaksi antara suhu dan waktu aktivasi memberikan pengaruh nyata hanya pada respon daya jerap formaldehida, sedangkan untuk respon yang lainnya sebaran datanya memiliki pengaruh linier ataupun kuadratik untuk suhu ataupun waktu aktivasi. Kondisi optimum untuk suhu dan waktu aktivasi berdasarkan keseluruhan respon yang diujikan berturut-turut adalah 787,85 °C selama 116,52 menit.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Beasiswa Pascasarjana Dalam Negeri (SAINTEK), Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia.

Daftar Pustaka

- Cochran WG, Cox GM. 1992. *Experimental Designs*. New York (US). John Wiley & Sons, Inc.
- Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian. 2016. *Statistik Perkebunan Indonesia 2015-2017 Kelapa Sawit*. Direktorat Jenderal Perkebunan – Kementerian Pertanian. Jakarta (ID).
- Falco C, Maco-Lozarr JP, Salinas-Torres D, Morallon E, Cazorla-Amoros D, Titirici MM, Lozano-Castello D. 2013. Tailoring the porosity of chemically activated hydrothermal carbons: influence of the precursor and hydrothermal carbonization temperature. *Carbon*. 62:246-355.
- Guo J, Luo Y, Lua AC, Chi RA, Chen YL, Bao XT, Xiang SX. 2007. Adsorption of hydrogen sulphide (H₂S) by activated carbons derived from oil-palm shell. *Carbon*. 45:330-336.
- Hambali E, Rivai M. 2017. The potential of palm oil waste biomass in Indonesia in 2020 and 2030. *IOP Conference Series: Earth and Env Sci*. 65:012050.
- Islam MA, Ahmed MJ, Khanday WA, Asif M, Hameed BH. 2017. Mesoporous activated coconut shell-derived hydrochar prepared via hydrothermal carbonization-NaOH activation for methylene blue adsorption. *J Env Manag*. 203:237-244.
- Jain A, Aravindan V, Jayaraman S, Kumar PS, Balasubramanian R, Ramakrishna S, Madhavi S, Srinivasan MP. 2013. Activated carbon derived from coconut shells as high energy density cathode material for Li-ion capacitors. *Sci Reports*. 3:3002.
- Jain A, Jayaraman S, Balasubramanian R, Srinivasan MP. 2014. Hydrothermal pre-treatment for mesoporous carbon synthesis: enhancement of chemical activation. *J Mater Chem A*. 2(2): 520-528.
- Jain A, Balasubramanian R, Srinivasan MP. 2015. Production of high surface area mesoporous activated carbons from waste biomass using hydrogen peroxide-mediate hydrothermal treatment for adsorption applications. *Chem Eng J*. 273: 622-629.

- Jain A, Balasubramanian R, Srinivasan MP. 2016. Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chem Eng J*. 283:789-805.
- Lee KK, Hao W, Gustafsson M, Tai CW, Morin D, Bjorkman E, Lilliestrale M, Bjorefors F, Andersson AM, Hedin N. 2016. Tailored activated carbon for supercapacitors derived from hydrothermally carbonized sugars by chemical activation. *RSC Advances*. 6:110629-110641.
- Nizamuddin S, Jayakumar NS, Sahu JN, Ganesan P, Bhutto AW, Mubarak NM. 2015. Hydrothermal carbonization of oil palm shell. *Korean J Chem Eng*. 32(9):1789-1797.
- Pari G. 2004. *Kajian struktur arang aktif dari serbuk gergaji kayu sebagai adsorben emisi formaldehida kayu lapis*. [Disertasi]. Program Studi Ilmu Pengetahuan Kehutanan. Bogor. Sekolah Pasca Sarjana IPB.
- Raposo F, Rubia MADL, Borja R. 2009. Methylene blue number as useful indicator to evaluate the absorptive capacity of granular activated carbon in batch mode: influence of adsorbate/adsorbent mass ratio and particle size. *J Hazard Mater*. 165(1-3):291-299.
- [SNI] Standar Nasional Indonesia. 1995. *Arang Aktif Teknis*. SNI 06-3730-1995. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional.
- Yang H, Yan R, Chen H, Lee DH, Zheng C. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*. 86:1781-1788.