

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/307720628>

# KARAKTERISASI STRUKTUR NANO KARBON DARI LIGNOSELLULOSA

Article in *Jurnal Penelitian Hasil Hutan* · March 2013

DOI: 10.20886/jphh.2013.31.1.75-91

CITATIONS

6

READS

2,616

9 authors, including:



**Gustan Pari**

Ministry of Forestry, Indonesia

172 PUBLICATIONS 1,267 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Adi Santoso**

pusat penelitian hasil hutan

61 PUBLICATIONS 390 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Djeni Hendra**

Queensland Government

39 PUBLICATIONS 357 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Buchari Buchari**

Bandung Institute of Technology

127 PUBLICATIONS 764 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

## KARAKTERISASI STRUKTUR NANO KARBON DARI LIGNOSELLULOSA (*Characterization on the Structures of Ligno-cellulose Nano Carbon*)

<sup>1)</sup>Gustan Pari, <sup>1)</sup>Adi Santoso, <sup>2)</sup>Djeni Hendra, <sup>2)</sup>Buchari, <sup>3)</sup>Akhirudin Maddu,  
<sup>3)</sup>Mamat Rachmat, <sup>4)</sup>Muji Harsini, <sup>5)</sup>Teddi Heryanto, & <sup>6)</sup>Saptadi Darmawan

<sup>1)</sup>Puslitbang Keteknikan Kehutanan dan Pengolahan Hasil Hutan, Bogor

<sup>2)</sup>Departemen Kimia, Institut Teknologi Bandung

<sup>3)</sup>Departemen Fisika, Institut Pertanian Bogor

<sup>4)</sup>Departemen Kimia, Universitas Airlangga Surabaya

<sup>5)</sup>Departemen Elektro, Politeknik Bandung

<sup>6)</sup>Balai Penelitian Teknologi HHBK, Mataram

email : gustanp@yahoo.com

Diterima 23 Desember 2011, disetujui 14 Februari 2013

### ABSTRACT

*The science advancement in this century is such that in the future it will enter the nano technology. More specifically in the forest products field, the nano technology that can be developed is among others nano carbon derived from lignocellulosic stuffs. In relevant, this research aims to provide information and technology on the charcoal processing from lignocellulosic stuffs into nano carbon.*

*The lignocellulosic stuffs used in this research consisted of teak wood and bamboo, further carbonized into charcoal at 400-500°C using drum kiln. The resulting charcoal was examined of its physical and chemical properties, crystallinity degree and dielectric characteristics, and then purified by re-carbonizing it at 800°C for 60 minutes. Prior to the purification, the charcoal sustained the doping (intercalation) process with Zn, Ni and Cu metals each respectively. After the purification, the charcoal was ground to very tiny particles using HEM (high energy machine) device for 48 hours. In this way, the charcoal with high crystallinity was yielded, and further sintered using spark plasma at 1,300°C into the nano carbon. The qualities and structure of all the resulting carbon (carbonized charcoal, re-carbonized charcoal, intercalated charcoal and sintered nano carbon) were evaluated using nano scale device (Py-GCMS, SEM-EDX and XRD), and examined as well of their dielectric characteristics.*

*It turns out that the best quality charcoal was obtained from teak wood charcoal carbonized at 800°C, intercalated with Ni atoms at the ratio 1:5. The resulting charcoal afforded high crystallinity (78.98%), low electric resistance (0.17  $\Omega$ ), and high conductivity 175.52  $\Omega^{-1}m^{-1}$ . Qualities of the corresponding nano carbon (after sintering) were such that its crystallinity spectacularly reached 81.87%, resistance (R) 0.01  $\Omega$  with very high conductivity 1067.26  $\Omega^{-1}m^{-1}$ . The nano carbon that resulted seems favorably prospective for bio-sensor, bio-battery, and bio-electrode. Accordingly further related research deserves carrying out.*

*Keywords: Carbon, spark plasma sintering, intercalation, ligno-cellulosic stuffs*

### ABSTRAK

Perkembangan ilmu pengetahuan abad ini dan yang akan datang sudah memasuki teknologi nano. Di bidang hasil hutan, teknologi nano yang dapat dikembangkan di antaranya adalah nano karbon dari bahan berlignoselulosa. Tujuan penelitian ini adalah menyediakan informasi dan teknologi pengolahan arang sebagai bahan baku nano karbon dari bahan lignoselulosa.

Bahan baku lignoselulosa yang digunakan dalam penelitian ini adalah kayu jati, dan bambu yang dikarbonisasi pada suhu 400-500°C menggunakan kiln drum, arang yang dihasilkan dimurnikan dengan jalan dipanaskan pada suhu 800°C selama 60 menit yang sebelumnya didoping dengan logam Zn, Ni dan Cu. selanjutnya dihaluskan menggunakan *high energy mechanic* (HEM) selama 48 jam. Arang dengan kristalinitas tinggi disintering menggunakan spark plasma pada suhu 1.300°C. Karbon yang dihasilkan diuji sktuktur dan sifatnya menggunakan Py-GCMS, SEM-EDX, XRD, dan sifat elektrik.

Hasil penelitian menunjukkan struktur karbon yang terbaik dihasilkan dari arang jati yang dikarbonisasi pada suhu 800°C yang didoping dengan atom Ni pada perbandingan 1:5 yang menghasilkan derajat kristalinitas sebesar 78,98% resistensi (R) 0,17 $\Omega$ , konduktivitas 175,52  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ . Kualitas nano karbon setelah disintering derajat kristalinitasnya menjadi 81,87%, resistensi (R) 0,01 $\Omega$ , dan konduktivitasnya sebesar 1067,26  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ . Nano karbon yang dihasilkan dapat dibuat sebagai biosensor, biobatere dan bioelektroda. Sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut.

Kata kunci : Karbon, spark plasma sintering, lignoselulosa

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pada abad ini dan yang akan datang sudah memasuki teknologi nano, suatu lompatan teknologi dengan memanfaatkan atau memanipulasi suatu bahan berukuran nano meter (satu per satu miliar meter) yang mempunyai fungsi sangat efisien bagi kehidupan di masa depan. Pada prinsipnya teknologi nano ini mengembangkan atau mengoptimalkan kemampuan dirinya sendiri (*self assembly*) berdasarkan reaksi kimia maupun interaksi dengan komponen bahan lainnya yang juga berskala nano berdasarkan atom-atom pembentuknya. Beberapa karakteristik keunggulan utama nano teknologi dengan ukurannya yang kecil di antaranya adalah munculnya fungsi suatu zat pada skala nano. Ranah penelitian nano teknologi diantaranya adalah 1. nanokomposit, 2. nanokristal, 3. nanopartikel, 4. nanostruktur, 5. nanokarbon, 6. nanokatalis, dan 7. nanofilter.

Di bidang hasil hutan, teknologi nano yang dapat dikembangkan di antaranya adalah nano karbon, teknologi yang banyak digunakan dalam industri elektronik, komputer, biosensor dan automobil dengan bahan baku utamanya atom karbon yang berasal dari arang hasil karbonisasi lignoselulosa dan tabung nano serat karbon (*carbon fiber nano tube*) suatu molekul karbon berbentuk pipa yang berstruktur unik dan mempunyai sifat yang dapat mengubah cahaya menjadi arus listrik, yang banyak digunakan pada layar beresolusi tinggi (Forest Products Zlaboratory. 2004). Bahan baku karbon yang

selama ini digunakan untuk keperluan tersebut di atas adalah grafit yang berasal dari bahan mineral tambang alam yang terbentuk jutaan tahun dan bersifat tidak “*renewable*”. Untuk itu perlu dicari suatu bahan baku yang bersifat lestari, yang dalam hal ini berasal dari lignoselulosa seperti kayu, sisal, abaka, tempurung kelapa dan tempurung biji lainnya yang mengandung karbon. Bahan baku yang berasal dari lignoselulosa ini dapat berupa limbah yang selama ini nilai tambahnya sangat minimal. Dengan dijadikannya produk nano karbon diharapkan limbah lignoselulosa yang berasal baik dari kehutanan maupun perkebunan dapat dibuat produk yang bernilai ekonomi tinggi. Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan derajat kristalinitas dan sifat dielektrik agar struktur heksagonal yang terbentuk lebih simetris dengan konduktifitas yang tinggi. Selama ini hasil penelitian struktur karbon yang terbentuk masih bersifat tidak beraturan dengan nilai resistensi yang tinggi. Sasaran penelitian ini adalah tersedianya karbon kemurnian tinggi yang sudah di interkalasi sebagai bahan baku nano karbon dari lignoselulosa.

## II. METODOLOGI

### A. Bahan dan Alat

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah bambu dan jati. Bahan kimia yang digunakan diantaranya adalah sodium tio sulfat, kanji, iodium, Ni, Cu, Zn dan lain-lain. Peralatan yang digunakan adalah kilndrum, *retort*

yang terbuat dari baja tahan karat yang dilengkapi dengan elemen listrik dan *spark plasma sintering* (SPS).

## B. Metode Penelitian

### 1. Pembuatan arang

Bahan bambu dan jati dengan ukuran 30x25 cm untuk jati dan 20x25 cm untuk bambu diarsang dalam tungku drum yang terbuat dari drum yang dimodifikasi. Bahan baku dimasukkan ke dalam *drum* pada bagian atas, kemudian dinyalakan dengan cara membakar bagian lubang udara yang terdapat pada bagian bawah. Sesudah bahan baku menyala, kiln ditutup dan cerobong asap dipasang. Pengarangan (karbonisasi) berlangsung pada suhu 400-500°C. Pengarangan dianggap selesai apabila asap yang keluar dari cerobong menipis dan berwarna kebiru-biruan, selanjutnya cerobong asap ditutup rapat.

### 2. Pemurnian arang

Arang yang dihasilkan selanjutnya dipirolisis dengan menggunakan retor yang terbuat dari baja tahan karat yang dilengkapi dengan elemen listrik. Proses peningkatan pemurnian arang dilakukan pada suhu 800°C selama 60 menit yang sebelumnya ditambah logam Zn, Ni dan Cu sebagai bahan untuk interkalasi dengan perbandingan berat/berat masing-masing sebesar 1:3 ; 1:4 ; dan 1:5 dan dihaluskan sampai ukuran nano. Proses pemurnian tersebut bertujuan antara lain meningkatkan derajat kristalinitas.

### 3. Sintering arang

Arang dengan kristalinitas tinggi tersebut selanjutnya disintering pada suhu 1300°C.

### 4. Pengujian kualitas

Kualitas arang di uji berdasarkan Standar Indonesia (Anonim, 1989) dan daya serap iodium ditetapkan berdasarkan Standar Indonesia (Dewan Standardisasi Nasional. 1995). yang meliputi penetapan kadar air, zat terbang, abu, karbon terikat. Arang kemurnian tinggi ini selajutnya juga dikarakterisasi struktur atom karbonnya dengan menggunakan SEM-EDX (Scanning electron microscope Energy disperse spectrophotometry), XRD (X-ray diffraction), Pyrolysis-GCMS (Gas chromatography mass spectrophotometry), dan sifat dielektrik.

## C. Rancangan Percobaan dan Analisis data

Data kualitas arang ditelaah dengan rancangan percobaan acak lengkap berpola faktorial (Sudjana, 1980). Sebagai faktor adalah suhu karbonisasi (A) dalam dua taraf 400°C (a1) dan 800°C (a2), dan macam bahan lignoselulosa yaitu jati (b1) dan bambu (b2) setiap taraf kombinasi faktor A dan B dilakukan ulangan sebanyak 2 kali.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Mutu Arang Hasil Karbonisasi

Mutu arang hasil karbonisasi pada suhu 400 dan 800°C tercantum pada Tabel 1, dan Tabel 2 menyajikan derajat kristalinitas dan sifat dielektrik arang.

#### 1. Rendemen

Arang yang di karbonisasi pada suhu 400°C -

**Tabel 1. Mutu arang pada suhu karbonisasi 400 dan 800°C**

*Table 1. Charcoal quality from carbonization temperature at 400 and 800°C*

| Bahan baku (Raw material) | Suhu (temperature) °C | Rendemen (Yield), % | Kadar air (Moisture content), % | Zat terbang (Volatile matter), % | Kadar abu (Ash content) % | Kadar karbon, (Carbon content), % | Daya serap iodium (Iod number), mg/g |
|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Jati ( <i>Teak</i> )      | 400                   | 19,33               | 6,49                            | 28,97                            | 1,69                      | 69,34                             | 283,48                               |
|                           | 800                   | 86,67               | 10,61                           | 18,85                            | 2,78                      | 78,37                             | 480,12                               |
| Bambu ( <i>Bamboo</i> )   | 400                   | 24,93               | 2,88                            | 24,47                            | 5,35                      | 70,22                             | 169,41                               |
|                           | 800                   | 73,67               | 9,11                            | 20,98                            | 8,22                      | 70,80                             | 604,69                               |

800°C menghasilkan rendemen antara 19,33 - 86,67% (Tabel 1). Berdasarkan analisis sidik ragam (Lampiran 1) ternyata suhu karbonisasi, jenis bahan baku dan interaksinya sangat berpengaruh terhadap rendemen arang yang dihasilkan. Rendemen terendah terdapat pada arang kayu jati yang dikarbonisasi pada suhu 400°C dan yang tertinggi dihasilkan dari arang kayu jati yang dikarbonisasi pada suhu 800°C. Rendahnya rendemen arang jati yang dikarbonisasi suhu 400°C disebabkan oleh karena berat jenis jati (0,635) yang diteliti lebih rendah dari bambu (0,687). Perbedaan berat jenis berlignoselulosa ini juga dipengaruhi antara lain tebal dinding serat dan komposisi kimia (kadar selulosa, hemiselulosa dan lignin). Lebih rendahnya rendemen arang bambu dibandingkan dengan arang jati pada suhu 800°C diduga terkait dari karakteristik bahan baku bambu (monokotil) lebih banyak jaringan bukan serat dan ber dinding tipis (parenkhim) sehingga lebih rentan terhadap suhu karbonisasi dibandingkan kayu jati (dikotil).

## 2. Kadar air

Kadar air berkisar antara 2,88-10,61% (Tabel 1). Berdasarkan analisis sidik ragam (Lampiran 1) ternyata suhu karbonisasi, jenis bahan baku dan interaksinya sangat berpengaruh terhadap kadar air arang yang dihasilkan. Kadar air terendah terdapat pada arang bambu yang dikarbonisasi pada suhu 400°C dan yang tertinggi dihasilkan dari arang kayu jati yang dikarbonisasi pada suhu 800°C. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan

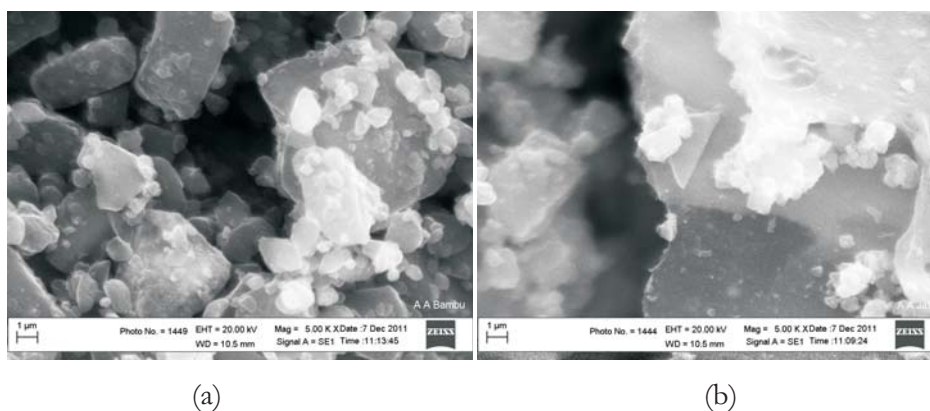
porositas dan sifat higroskopis arang serta pori yang terbentuk, semakin banyak pori yang terbentuk maka arang yang dihasilkan juga akan bersifat poros (Gambar 2) sehingga kemampuan menyerap uap air dari udara juga lebih besar. Rata-rata diameter pori arang yang terbentuk untuk arang jati sebesar 10,38  $\mu\text{m}$  dan arang bambu sebesar 7,25  $\mu\text{m}$

## 3. Kadar abu

Kadar abu berkisar antara 1,69-8,22% (Tabel 1). Berdasarkan analisis sidik ragam (Lampiran 1) ternyata suhu karbonisasi, jenis bahan baku dan interaksinya sangat berpengaruh terhadap kadar abu arang yang dihasilkan. Kadar abu terendah terdapat pada arang kayu jati yang dikarbonisasi pada suhu 400°C dan yang tertinggi dihasilkan dari arang bambu yang dikarbonisasi pada suhu 800°C. Besarnya kadar abu arang bambu ini selain disebabkan oleh kandungan silika yang terdapat pada bambu juga karena silika tersebut banyak yang teroksidasi terutama dari partikel yang berupa serbuk menjadi  $\text{SiO}_2$  (Gambar 1).

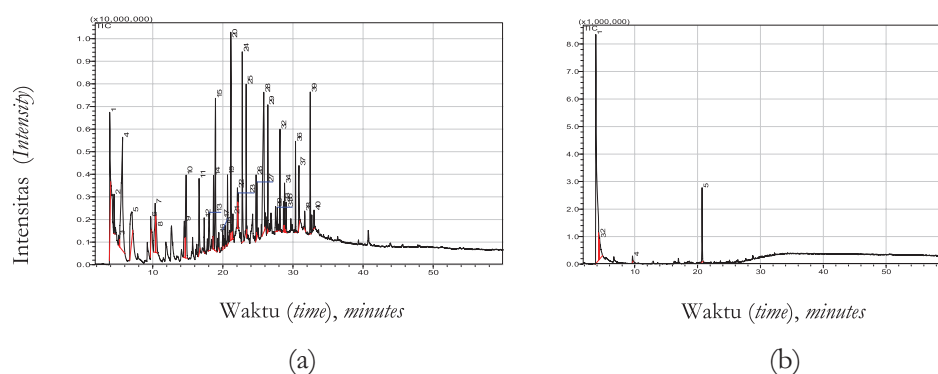
## 4. Kadar zat terbang

Kadar zat terbang berkisar antara 18,85-28,97% (Tabel 1). Berdasarkan analisis sidik ragam (Lampiran 1) ternyata suhu karbonisasi, jenis bahan baku dan interaksinya sangat berpengaruh terhadap kadar zat terbang arang yang dihasilkan. Kadar volatile terendah terdapat pada arang kayu jati yang dikarbonisasi pada suhu 800°C dan yang tertinggi dihasilkan dari arang jati yang dikarbonisasi pada suhu 400°C. Hal ini



**Gambar 1. Penampakan visual abu pada (a) arang bambu, dan (b) arang jati**

**Figure 1. The visual appearance of ash at consecutively (a) bamboo charcoal and (b) teak charcoal**



**Gambar 2. Kromatogram mengindikasikan senyawa zat terbang pada permukaan (a) bahan baku dan (b) arang suhu 800°C**

**Figure 2. Chromatograph strongly indicates the volatile compound presence at the surface of lignocellulosic (a) raw material and (b) the corresponding charcoal at 800°C**

menunjukkan pemanasan ulang pada suhu yang lebih tinggi menyebabkan senyawa zat terbang yang menempel pada permukaan arang keluar menjadi bentuk gas. Namun demikian hasil analisis pyrolysis GCMS menunjukkan arang yang dipanaskan pada suhu 800°C senyawa zat terbang yang menempel pada permukaan arang tinggal 4 senyawa dari 53 komponen senyawa kimia yaitu benzene, naphthalen,  $\text{CO}_2$  dan toluen (Gambar 2 dan Lampiran 2). Hasil ini sedikit berbeda dengan yang dilakukan oleh Suzuki, *et al.* (2007) yang melakukan karbonisasi pada suhu 900°C yang menyatakan proses karbonisasi bertingkat tidak ada turunan senyawa kimia dari ter yang menempel pada permukaan arang, namun dilaporkan pada permukaannya masih mempunyai senyawa hidrogen.

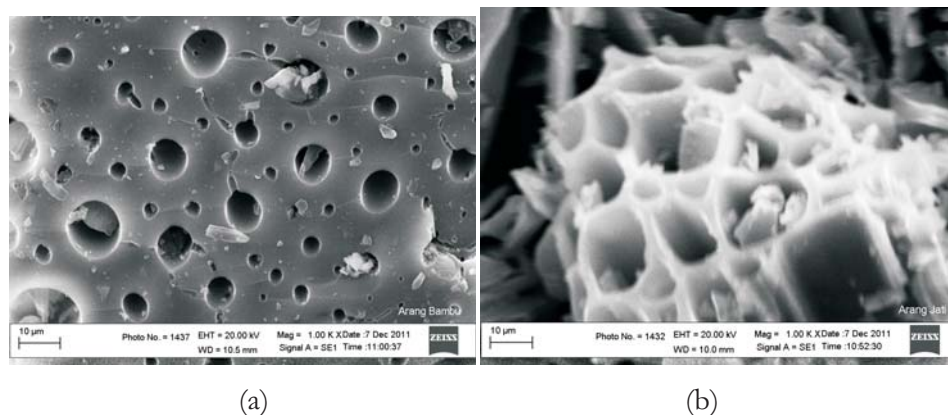
#### 5. Kadar karbon

Kadar karbon berkisar antara 69,34-78,37% (Tabel 1). Berdasarkan pencermatan sidik ragam (Lampiran 1) ternyata suhu karbonisasi, jenis bahan baku dan interaksinya sangat berpengaruh terhadap kadar karbon arang yang dihasilkan. Kadar karbon terendah terdapat pada arang kayu jati yang dikarbonisasi pada suhu 400°C dan yang tertinggi dihasilkan dari arang kayu jati yang dikarbonisasi pada suhu 800°C. Perbedaan ini lebih disebabkan oleh besarnya kadar abu dan senyawa volatile yang menempel pada permukaan arang. Juga kadar karbon meningkat dengan semakin tingginya suhu karbonisasi, karena intensitas karbonisasi meningkat pula.

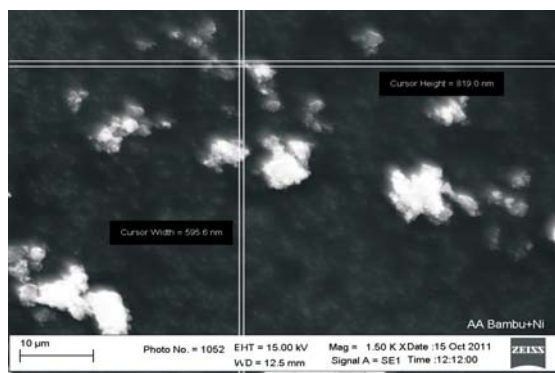
#### 6. Daya serap iodium

Daya serap terhadap iodium berkisar antara 169,41 - 604,69 mg/g (Tabel 1). Berdasarkan analisis sidik ragam (Lampiran 1) ternyata suhu karbonisasi, jenis bahan baku dan interaksinya sangat berpengaruh terhadap daya serap iodium arang yang dihasilkan. Daya serap terendah terdapat pada arang bambu yang dikarbonisasi pada suhu 400°C dan yang tertinggi dihasilkan dari arang bambu yang dikarbonisasi pada suhu 800°C. Tingginya daya serap iodium ini menggambarkan luas permukaan arang yang dihasilkan tinggi, sehingga aliran elektron di dalam struktur karbon yang berbentuk heksagonal lebih banyak, selain itu menunjukkan juga bahwa pori yang berukuran 10 angstrom banyak terbentuk setelah proses pemurnian di mana fenomena tersebut agaknya banyak terjadi pada arang bambu pada suhu 800°C (Gambar 3). Dari hasil topografi permukaan arang juga nampak pori yang berukuran makropori. Hasil ini sama dengan yang dilakukan oleh Suzuki, *et al.* (2007) yang juga menemukan proses karbonisasi bertingkat membentuk pori yang berukuran makropori.

Hasil topografi permukaan arang yang di interkalasi dengan atom logam baik itu nikel, seng maupun tembaga, pori yang terbentuk tidak nampak. Hal ini disebabkan karena atom logam yang ditambahkan berukuran nano dan masuk ke dalam pori arang sehingga menutupi pori yang sudah terbentuk (Gambar 4).



**Gambar 3. Topografi pori arang dari (a) bambu dan (b) jati**  
**Figure 3. Topographic of pores from (a) bamboo and (b) teak charcoal**



**Gambar 4. Profil arang yang di interkalasi atom logam**  
**Figure 4. Profile of charcoal after being intercalated with metallic atom**

**Tabel 2. Derajat kristalinitas dan sifat dielektrik arang**  
**Table 2. Crystallinity degree and dielectric properties of charcoal**

| Bahan baku<br>(Raw material)                     | Suhu karbonisasi,<br>(Carbonization<br>temperature), °C | Derajat<br>kristalinitas<br>(Crystallinity<br>degree), % | Resistensi,<br>(Resistance),<br>Ω | Konduktivitas<br>(Conductivity)<br>Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Jati ( <i>teak</i> )                             | 400                                                     | 20,22                                                    | 18,5 MΩ                           | 3,85 x 10 <sup>-6</sup>                                            |
|                                                  | 800                                                     | 60,25                                                    | 0,95                              | 81,71                                                              |
| Bambu ( <i>bamboo</i> )                          | 400                                                     | 51,63                                                    | >100M Ω                           | 4,50 x 10 <sup>-9</sup>                                            |
|                                                  | 800                                                     | 59,39                                                    | 1,05                              | 77,72                                                              |
| Spark plasma sintering<br>(SPS)                  | 1300                                                    | 81,75                                                    | 0,01                              | 1067,25                                                            |
| Komersial dlm negri<br>(Commercial for domestic) | -                                                       | 71,15                                                    | 2,50                              | 2,59                                                               |
| Komersial luar negri<br>(Commercial for abroad)  | -                                                       | 90,48                                                    | 0,16                              | -                                                                  |

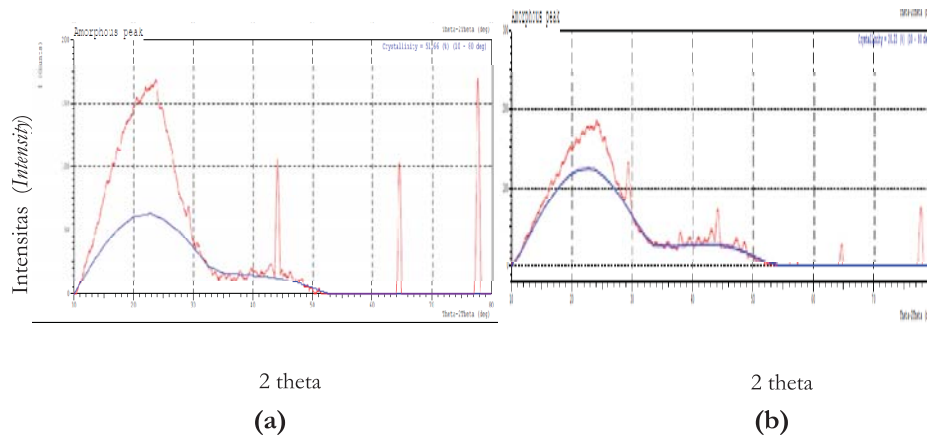
## B. Struktur Atom Karbon Dalam Arang

### 1. Derajat kristalinitas

Derajat kristalinitas arang yang dikarbonisasi pada suhu  $400^{\circ}\text{C}$  berkisar antara 20,22-51,63% (Tabel 2). Derajat kristalinitas bambu lebih tinggi dari jati. Hal ini diduga karena kandungan selulosa bambu (50,53%) yang lebih besar dibandingkan pada jati (46,56%). Derajat kristalinitas yang rendah menunjukkan bahwa arang yang terbentuk memiliki lapisan antar aromatiknya tidak beraturan. Arang yang dikarbonisasi pada suhu  $800^{\circ}\text{C}$  tingkat keteraturan kristalnya lebih besar berkisar antara 59,39-60,25% (Tabel 2). Hal ini mengindikasikan struktur yang terbentuk sudah lebih kristalin, antar lapisan aromatiknya lebih teratur. Tingginya

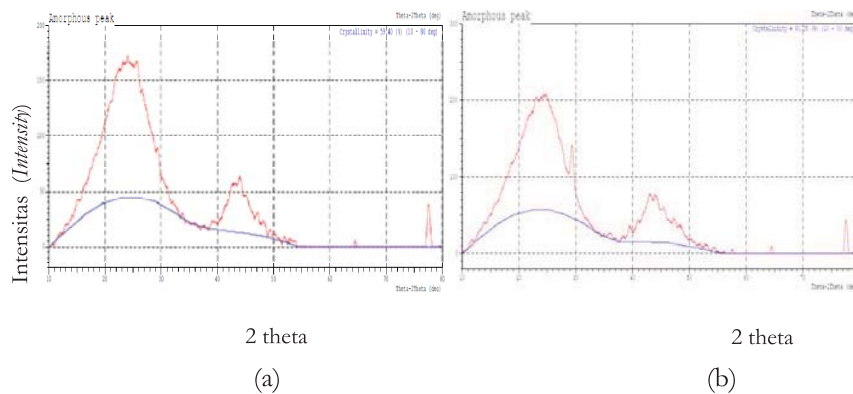
derajat kristalinitas ini menggambarkan juga telah terjadi penataan ulang atom karbon dalam kisi heksagonal arang yang dicirikan dengan tingginya intensitas (Gambar 6 dan 7).

Derajat kristalinitas untuk arang yang di interkalasi logam berkisar antara 34,20-78,98% (Tabel 3 dan Lampiran 3). Derajat kristalinitas terendah terdapat pada arang bambu yang di interkalasi Cu dengan perbandingan 1:4 dan yang tertinggi terdapat pada arang kayu jati yang di doping Ni dengan perbandingan 1:5. Tingginya derajat kristalinitas ini menunjukkan telah terjadi interkalasi di mana senyawa logam yang ditambahkan masuk ke dalam kisi struktur arang dan menimbulkan cacat kristal. Hal ini ditunjukkan dengan berubahnya pola intensitas



**Gambar 6.** Difraktogram arang (a) bambu dan (b) jati yang dikarbonisasi suhu  $400^{\circ}\text{C}$

**Figure 6.** Diffractograph revealing the pattern of charcoal from (a) bamboo and (b) teak carbonized at temperature  $400^{\circ}\text{C}$



**Gambar 7.** Difraktogram arang (a) bambu dan (b) jati yang dikarbonisasi suhu  $800^{\circ}\text{C}$

**Figure 7.** Diffractograph revealing the pattern of charcoal from (a) bamboo and (b) teak carbonized at temperature  $800^{\circ}\text{C}$

**Tabel 3. Derajat kristalinitas dan sifat dielektrik arang yang di interkalasi Cu, Ni dan Zn****Table 3. Crystallinity degree and dielectric properties of charcoal after being intercalated with consecutively Cu, Ni and Zn**

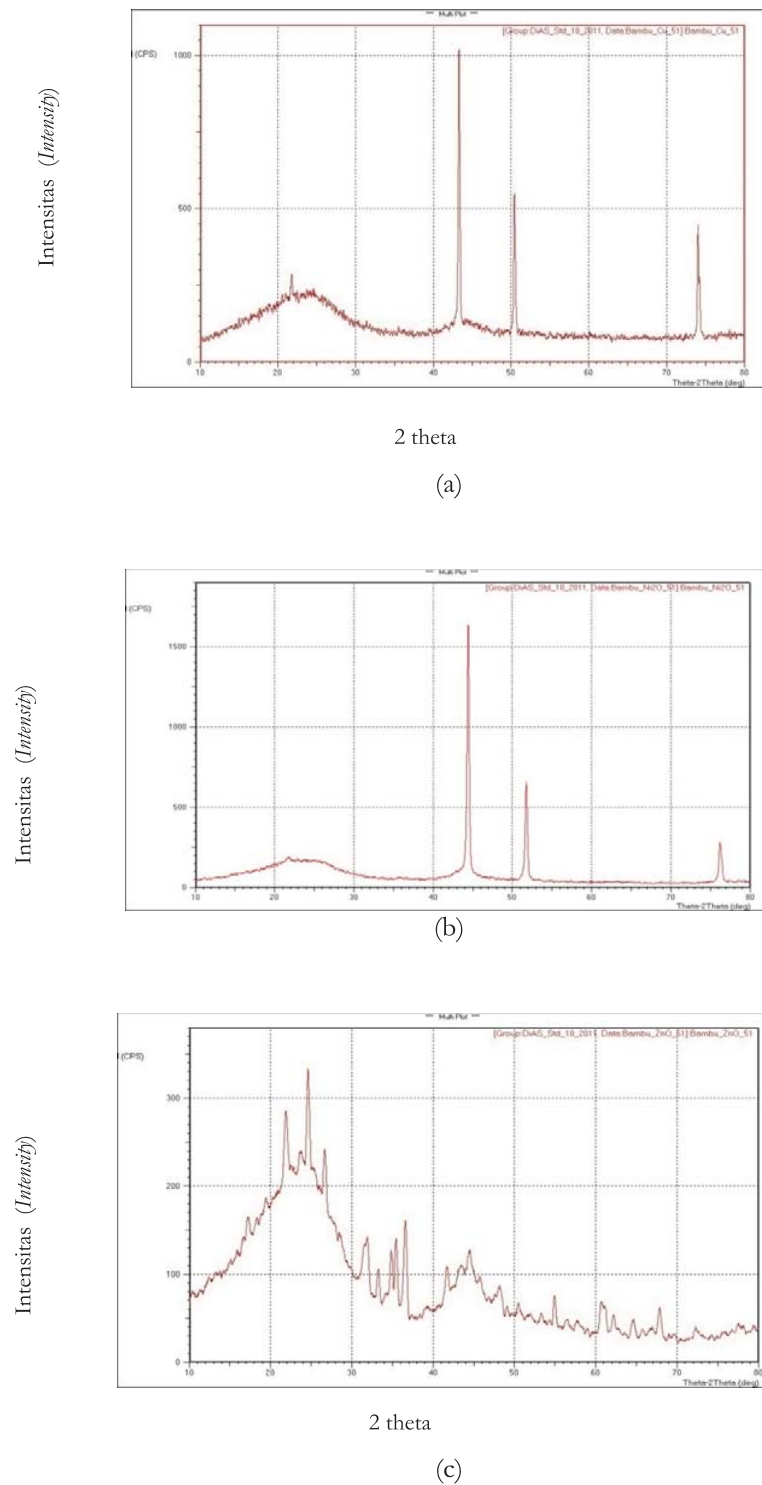
| Perbandingan<br>(Comparison) | Bahan baku<br>(Raw material) | Suhu karbonisasi,<br>(Carbonization<br>temperature), °C | Derajat<br>kristalinitas<br>(Crystallinity<br>degree), % | Resistensi,<br>(Resistance),<br>$\Omega$ | Konduktivitas<br>(Conductivity)<br>$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1:3                          | Jati                         | 800 - Cu                                                | 65,87                                                    | 0,11                                     | 161,42                                                        |
|                              |                              | 800 - Ni                                                | 60,12                                                    | 0,11                                     | 714,75                                                        |
|                              |                              | 800 - Zn                                                | 45,37                                                    | 0,99                                     | 707,71                                                        |
|                              | Bambu                        | 800 - Cu                                                | 45,04                                                    | 0,18                                     | 309,6                                                         |
|                              |                              | 800 - Ni                                                | 63,95                                                    | 0,18                                     | 503,1                                                         |
|                              |                              | 800 - Zn                                                | 53,24                                                    | 0,19                                     | 432,1                                                         |
| 1:4                          | Jati                         | 800 - Cu                                                | 37,27                                                    | 0,15                                     | 68,74                                                         |
|                              |                              | 800 - Ni                                                | 78,89                                                    | 0,17                                     | 175,52                                                        |
|                              |                              | 800 - Zn                                                | 53,02                                                    | 0,23                                     | 71,03                                                         |
|                              | Bambu                        | 800 - Cu                                                | 34,20                                                    | 0,14                                     | 67,35                                                         |
|                              |                              | 800 - Ni                                                | 53,84                                                    | 0,09                                     | 121,30                                                        |
|                              |                              | 800 - Zn                                                | 55,21                                                    | 0,19                                     | 236,22                                                        |
| 1:5                          | Jati                         | 800 - Cu                                                | 47,52                                                    | 0,26                                     | 31,29                                                         |
|                              |                              | 800 - Ni                                                | 78,98                                                    | 0,08                                     | 118,20                                                        |
|                              |                              | 800 - Zn                                                | 71,99                                                    | 0,20                                     | 46,25                                                         |
|                              | Bambu                        | 800 - Cu                                                | 49,32                                                    | 0,10                                     | 89,61                                                         |
|                              |                              | 800 - Ni                                                | 75,21                                                    | 0,20                                     | 41,51                                                         |
|                              |                              | 800 - Zn                                                | 55,18                                                    | 0,11                                     | 92,55                                                         |

terutama pada daerah theta 26 dan 43 derajat yang merupakan pola yang khas pada struktur arang (Gambar 8 dan 9). Namun demikian dilihat dari intensitas puncak yang dihasilkan masih rendah, sehingga perlu disempurnakan dibandingkan intensitas arang buatan luar negeri (Gambar 11).

Secara struktur atom logam yang masuk ke dalam atom karbon dan berinterkalasi adalah atom nikel, sedangkan untuk atom tembaga hanya masuk ke dalam struktur kristal 002 (theta 43) dan untuk seng atomnya sudah masuk ke dalam struktur kristal 100 dan 002 tetapi polanya belum kristalin (Gambar 8 dan 9). Apabila pola difraktogram ini dibandingkan dengan pola arang komersial buatan dalam negeri, hasilnya tidak jauh berbeda (Gambar 10), namun apabila dibandingkan dengan pola difraktogram arang nano dari luar negeri masih jauh lebih rendah (Gambar 11). Meskipun demikian apabila dilihat nilai resistensinya, arang hasil penelitian jauh lebih baik (Tabel 2). Pola yang diinginkan adalah

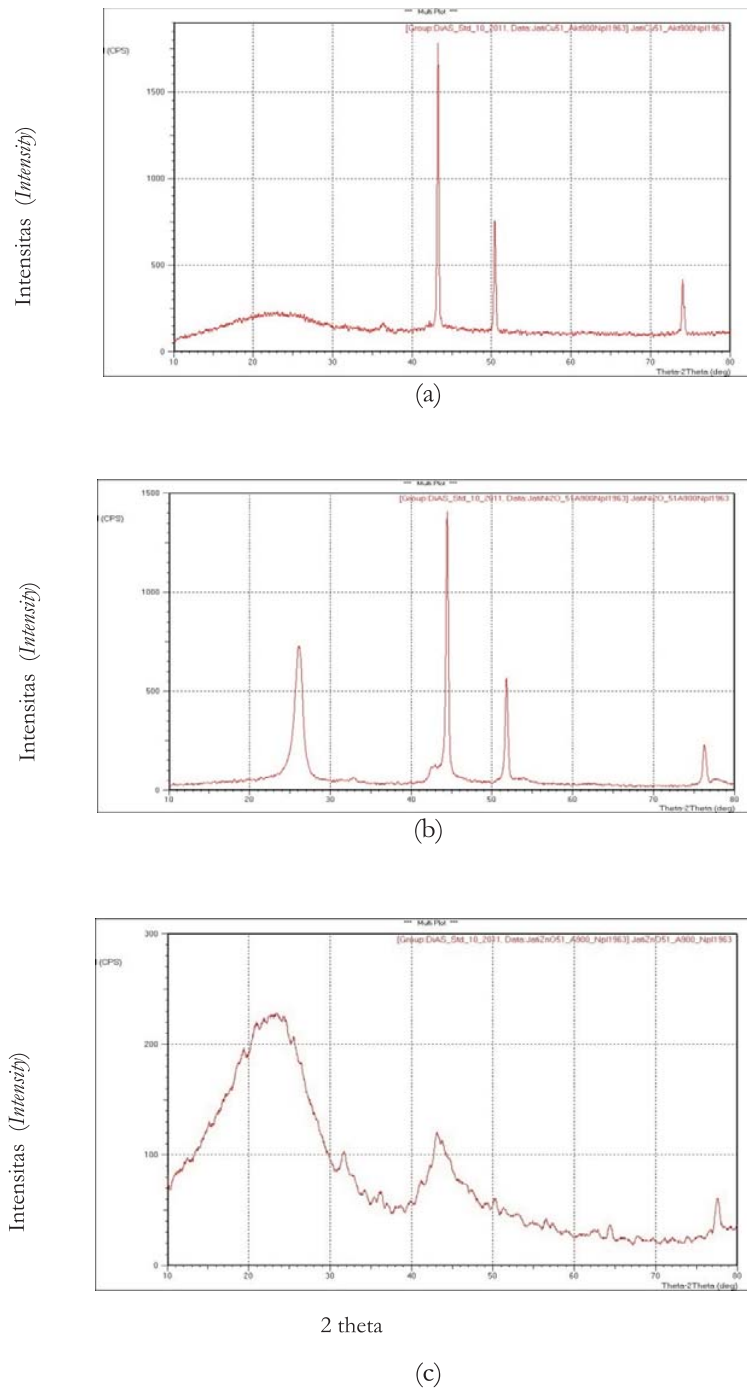
gabungan antara yang diinterkalasi dengan Ni, dan Zn seperti pada arang komersial luar negeri. Khusus untuk karbon yang di interkalasi dengan Ni polanya sama dengan hasil penelitian Liu, *et al.* (2009) yang menunjukkan adanya pola difraksi yang khas pada theta sekitar 44,5; 51,8 dan 76,4°. Dengan masuknya sejumlah nikel ke dalam karbon dapat meningkatkan kapasitansi spesifiknya bila digunakan pada kapasitor elektrokimia (Huang, *et al.* 2007).

Arang yang disintering pada suhu 1300°C dengan menggunakan spark plasma sintering (SPS), derajat kristalinitasnya meningkat menjadi 81,87% (Tabel 12). Hal ini lebih menunjukkan bahwa makin tinggi suhu karbonisasi maka tingkat keteraturan sistem kristalnya makin sempurna susunan antar lapisan aromatiknya lebih simetris dan kristalin. Masuknya atom logam ke dalam struktur karbon juga ditunjukkan dengan hasil identifikasi EDS (energy disperse spectrophotometry) yang



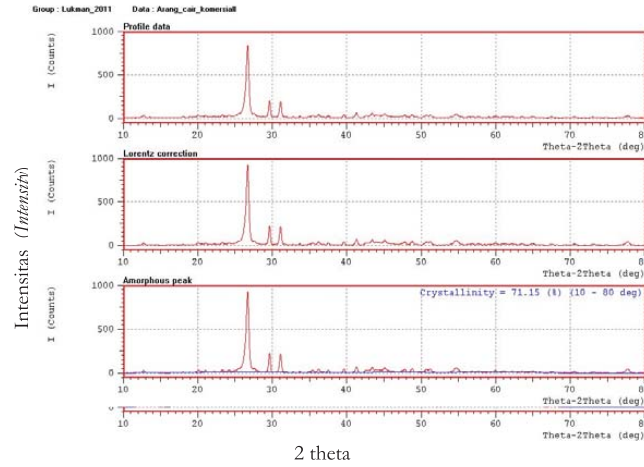
**Gambar 8.** Difraktogram arang bambu yang di interkalasi dengan berturut-turut (a) Cu, (b) Ni dan (c) Zn

*Figure 8. Diffractograph revealing the pattern of bamboo charcoal after being intercalated consecutively with (a) Cu, (b) Ni and (c) Zn*

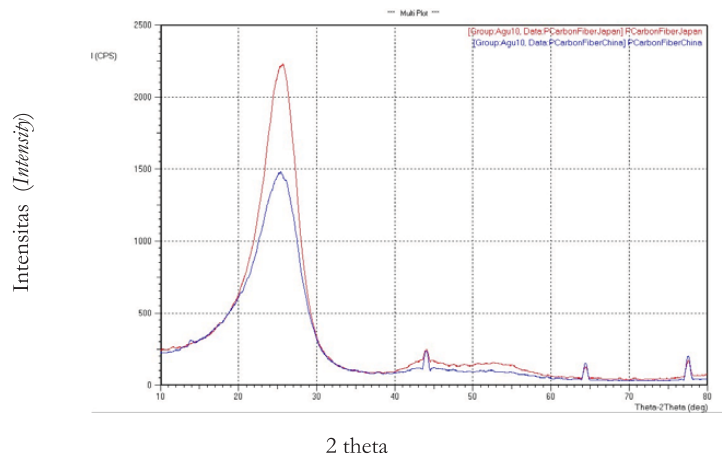


**Gambar 9.** Difraktogram arang jati yang di interkalasi dengan berturut-turut (a) Cu, (b) Ni dan (c) Zn

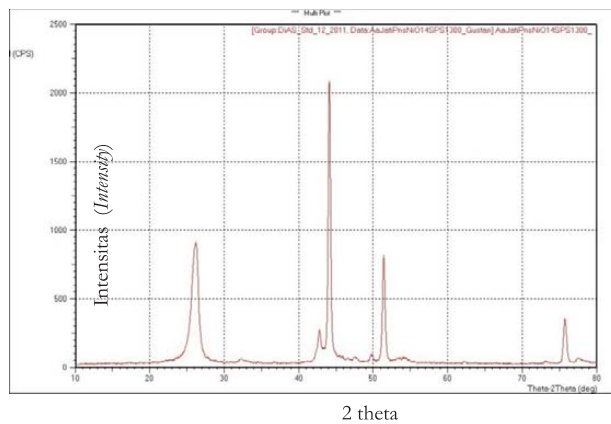
*Figure 9. Diffractograph revealing the pattern of teak charcoal after being intercalated consecutively with (a) Cu, (b) Ni and (c) Zn*



**Gambar 10. Difraktogram arang komersial buatan Indonesia**  
*Figure 10. Diffractograph of commercial charcoal manufactured by Indonesian company*



**Gambar 11. Difraktogram arang komersial buatan luar negeri**  
*Figure 11. Diffractograph of commercial charcoal manufactured by foreign company*



**Gambar 12. Difraktogram arang yang disintering pada suhu 1300°C**  
*Figure 12. Diffractograph of charcoal sintered at temperature 1300°C*

menunjukkan senyawa tersebut berinterkalasi ke dalam struktur heksagonal arang (Lampiran 3). Derajat kristalinitas yang dihasilkan tidak jauh berbeda apabila dibandingkan dengan arang komersial buatan dalam negeri sebesar 71,15%, tetapi masih rendah jika dibandingkan dengan arang komersial buatan luar negeri yang berbentuk serat sebesar 90,48% untuk buatan China dan 97,28% buatan Jepang.

## 2. Sifat dielektrik

Arang yang dikarbonisasi pada suhu 400°C resistensinya berkisar antara >100 -18,5 mega  $\Omega$  (Tabel 3). Arang kayu jati nilai tahanannya lebih rendah dibandingkan arang bambu. Hal ini menunjukkan arang tersebut belum bersifat sebagai konduktor, sedangkan arang kayu jati yang dikarbonisasi suhu 800°C nilai tahanannya menjadi 0,95-1,95  $\Omega$  (Tabel 3). Tahanan yang terendah terdapat pada arang kayu jati dan yang tertinggi pada arang bambu. Lebih rendahnya resistensi arang kayu jati dan bambu pada suhu karbonisasi 800°C menunjukkan senyawa zat terbang yang menempel pada permukaan arang telah banyak yang teruapkan (Tabel 1) namun masih bersifat semi konduktor. Arang yang diinterkalasi dengan logam menghasilkan resistensi antara 0,09 - 0,99  $\Omega$ . Tahanan yang paling rendah terdapat pada arang bambu yang didoping Ni dengan perbandingan 1:4 dan yang tertinggi terdapat pada arang kayu jati yang di doping dengan Zn dengan perbandingan 1:3.

Konduktivitas merupakan ukuran kemampuan suatu material menghantarkan arus listrik. Suatu bahan dengan konduktivitas makin tinggi maka bahan tersebut sudah bersifat konduktor dan apabila dihubungkan dengan nilai tahanannya yang sangat rendah maka material arang yang diinterkalasi dengan nikel mempunyai kemampuan untuk menghantarkan elektron tanpa hambatan. Konduktivitas arang jati meningkat dari  $3,85 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (suhu 400°C) menjadi  $81,71 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (suhu 800°C) (Tabel 2) dan setelah diinterkalasi konduktivitas yang paling tinggi adalah arang kayu jati yang di doping atom nikel dengan perbandingan 1:3 menjadi  $714,75 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (Tabel 3). Konduktivitas arang bambu meningkat dari  $4,50 \times 10^{-9} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (suhu 400°C) menjadi  $77,72 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (suhu 800°C) dan setelah

diinterkalasi konduktivitas yang paling tinggi adalah arang kayu jati yang di doping atom nikel dengan perbandingan 1:3 menjadi  $503,1 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (Tabel 3). Berdasarkan sifat ini arang yang diinterkalasi dan disintering dapat diolah lebih lanjut menjadi bahan biosensor, biobatere dan bioelektroda.

Arang yang disintering (SPS) pada suhu 1300°C nilai tahanannya menjadi 0,01  $\Omega$  dan konduktivitas sebesar  $1067,26 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (Tabel 2). Arang nano yang dihasilkan ini sudah bersifat sebagai konduktor karena nilai tahanannya rendah. Berdasarkan sifat ini arang yang di interkalasi dengan nikel dapat diolah lebih lanjut menjadi bahan biosensor, biobatere dan bioelektroda (Carbo, 2010).

## IV. KESIMPULAN

Derajat kristalinitas arang kayu jati meningkat dari 20,22% (suhu 400°C) menjadi 60,25% (suhu 800°C) dan setelah diinterkalasi diperoleh kristalinitas yang paling tinggi adalah arang kayu jati yang di doping atom nikel dengan perbandingan 1:5 menjadi 78,89%. Derajat kristalinitas arang bambu meningkat dari 51,63% (suhu 400°C) menjadi 59,39% (suhu 800°C) dan setelah diinterkalasi kristalinitas yang paling tinggi adalah arang kayu jati yang di doping atom nikel dengan perbandingan 1:5 menjadi 75,21%.

Konduktivitas arang kayu jati meningkat dari  $3,85 \times 10^{-6} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (suhu 400°C) menjadi  $81,71 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (suhu 800°C) dan setelah diinterkalasi konduktivitas yang paling tinggi adalah arang kayu jati yang didoping atom nikel dengan perbandingan 1:3 menjadi  $714,75 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ . Konduktivitas arang bambu meningkat dari  $4,50 \times 10^{-9} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (suhu 400°C) menjadi  $77,72 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  (suhu 800°C) dan setelah diinterkalasi konduktivitas yang paling tinggi adalah arang kayu jati yang di doping atom nikel dengan perbandingan 1:3 menjadi  $503,1 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ .

Arang yang disintering dengan Spark Plasma Sintering (SPS) derajat kristalinitasnya meningkat menjadi 81,87% dengan nilai tahanan (R) sebesar 0,01 $\Omega$  dan konduktivitas sebesar  $1067,26 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- Dewan Standardisasi Nasional. 1989. Arang kayu. Standar Nasional Indonesia (SNI) 01-1683-1989. Dewan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Dewan Standardisasi Nasional. 1995. Arang aktif tekniskayu. Standar Nasional Indonesia (SNI) 06-3730-1995. Dewan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Forest Products Zlaboratory. 2004. Nanotechnology for the forest products industry: Vision and technology roadmap. Nanotechnology Workshop for The Forest Products Industry. Forest Products Zlaboratory, Madison.
- Carbo, A. D. 2010. Electrochemistry of porous materials. CRC Press. New York.
- Huang, Q., Wang, X., Li, J., Dai, C., Gamboa, S., and P.J. Sebastian. 2007. Nickel hydroxide/activated carbon composite electrode for electrochemical capacitors. *Journal of Power Sources*. 164: 425-429.
- Liu, Y., Teng, H., Hou, H., and T. You. 2009. Nanoenzymatic glucose sensor based on renewable electrospun Ni nanoparticle-loaded carbon nanofiber paste electrode. *Journal of Biosensors and Bioelectronics* 24: 3329-3334.
- Sudjana. 1980. Disain dan eksperimental analisis. Tarsito, Bandung.
- Suzuki, K., Yamada, T and T. Suzuki. 2007. Nickel-catalyzed carbonization of wood for co-production of functional carbon and fluid fuel: Production of dual functional nano-carbon by two steps carbonization. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*. 56 (4): 339-344.

**Lampiran 1. Ringkasan analisa sidik ragam mutu arang**

**Appendix 1. Summarized of analysis of variance on charcoal quality**

| No | Sifat ( <i>Properties</i> )                        | Perlakuan<br>( <i>Treatment</i> ) | Kuadrat tengah<br>( <i>Mean square</i> ) | F-hitung<br>( <i>F-calculated</i> ) |
|----|----------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | Rendemen<br>( <i>Yield</i> ), %                    | A                                 | 6737,28                                  | 1,03x10 <sup>6**</sup>              |
|    |                                                    | B                                 | 27,38                                    | 4,2x10 <sup>4**</sup>               |
|    |                                                    | AB                                | 172,98                                   | 2,66x10 <sup>5**</sup>              |
| 2  | Kadar air<br>( <i>Moisture content</i> ), %        | A                                 | 53,56                                    | 267806**                            |
|    |                                                    | B                                 | 13,05                                    | 6528**                              |
|    |                                                    | AB                                | 2,22                                     | 11130**                             |
| 3  | Kadar abu<br>( <i>Asb content</i> ), %             | A                                 | 7,86                                     | 48373**                             |
|    |                                                    | B                                 | 41,35                                    | 254520**                            |
|    |                                                    | AB                                | 1,59                                     | 9803**                              |
| 4  | Kadar zat terbang<br>( <i>Volatile matter</i> ), % | A                                 | 92,61                                    | 463080**                            |
|    |                                                    | B                                 | 2,81                                     | 14042**                             |
|    |                                                    | AB                                | 21,97                                    | 109892**                            |
| 5  | Kadar karbon<br>( <i>Carbon content</i> ), %       | A                                 | 46,27                                    | 231631**                            |
|    |                                                    | B                                 | 22,44                                    | 112225**                            |
|    |                                                    | AB                                | 35,61                                    | 178084**                            |
| 6  | Daya serap iodium<br>( <i>Iod number</i> ), mg/g   | A                                 | 346045                                   | 1,73x10 <sup>9**</sup>              |
|    |                                                    | B                                 | 22155                                    | 1,10x10 <sup>8**</sup>              |
|    |                                                    | AB                                | 96203                                    | 4,81x10 <sup>8**</sup>              |

Keterangan (*Remarks*): A = Suhu (*Temperature*) (400 dan 800°C), B = Bahan baku (*Raw material*); AB = Interaksi (*Interaction*), \*\* = Sangat nyata (*Highly significant*); \* = Nyata (*Significant*)

**Lampiran 2. Komponen senyawa zat terbang organik (a) bahan baku, (b) arang dan (c) arang interkalasi**

**Appendix 2. Volatile organic compound (a) raw material, (b) charcoal and (c) intercalation charcoal**

| No<br>(No)                          | Waktu retensi<br>(Retention time) | Area<br>(Area) | Konsentrasi, %<br>(Concentration) | Nama senyawa<br>(Compound name)                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>A. Bahan baku (Raw material)</b> |                                   |                |                                   |                                                   |
| 1                                   | 3.900                             | 30972739       | 5.24                              | Carbon dioxide (CAS) Dry ice                      |
| 2                                   | 4.155                             | 25807830       | 4.36                              |                                                   |
| 3                                   | 4.500                             | 2506929        | 0.42                              | 2-Butanone (CAS) Methyl ethyl ketone              |
| 4                                   | 5.147                             | 3243629        | 0.55                              |                                                   |
| 5                                   | 5.545                             | 41148385       | 6.96                              | Acetic acid (CAS) Ethylic acid                    |
| 6                                   | 6.911                             | 47061524       | 7.95                              | 2-Propanone, 1-hydroxy- (CAS) Acetol              |
| 7                                   | 9.741                             | 15504892       | 2.62                              | 2-Propanone, 1-hydroxy- (CAS) Acetol              |
| 8                                   | 10.238                            | 12771210       | 2.16                              | Butanedial (CAS) Succinaldehyde                   |
| 9                                   | 10.347                            | 21532230       | 3.64                              | Propanoic acid, 2-oxo-, methyl ester (CAS)        |
| 10                                  | 12.671                            | 7297072        | 1.23                              | 2-Furanmethanol (CAS) Furfuryl alcohol            |
| 11                                  | 14.463                            | 13477152       | 2.28                              | 2(5H)-FURANONE                                    |
| 12                                  | 14.735                            | 26770479       | 4.52                              | 1,2-CYCLOPENTANEDIONE                             |
| 13                                  | 16.612                            | 7596170        | 1.28                              | Piperazine, 2,3-dimethyl-5-(2-methylpropyl)       |
| 14                                  | 17.307                            | 6639139        | 1.12                              | 2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl- (CAS)    |
| 15                                  | 18.002                            | 8911625        | 1.51                              | 5-HYDROXYMETHYL-DIHYDRO-FURAN-2-one               |
| 16                                  | 18.668                            | 14186955       | 2.40                              | Phenol, 2-methoxy- (CAS) Guaiacol                 |
| 17                                  | 18.912                            | 36536787       | 6.18                              | Cyclopropyl carbinol                              |
| 18                                  | 19.275                            | 2051303        | 0.35                              | ETHYLCYCLOPENTENOLONE                             |
| 19                                  | 19.396                            | 3578318        | 0.60                              | 2,4(3H,5H)-Furandione, 3-methyl- (CAS)            |
| 20                                  | 19.948                            | 2271694        | 0.38                              | 7-methyl-1,4-dioxaspiro[2.4]heptan-5-one          |
| 21                                  | 20.048                            | 2091139        | 0.35                              | HYDROXY DIMETHYL FURANONE                         |
| 22                                  | 20.326                            | 3435758        | 0.58                              | 2(3H)-FURANONE, DIHYDRO-4-HYDROXY-                |
| 23                                  | 20.668                            | 8783052        | 1.48                              | 2-Methoxy-4-methylphenol                          |
| 24                                  | 20.847                            | 3189810        | 0.54                              | 5-HYDROXYMETHYL-DIHYDRO-FURAN-2-ONE               |
| 25                                  | 21.427                            | 1873884        | 0.32                              | 2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)          |
| 26                                  | 22.072                            | 2566596        | 0.43                              | 3-Methoxy-pyrocatechol                            |
| 27                                  | 22.152                            | 2541637        | 0.43                              | Phenol, 4-ethyl-2-methoxy- (CAS) p-Ethylguaiacol  |
| 28                                  | 22.778                            | 27036027       | 4.57                              | Phenol, 4-ethenyl-2-methoxy-                      |
| 29                                  | 23.323                            | 17362509       | 2.93                              | Phenol, 2,6-dimethoxy- (CAS)                      |
| 30                                  | 23.420                            | 1916975        | 0.32                              | Phenol, 2-methoxy-3-(2-propenyl)- (CAS)           |
| 31                                  | 24.066                            | 5996338        | 1.01                              | Isooctanols                                       |
| 32                                  | 24.243                            | 4462586        | 0.75                              | Benzaldehyde, 4-hydroxy-3-methoxy- Vanillin       |
| 33                                  | 24.729                            | 7443039        | 1.26                              | 1,2,4-Trimethoxybenzene                           |
| 34                                  | 24.843                            | 9606315        | 1.62                              | Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)- Isoeugenol      |
| 35                                  | 25.050                            | 2577819        | 0.44                              | Phenol, 2-methoxy-4-propyl-GUAIACOL               |
| 36                                  | 25.494                            | 2965526        | 0.50                              | Ethanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)           |
| 37                                  | 25.635                            | 14691601       | 2.48                              | 1,6-ANHYDRO-BETA-D-GLUCOPYRANOSE                  |
| 38                                  | 25.830                            | 4076734        | 0.69                              | Benzeneethanamine, 3,4,5-trimethoxy- (CAS)        |
| 39                                  | 26.046                            | 3145011        | 0.53                              | Furan, 2,5-dibutyl- (CAS) 2,5-Dibutylfuran        |
| 40                                  | 26.413                            | 25391986       | 4.29                              | 4-METHYL-2,5-DIMETHOXYBENZALDEHYDE                |
| 41                                  | 26.851                            | 3665907        | 0.62                              | Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)- (CAS)       |
| 42                                  | 27.514                            | 5049666        | 0.85                              | Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)- (CAS)       |
| 43                                  | 27.770                            | 5135193        | 0.87                              | Syringaldehyde                                    |
| 44                                  | 27.936                            | 2079372        | 0.35                              | Coniferyl alcohol                                 |
| 45                                  | 28.140                            | 15122069       | 2.56                              | Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)- (CAS)       |
| 46                                  | 28.648                            | 3990737        | 0.67                              | Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)       |
| 47                                  | 28.782                            | 22039075       | 3.73                              | Phenol, 4-(3-hydroxy-1-propenyl)-2-methoxy-       |
| 48                                  | 29.028                            | 5745655        | 0.97                              | METHYL-4-BUTYRYL                                  |
| 49                                  | 30.365                            | 8203637        | 1.39                              | Methyl palmitate                                  |
| 50                                  | 30.808                            | 3052945        | 0.52                              | 3,5-Dimethoxy-p-coumaric alcohol                  |
| 51                                  | 31.709                            | 17969581       | 3.04                              | 3-(2,5-DIMETHOXY-PHENYL)-Propionic acid           |
| 52                                  | 32.464                            | 16680200       | 2.82                              | 8-Octadecenoic acid, methyl ester (CAS) METHYL 53 |
| 53                                  | 32.689                            | 1865192        | 0.32                              | Octadecanoic acid, methyl ester- Methyl stearate  |

| No<br>(No) | Waktu retensi<br>(Retention time) | Area<br>(Area) | Konsentrasi, %<br>(Concentration) | Nama senyawa<br>(Compound name) |
|------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|
|------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|

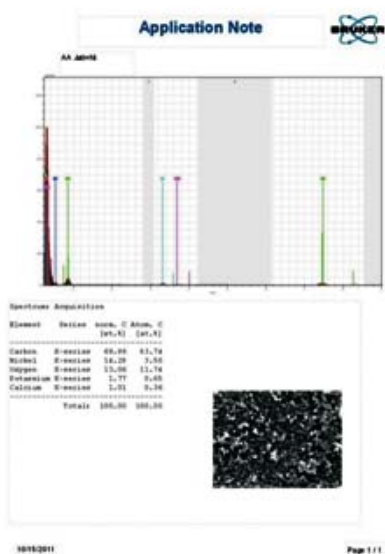
### B. Arang (Charcoal)

|   |        |          |       |                                |
|---|--------|----------|-------|--------------------------------|
| 1 | 3.788  | 66390107 | 62.53 | Carbon dioxide (CAS) Dry ice   |
| 2 | 4.297  | 1377988  | 1.30  |                                |
| 3 | 5.326  | 827558   | 0.78  | Hexane (CAS) n-Hexane          |
| 4 | 6.641  | 1630127  | 1.54  | Benzene (CAS) Phene            |
| 5 | 9.616  | 974974   | 0.92  | Benzene, methyl- (CAS) Toluene |
| 6 | 20.706 | 33005723 | 31.09 | Naphthalene (CAS) White tar    |

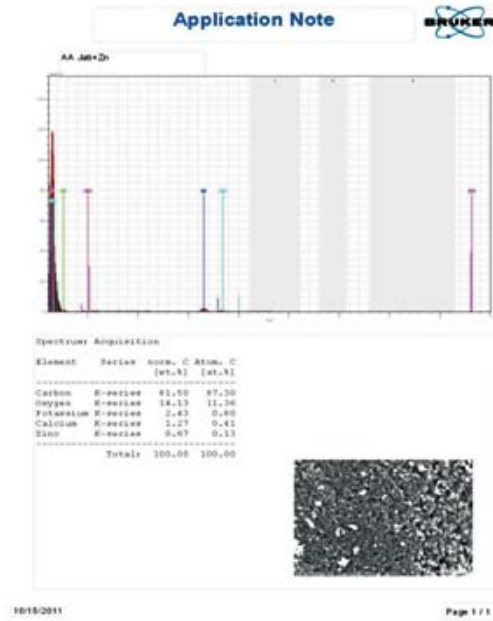
### C. Arang interkalasi (Intercalation charcoal)

|   |        |          |       |                              |
|---|--------|----------|-------|------------------------------|
| 1 | 3.777  | 58088910 | 79.80 | Carbon dioxide (CAS) Dry ice |
| 2 | 6.657  | 1571935  | 2.16  | Benzene (CAS) Phene          |
| 3 | 20.778 | 7424534  | 10.20 | Naphthalene (CAS) White tar  |
| 5 | 20.938 | 4782555  | 6.57  | Naphthalene (CAS) White tar  |

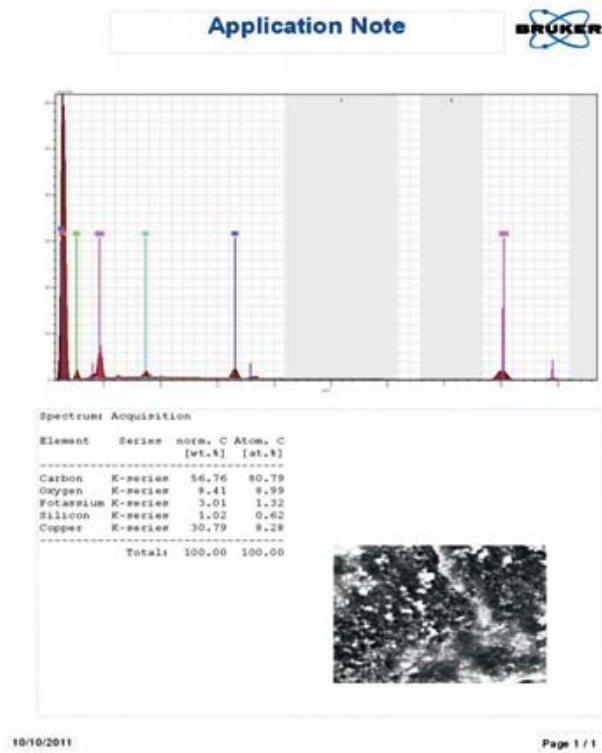
Lampiran 3. Interkalasi atom (a) Ni, (b) Zn dan (c) Cu dalam struktur karbon  
Appendix 3. Atom intercalation (a) Ni, (b) Zn and (c) Cu in carbon structure



(a)



(b)



(c)