



**FABRIKASI KOMPOSIT KARBON BERPORI *LIGHTWEIGHT*
EXPANDED CARBON AGGREGATE (LECA) DARI LIMBAH
DAUN SEBAGAI MEDIA TANAM HIDROPONIK**

Skripsi

disusun sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
Program Studi Fisika

oleh

Nita Rosita
4211412059

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2016**

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa yang tertulis dalam skripsi ini benar-benar hasil karya saya, bukan jiplakan dan karya tulis orang lain, baik sebagian atau seluruhnya. Pendapat atau temuan orang lain yang terdapat dalam skripsi ini dikutip atau dirujuk berdasarkan kode etik ilmiah.

Semarang, 03 Februari 2016



Nita Rosita

NIM 4211412059

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Fabrikasi Komposit Karbon Berpori *Lightweight Expanded Carbon*

Aggregate (LECA) dari Limbah Daun sebagai Media Tanam Hidroponik

disusun oleh

Nita Rosita

4211412059

telah dipertahankan dihadapan sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA Unnes pada
tanggal 09 Februari 2016.



Panitia
Prof. M. H. Zamrun, S.E., M.Si, Akt
NIP. 19641225 198803 1 001

Sekretaris

Dr. Suharto Lintuwih, M.Si
NIP. 19680714 199603 1 005

Ketua Penguji

Dr. Masturi, S.Pd., M.Si
NIP. 19810307 200604 1 002

Anggota Penguji/
Pembimbing Utama

Dr. Sulhadi, M.Si
NIP. 19710816 199802 1 001

Anggota Penguji/
Pembimbing Pendamping

Dr. Mardika Prasetya aji, M.Si
NIP. 19810815 200312 1 003

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

Katakanlah: Sekiranya lautan menjadi tinta untuk (menulis) kalimat-kalimat Tuhanku, sungguh habislah lautan itu sebelum habis (ditulis) kalimat-kalimat Tuhanku, meskipun Kami datangkan tambahan sebanyak itu (pula)
(Q.S. Al-Kahfi : 109)

Once you stop learning, you start dying (Albert Einstein)

PERSEMBAHAN

Allah dan Rasul-Nya
Mamah, Bapak, Tete, Aa, Dede
Untuk Shohibul Quran
Neng Dita, Buay, Mas Sus, Mei
Applied Physics Laboratory
13 Sahabat Fisika Material 2012
Fisika Angkatan 2012
Ma'had Basmala Indonesia
Rijalul Quran
Fitri, Umdah, Laila, Devi, Adit, Kholis
Bunda Siti, Bunda Ema, Pak Egi
Ihwah fillah & Bhupatie3

PRAKATA

Bismillahirrohmanirrohim,

Hanya kata syukur yang dapat diucapkan oleh seorang pencari ilmu kepada Tuhannya atas segala kekuatan, keistiqomahan, dan ketegaran yang telah diberikan. Alhamdulillah, terimakasih Ya Allah atas kesempatan selama 3,5 tahun ini dimana hamba dapat belajar dan mengkaji salah satu ilmu-Mu. Semoga waktu tersebut Engkau hitung sebagai pahala-pahala atas hamba-Mu ini. Belajar fisika telah membuka mata hati hamba bahwa ayat-ayat-Mu ada disegala bidang kehidupan salah satunya di perkembangan teknologi yang diawali dari ilmu fisika. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW beserta keluarga, sahabat, dan orang-orang yang mengikuti risalah beliau hingga akhir zaman.

Alhamdulillah, setelah melalui perjuangan dengan berbagai kendala, akhirnya penulis diijinkan-Nya untuk menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul **“Fabrikasi Komposit Karbon Berpori *Lightweight Expanded Carbon Aggregate* (LECA) dari Limbah Daun sebagai Media Tanam Hidroponik”** dengan tepat waktu. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk melengkapi kurikulum dan menyelesaikan pendidikan Sarjana Strata Satu pada Jurusan Fisika Universitas Negeri Semarang.

Terselesainya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Sulhadi, M.Si sebagai dosen pembimbing I yang telah membimbing dengan penuh kesabaran serta telah menanamkan pola berpikir logis dalam

penelitian ini, memberikan arahan kepada penulis serta meluangkan waktu untuk selalu memberikan masukan, saran, dan motivasi selama penyusunan skripsi.

2. Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si. sebagai dosen pembimbing II yang telah membimbing dengan penuh kesabaran dan penuh perhatian serta meluangkan waktu untuk selalu memberikan masukan, motivasi, dan saran selama penyusunan skripsi.
3. Drs. Ngurah Made Darma Putra, M.Si., Ph.D sebagai Dosen Wali atas bimbingan dan arahan kepada penulis selama jadi mahasiswa.
4. Mamah dan Bapa tercinta atas doa yang selalu dipanjatkan, semangat yang selalu diberikan, kesabaran yang selalu dicurahkan dan dukungan moril maupun materil yang tak henti-hentinya diberikan.
5. Aa, Teteh, de Farhan, de Tata, de Fitri atas motivasinya.
6. Sahabat-sahabat seperjuangan, Neng Dita, Buay, dan Mas Sus atas canda-tawa, ejekan, dan tangis selama berjuang di laboratorium.
7. Keluarga di *Applied Physic Laboratory*; Nduk Nisa, Dek Nisa, Dek Devin, Dek Aan, Dek adi atas motivasinya.
8. Ustadz, Ustadzah, dan saudara-saudaraku di Ma'had Basmala Indonesia dan Rijalul Quran sebagai "Shohibul Quran" atas kebaikan dan doa tulusnya.
9. Sahabat Fisika Material Neng Rofi, Ibu Sapta, Ka Margi, Cacil Yani, Sobsob, Fandi, Tante Far, Mapres Reza dan Mudah atas motivasi dan dukungannya selama penelitian ini.

10. Teman-teman Fisika angkatan 2012 terima kasih atas kerja sama dan kebersamaanya selama 7 semester ini, semoga kita tetap saling bersaudara sampai akhir nanti.
11. Pak Wasi, Pak Mutaqin, Pak Nurseto, dan Mba Lia sebagai teknisi laboratorium atas bantuannya kepada penulis selama penelitian.
12. *Ihwahfillah*, syukron atas doanya.
13. Tante Fit, Umdah, Mami Mano, Teh Devi atas semangat yang selalu diberikan.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang membantu menyelesaikan skripsi ini. Semoga amal dan budi baiknya mendapat balasan yang setimpal dari Allah SWT.

Penulis juga memohon maaf apabila dalam penyusunan skripsi ini ada beberapa kekurangan dan kesalahan karena keterbatasan yang dimiliki penulis. Sebagai akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan bagi pembaca sekalian, dan juga penulis mengharapkan saran dan kritik demi menyempurnakan kajian ini. Semoga penelitian yang telah dilakukan dapat menjadikan sumbangsih bagi kemajuan dunia riset Indonesia .
Aamiin.

Semarang, Februari 2016

Penulis

ABSTRAK

Rosita, N. 2016. *Fabrikasi Komposit Karbon Berpori Lightweight Expanded Carbon Aggregate dari Limbah Daun untuk Media Tanam Hidroponik*. Skripsi, Jurusan Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Pertama Dr. Sulhadi, M.Si. dan Pembimbing Kedua Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si.

Kata kunci : limbah daun, LECA, distribusi ukuran pori, unjuk kerja.

Limbah daun telah dimanfaatkan sebagai *Lightweight Expanded Carbon Aggregate* (LECA) karena kandungan karbonnya yang tinggi. LECA dapat dimanfaatkan sebagai media penyimpan air untuk tanaman hidroponik. Tanaman hidroponik memerlukan media yang berpori untuk dapat menyimpan air. Kemampuan menyimpan air (absorpsi) LECA dipengaruhi oleh pori. Pori pada LECA diakibatkan adanya ruang kosong yang dibentuk PEG ketika menguap pada saat dipanaskan. LECA dengan variasi persen massa PEG 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% menjadi fokus yang dikaji. Pembuatan LECA dilakukan dengan mencampurkan karbon hasil pirolisis limbah daun dengan PEG dan PVAc. Karakterisasi LECA diketahui dengan menghitung distribusi ukuran pori, porositas, laju absorpsi, laju penguapan, dan kinerjanya sebagai media tanam hidroponik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa distribusi ukuran pori akan semakin tinggi seiring dengan persen massa PEG yang semakin besar. Persen massa PEG yang semakin tinggi juga berpengaruh pada tingginya porositas, laju absorpsi, dan laju evaporasi. Akan tetapi distribusi ukuran pori, porositas, dan laju absorpsi mengalami saturasi pada penambahan persen massa PEG sebesar 25%. LECA juga efektif sebagai media tanam hidroponik. Hal ini ditunjukkan dengan pertumbuhan yang baik dari biji tanaman yang diujikan.

ABSTRACT

Rosita, N. 2016. *Fabrication of Porous Carbon Composite Lightweight Expanded Carbon Aggregate (LECA) from Leaves Waste for Hydroponics Growing Media*. Skripsi, Departement of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Science. Semarang State University. The First Supervisor Dr. Sulhadi, M.Si. and The Second Supervisor Dr. Mahardika Prasetya Aji, M.Si.

Keywords: leaves waste, LECA, the pore size distribution, performance.

Leaves waste has been used as Lightweight Expanded Carbon Aggregates (LECA) because of its high carbon material. LECA can be used as a water storage media for hydroponics plants. Hydroponics plants require porous media to be able to save water. The LECA's ability to store water (absorption) is affected by the pores. LECA pores due to the empty space created when the PEG evaporates when heated. LECA with PEG mass percent variation of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% is the focus of this study. LECA fabrication was conducted by mixing the carbon resulting from leaves waste pyrolysis and PEG and PVAc. The characterization of LECA was found out by calculating the porosity, the pore size distribution, absorption rate, evaporation rate, and its performance as hydroponics growing media. The result of the calculation shows that the higher PEG mass percentage, the higher LECA's pore size distribution. The higher PEG mass percentage also affects the high porosity, absorption rate, and evaporation rate. However, the pore size distribution, the porosity, and absorption rate will be saturated by 25% PEG mass percent addition. LECA is also effective as a hydroponic growing media. This is shown by good growth from seeds of plants tested.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN.....	ii
PENGESAHAN	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	iv
PRAKATA.....	v
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB	
1. BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan.....	4
1.3 Pembatasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Skripsi.....	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Limbah.....	7
2.2 Karbon Hasil Pirolisis	8

2.3 Material Komposit Berpori	12
2.4 Absorpsi.....	13
2.5 Medium Berpori dan Porositas.....	15
2.6 <i>Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA)</i>	17
2.7 Hidroponik.....	19
3. METODE PENELITIAN	22
3.1 Pembuatan Serbuk Karbon.....	23
3.2 Pembuatan LECA.....	24
3.3 Karakterisasi LECA	24
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Morfologi dan Distribusi Ukuran Pori LECA.....	26
4.2 Porositas LECA.....	30
4.3 Laju Absorpsi dan laju Evaporasi LECA sebagai Media Penyimpan Air	35
4.4 Unjuk Kerja LECA sebagai Media Tanam Hidroponik.....	40
5. PENUTUP.....	46
5.1 Simpulan	46
5.2 Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Sifat Fisika LECA Berbahan Dasar <i>Clay</i>	18
4.1 Morfologi dan Distribusi Ukuran Pori LECA.....	27

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 (a) <i>Transmission Electron Microscopy</i> (TEM) dari BC dan (b) <i>Field Emission Transmission Electron Microscopy</i> (FTEM) untuk menunjukkan <i>carbon map</i>	11
2.2 Rekayasa pembentukan pori pada komposit <i>cult</i> , (b) & (c) partikel kaca yang meleleh setelah dipanaskan pada T_1 dan T_2 (d) serbuk kaca dan PEG yang dicampur, dan (e) pori yang terbentuk akibat PEG yang menguap	13
2.3 Mekanisme absorpsi (a). Gas-Cair dan (b). Cair-Padat	14
2.4 Medium berpori alami, (a) <i>Beach Sand</i> , (b) <i>Sandstone</i> , dan (c) <i>Limestone</i> , (d) Ilustrasi Medium Berpori	16
2.5 <i>Lightweight aggregate</i> yang berasal dari (a) <i>clay</i> dan (b) semen	19
2.6 Sistem hidroponik (a) <i>Wick</i> , (b) <i>Nutrient Film Technique</i> , dan (c) <i>Aerophonic</i>	20
2.7 LECA dari <i>clay</i> digunakan sebagai media tanam hidroponik.....	21
3.1 Diagram alir proses penelitian	23
4.1 (a) LECA dari karbon limbah daun dan (b) karakteristik LECA yang ringan.....	26
4.2 Distribusi ukuran pori rata-rata LECA akibat pengaruh persen massa PEG	29
4.3 Distribusi nilai porositas LECA akibat variasi persen massa PEG 5%, 10%, 15%, 20% dan 25%.....	31
4.4 Ilustrasi pembentukan pori pada LECA (a) akibat pemanasan dengan persen massa PEG, (b) 10%, (c) 15%, dan (d) 20%	33
4.5 Medium poros yang dimodelkan sebagai gelembung-gelembung (<i>void circles</i>) yang tersebar pada matrix padat (hitam) (a) gelembung-gelembung yang tidak terkoneksi (kiri) dan (b) gelembung yang terkoneksi (kanan).....	34

4.6	LECA direndam dalam <i>aquades</i>	35
4.7	Laju absorpsi dan laju evaporasi LECA dengan variasi persen massa PEG 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%	36
4.8	Tiga tipe kontak dalam material berpori, <i>region</i> (a) pori dengan pori (b) karbon dengan pori, dan (c) karbon dengan karbon.	38
4.9	Unjuk kerja LECA sebagai media tanam hidroponik selama 10 hari	40
4.10	Pengaruh variasi persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman kangkung selama 14 hari	41
4.11	Pengaruh variasi persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman pakchoy selama 14 hari	42
4.12	Pengaruh persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman Bunga kertas selama 14 hari	43
4.13	Pengaruh persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman Bunga tapak kuda selama 14 hari	43
4.14	Pengaruh persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman Bunga kenikir selama 14 hari	44
4.15	(a) Akar tanaman yang mencengkram LECA dan (b) pertumbuhan LECA setelah unjuk kerja selama 14 hari	45

DAFTAR LAMPIRAN

Tabel	Halaman
5.1 Pertumbuhan Tanaman Hidroponik pada Media LECA.....	54
5.2 Beragam Ukuran Pori pada LECA.....	58

Gambar	Halaman
5.1 Proses pirolisis limbah daun dan menghomogenkan serbuk karbon	60
5.2 Persiapan fabrikasi LECA dengan menimbang bahan-bahan yang diperlukan	60
5.3 (a) Serbuk karbon, PEG, <i>aquades</i> , dan PVAc dicampur dalam cawan, (b) diaduk, (c) LECA yang berhasil difabrikasi, (d) <i>furnace</i> untuk memanaskan LECA, dan (e) LECA yang telah dipanaskan.....	61
5.4 (a) LECA direndam dalam <i>aquades</i> , (b) karakterisasi LECA dengan mikroskop optik.....	61

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah menjadi salah satu permasalahan bagi kota-kota urban yang hingga kini belum terselesaikan dengan baik. Data Kementerian Lingkungan Hidup (KLH) menyebutkan volume limbah pada tahun 2014 mencapai 130 ribu ton perhari dan tidak lebih dari 10% yang didaur ulang. Rendahnya angka daur ulang ini, diduga dikarenakan jumlah limbah yang banyak dan beragam. Selain itu, tingkat pembangunan yang tinggi di kota-kota urban menjadi salah satu faktor sulitnya pengelolaan limbah (Damanhuri, 2010: 31-41). Sekitar 70% limbah merupakan limbah organik. Limbah organik tersebut sebagian besar berasal dari limbah pertanian seperti dedaunan (Masturi *et al.*, 2011: 225). Banyak solusi yang telah ditawarkan dalam penyelesaian limbah daun seperti mendaurnya menjadi kompos dan briket (Baldwin & Greenfield, 2009: 1-2; Thoha & Fajrin, 2010: 34).

Cara sederhana yang biasa dilakukan untuk mereduksi limbah daun adalah dengan proses pembakaran. Proses ini berhenti setelah limbah terbakar seluruhnya dan tidak ada pemanfaatan lebih lanjut dari hasil proses pembakaran tersebut. Proses pembakaran limbah daun dengan oksigen rendah (pirolisis) selalu menghasilkan unsur yang didominasi bahan karbon dengan ciri warna yang sangat khas, yaitu warna hitam (Kasischke & Hoy, 2012: 685-688). Karbon memiliki

sifat absorpsi dan kestabilan termal yang sangat baik sehingga digunakan untuk elektroda pada perangkat elektrokimia (Zhi *et al.*, 2014: 1592-1598).

Sifat absorpsi diperlukan pada media-media tanam untuk menyimpan air. Keunggulan sifat tersebut pada material karbon memberi harapan untuk memanfaatkan limbah daun dengan fungsional yang baru yaitu sebagai media absorpsi air untuk tanaman hidroponik (Gunning *et al.*, 2009: 2727). Keterbatasan lahan dan air pada daerah perkotaan tentunya berdampak besar pada ketersediaan lahan hijau. Teknologi kekinian dalam bidang pertanian yang dikembangkan untuk lahan sempit disebut dengan hidroponik. Hidroponik merupakan terobosan sistem pertanian yang meminimalkan penggunaan tanah sehingga sangat cocok diterapkan di daerah perkotaan yang memiliki lahan hijau yang terbatas. Sistem hidroponik membutuhkan media pengganti tanah untuk pertumbuhan tanaman. Sistem ini mampu meningkatkan hasil pertanian dibandingkan sistem pertanian konvensional (Ardakani, 2014: 28). Ada banyak sistem tanam yang digunakan untuk tanaman hidroponik, salah satunya adalah dengan menggunakan media berpori. Tanaman hidroponik memerlukan media berpori yang dapat mengabsorpsi dan menyimpan air secara efisien, ringan serta mampu memperoleh udara yang cukup.

Media tanam yang biasa digunakan untuk tanaman hidroponik adalah *Lightweight Expanded Clay Aggregate* (LECA). LECA memiliki karakteristik densitas yang kecil, porositas tinggi, ringan, dan bentuknya yang bulat-bulat sehingga memungkinkan udara mampu mencapai akar tanaman (Kalhori *et al.*, 2013: 429). *Lightweight aggregate* memiliki kemampuan absorpsi air yang lebih

tinggi dibanding dengan *aggregate* biasa sehingga LECA banyak digunakan sebagai filter untuk logam-logam berat (Liu *et al.*, 2011: 335-343). Selain itu, LECA memiliki sifat mekanik yang baik sehingga banyak dimanfaatkan sebagai penguat bangunan (Cui *et al.*, 2012: 149).

LECA berbahan dasar *clay* memiliki keterbatasan, yaitu temperatur pembakarannya yang sangat tinggi (~1000 °C). Temperatur tinggi menjadi parameter penting dalam pembentukan pori. Hal ini dikarenakan temperatur tinggi dapat mereduksi air sehingga dihasilkan media berpori yang ringan (Kalhori *et al.*, 2013: 429). Akan tetapi, pembentukan pori dengan temperatur tinggi dipandang tidak efektif karena proses pembentukan pori tidak terkontrol (Baccour *et al.*, 2009: 2813 ; Sulhadi *et al.*, 2014a; Sulhadi *et al.*, 2015). Cara sederhana yang dapat dilakukan untuk mengontrol pembentukan pori adalah mencampurkan bahan dengan temperatur leleh yang lebih rendah seperti bahan polimer. Proses pemanasan menyebabkan polimer meleleh dan meninggalkan ruang kosong pada matrik sehingga fraksi dan ukuran pori dapat dikontrol dengan mengatur jumlah polimer pada matrik komposit (Sulhadi *et al.*, 2014b; Calderon-Moreno *et al.*, 2014: 2209-2210).

Pemilihan material karbon dari limbah daun sebagai bahan dasar pembuatan LECA dikarenakan temperatur pembakarannya yang rendah, pembentukan pori dapat dikontrol, dan lebih ramah lingkungan karena dapat mengurangi eksplorasi *clay* secara berlebih sehingga fokus penelitian ini adalah membuat *Lightweight Expanded Carbon Aggregate* (LECA) dengan bahan dasar

serbuk karbon yang berasal dari limbah daun dan polimer PEG sebagai perekayasa pori serta aplikasi LECA sebagai media tanam hidroponik.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas maka permasalahan yang menjadi fokus kajian penelitian ini adalah :

- a. Bagaimana sifat fisis dari LECA berbahan dasar serbuk karbon dari limbah daun?
- b. Bagaimana unjuk kerja dari LECA berbahan dasar serbuk karbon dari limbah daun sebagai media tanam hidroponik?

1.3 Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini perlu dilakukan pembatasan masalah agar ruang lingkup masalah yang akan diteliti tidak meluas. Pembatasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut :

- a. Serbuk karbon yang digunakan berasal dari pirolisis limbah daun.
- b. Pembuatan LECA menggunakan metode pencampuran sederhana.
- c. Polimer yang digunakan sebagai perekayasa pori adalah *polyethylene glycol* (PEG).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

- a. Mampu memahami sifat fisis dari LECA berbahan dasar serbuk karbon dari limbah daun.
- b. Mengetahui kinerja LECA sebagai media tanam hidroponik.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang dan tujuan yang telah disebutkan diatas, dapat diperoleh manfaat dalam penelitian ini antara lain adalah :

- a. Mengurangi limbah daun.
- b. Menghasilkan media tanam hidroponik dengan varian baru.

1.6 Sistematika Skripsi

Sistematika penulisan skripsi disusun dan dibagi menjadi tiga bagian untuk memudahkan pemahaman tentang struktur dan isi skripsi. Penulisan skripsi ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu bagian pendahuluan skripsi, bagian isi skripsi, dan bagian akhir isi skripsi.

Bagian pendahuluan skripsi terdiri dari halaman judul, sari (abstrak), halaman pengesahan, motto dan persembahan, kata pengantar, daftar isi, daftar gambar, daftar tabel, dan daftar lampiran.

Bagian isi skripsi, terdiri dari lima bab yang tersusun dengan sistematika bab 1 yang meliputi pendahuluan, berisi latar belakang, permasalahan, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan skripsi; bab 2 yang berisi landasan teori yaitu teori-teori pendukung

penelitian; bab 3 memuat metode penelitian, berisi tempat pelaksanaan penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta langkah kerja yang dilakukan dalam penelitian; bab 4 yang meliputi hasil penelitian dan pembahasan, dalam bab ini dibahas tentang hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan dan terakhir bab 5 yaitu penutup yang berisi tentang kesimpulan hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran yang berkaitan dengan hasil penelitian.

Bagian akhir skripsi memuat tentang daftar pustaka yang digunakan sebagai acuan dari penulisan skripsi.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah

Limbah adalah buangan yang dihasilkan dari suatu proses baik industri, rumah tangga, ataupun pertanian. Keberadaan limbah yang tidak ditangani dengan cermat akan menjadi permasalahan pada lingkungan. Banyak faktor yang menjadikan permasalahan limbah sulit untuk diselesaikan, salah satunya adalah jumlah dan ragam limbah. Jumlah dan ragam limbah disuatu tempat dipengaruhi oleh tingkat pendapatan dan pola konsumsi tempat tersebut. Penggolongan limbah didasarkan atas beberapa kriteria seperti wujud, senyawa, dan sumber limbah.

- a. Berdasarkan wujudnya, yaitu limbah padat seperti ban bekas, plastik, pembungkus makanan dan limbah cair seperti air cucian, air sabun, rembesan AC.
- b. Berdasarkan senyawa, yaitu limbah organik seperti kotoran hewan dan limbah anorganik seperti plastik dan baja.
- c. Berdasarkan sumbernya, yaitu limbah industri seperti limbah pewarna tekstil dan limbah domestik seperti limbah rumah tangga, pasar, restoran, serta limbah pertanian seperti dedaunan.

Limbah organik menjadi bahasan menarik karena limbah jenis ini masih dapat didaur ulang. Limbah yang tidak dikelola dengan tepat akan menimbulkan banyak gangguan seperti kurangnya oksigen dan ketidakseimbangan pH pada

daerah pembuangan limbah, serta gas-gas yang berbahaya yang dihasilkan selama degradasi limbah (Fairus *et al.*, 2011: 1-2). Limbah yang banyak dihasilkan di Indonesia merupakan limbah organik seperti dedaunan. Solusi saat ini yang ditawarkan untuk mengurangi volume limbah organik adalah memanfaatkannya menjadi komposit (Kumagai & Sasaki, 2009: 3308).

Ada empat alternatif pengelolaan limbah, yaitu daur ulang, penimbunan di TPA, pengomposan, dan pembakaran. Pengelolaan sampah dengan daur ulang hanya menunda limbah menumpuk di TPA. Berbeda dengan pengomposan dan pembakaran yang mampu mereduksi limbah sampai dengan 84%. Ditinjau dari persentase pengurangan limbah, proses pembakaran sangat efektif untuk mengurangi timbunan limbah (Sujandari *et al.*, 2009: 136). Tetapi, proses ini berhenti setelah limbah terbakar seluruhnya dan tidak ada pemanfaatan lebih lanjut. Proses pembakaran limbah organik seperti dedaunan dengan oksigen rendah/ pirolisis selalu menghasilkan unsur yang didominasi bahan karbon yang berwarna hitam (Shrestha *et al.*, 2010: 294-320).

2.2 Karbon Hasil Pirolisis

Pembakaran limbah organik atau bahan organik dalam keadaan rendah oksigen akan menghasilkan arang sebagai residu padat dan zat *volatile*. Arang ini sering disebut dengan *black carbon*. *Black carbon* (BC) berasal dari bahan bakar fosil dan biomassa seperti dedaunan (Shrestha *at al.*, 2010: 294-310). Reaksi pembakaran dari limbah organik dibagi dua yaitu reaksi pembakaran sempurna dan tidak sempurna.

Reaksi pembakaran :

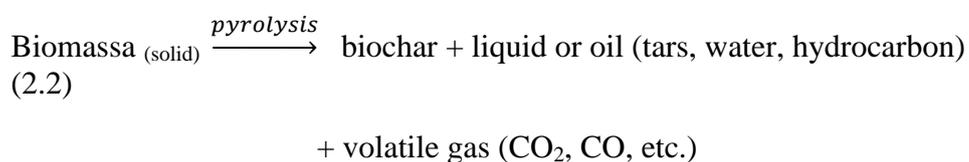
Sempurna : bahan organik + O₂ → CO₂ + H₂O

Tidak sempurna : bahan organik + O₂ → CO + H₂O

Karbon dari limbah daun diperoleh dengan proses pirolisis. Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal bahan padatan dalam kondisi oksigen yang rendah, dimana suatu material akan mengalami pemecahan struktur kimia menjadi fase gas (Juma *et al.*, 2006: 16; Blasi, 2008: 48). Proses pirolisis atau sering disebut *cracking process* adalah proses pemecahan alkana dengan jalan pemanasan pada temperatur tinggi tanpa kehadiran oksigen. Proses ini akan menghasilkan alkana dengan rantai karbon lebih pendek seperti pada persamaan 2.1. Proses pirolisis dari alkana seperti metana, secara industri dipergunakan dalam pembuatan BC.

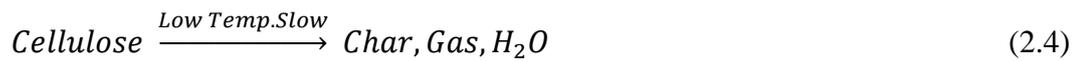
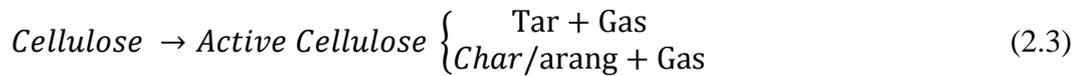


Mekanisme umum yang terjadi pada biomassa yang dipirolisis ditunjukkan pada persamaan 2.2 (Shrestha, *et al.*, 2010: 299)

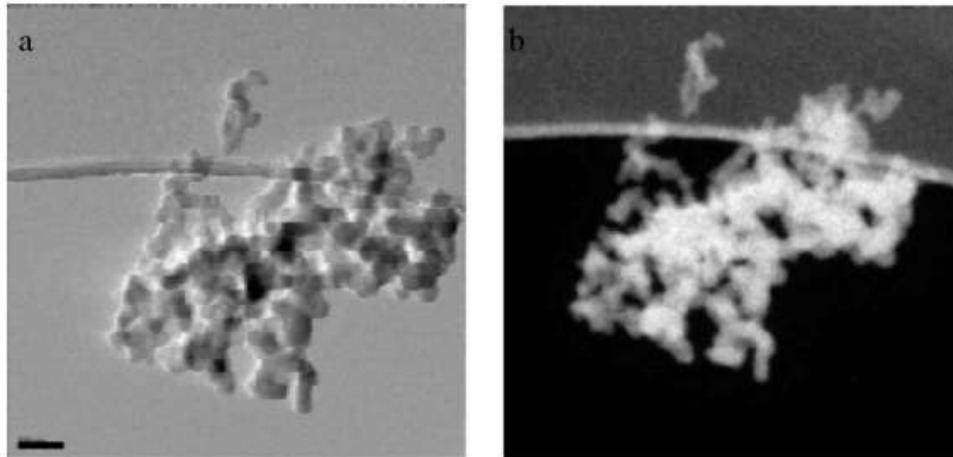


Limbah daun termasuk biomassa yang diketahui memiliki kandungan selulosa (Damayanti & Megawati, 2011:89). Tumbuhan yang mengandung selulosa seperti daun, apabila mengalami proses pirolisis maka mekanisme yang

terjadi seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.3 (Lin *et al.*, 2009: 20103) dan 2.4 (Blasi, 2008: 62).



Proses pirolisis terdiri dari dua tingkatan, pertama pirolisis primer yang terjadi pada bahan baku dan kedua adalah pirolisis sekunder yang terjadi pada bahan yang dihasilkan oleh pirolisis primer (Lufina *et al.*, 2013: 62). Perubahan fisika pirolisis primer yang terjadi pada limbah daun meliputi pelunakan, pengembangan, dan pemadatan kembali. Pada proses pirolisis, molekul karbon yang kompleks terurai oleh adanya energi. Sebagian besar hasil proses ini adalah karbon. Pirolisis pada temperatur tinggi yang hanya menyisakan karbon sebagai residu disebut dengan karbonisasi. Karbonisasi inilah yang dilakukan pada pirolisis limbah daun dimana tujuan dari proses tersebut adalah melepaskan unsur-unsur yang mudah menguap pada limbah daun tanpa menggunakan udara sehingga kandungan karbon semakin besar (Fairus *et al.*, 2011: 4). Proses pirolisis sangat cocok digunakan dalam pengolahan limbah daun karena prosesnya yang aman bagi lingkungan. Pirolisis berbagai bahan organik akan menghasilkan persentase kandungan karbon yang berbeda pula. Sebagai contoh, pirolisis kayu akan menghasilkan 25% karbon sedangkan 75% dari total massa kayu tersebut akan menghasilkan materi berupa gas (Zhi *et al.*, 2014: 1592). Kadar unsur C, H, dan N pada BC dapat diketahui dari karakterisasi TEM pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 (a) *Transmission Electron Microscopy* (TEM) dari BC dan (b) *Field Emission Transmission Electron Microscopy* (FTEM) untuk menunjukkan *carbon map*.

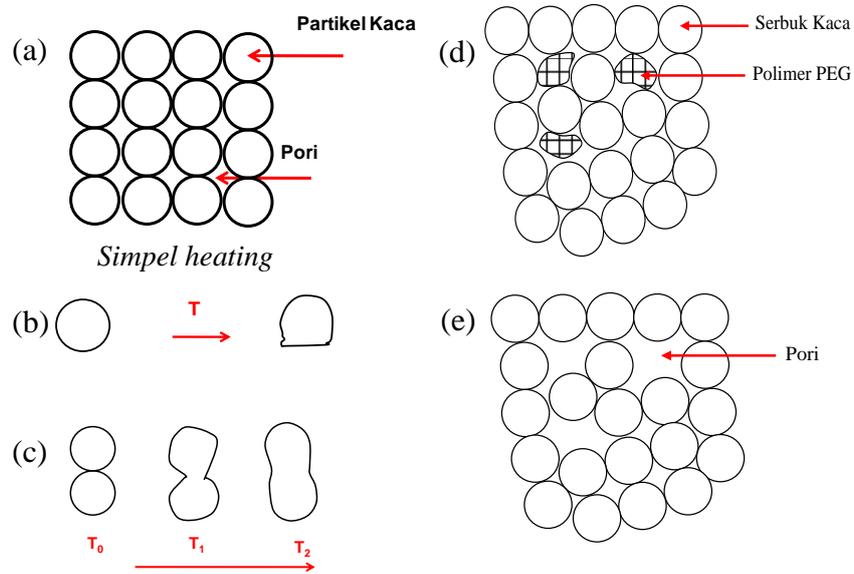
Pada Gambar 2.1(a), warna hitam menunjukkan kandungan unsur karbon sedangkan bagian terang pada Gambar 2.1(b) merepresentasikan kandungan unsur karbon (Shrestha *et al.*, 2010: 296). Rasio C:H:N dari BC cukup besar akan tetapi kandungan karbon pada BC mendominasi, sekitar 60% dari BC merupakan unsur hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur sedangkan 40% merupakan karbon (Goldberg, 1985: 198).

Ditinjau dari karakteristiknya, karbon memiliki sifat absorpsi, stabilitas kimia, dan kestabilan termal yang sangat baik (Wang *et al.*, 2012: 21). Material karbon berpori memiliki *surface area* yang besar (Fitzer, 1987: 163; Koh *et al.*, 2006: 3089). Dengan keunggulan sifat fisis tersebut, karbon telah pula digunakan secara luas sebagai medium filter untuk beragam jenis polutan (Cheng *et al.*, 2011: 11498-11510). Selain itu, karbon hasil pirolisis dari limbah daun telah dimanfaatkan sebagai pigmen warna organik untuk tinta printer (Wiguna *et al.*, 2014: 64).

2.3 Material Komposit Berpori

Material komposit adalah bahan yang terbentuk apabila dua atau lebih komponen yang berlainan digabung. Keuntungan dari material komposit adalah bobotnya ringan, sifat mekanik yang baik, dan tahan korosi (Kroschwitz, 1987). Material komposit merupakan material hasil kombinasi makroskopis dari dua atau lebih material yang berbeda. Pada material komposit, beberapa material dan sifat-sifatnya digabung ke dalam sebuah material baru yang memiliki keunggulan sifat sesuai tujuan yang diinginkan. Rekayasa ini diharapkan menghasilkan material baru yang memiliki sifat-sifat baru yang lebih unggul dari pada material penyusunnya (Hadiyawardman *et al.*, 2008).

Material komposit berpori dapat dipahami sebagai komposit dengan fasa udara didalam material solid. Beberapa teknik telah dilakukan untuk membuat material komposit berpori seperti *drying* bersuhu rendah dan pembakaran untuk menghilangkan bahan organik seperti material komposit berpori dari sampah kaca (*cult*) (Rakhmatullah *et al.*, 2007). *Cult* yang ditemui di lingkungan memiliki temperatur leleh yang lebih rendah dari bahan-bahan penyusunnya. Porositas material komposit berpori dari *cult* didapatkan dengan mencampurkan *cult* dengan material yang memiliki titik leleh yang lebih rendah dari *cult*, yaitu dari jenis polimer seperti PEG (Sulhadi *et al.*, 2014a: 139; Wang *et al.*, 2012: 21-22; Masturi *et al.*, 2012; 79-80). Pori yang terbentuk pada komposit berpori dari *cult* dapat diilustrasikan pada Gambar 2.2.

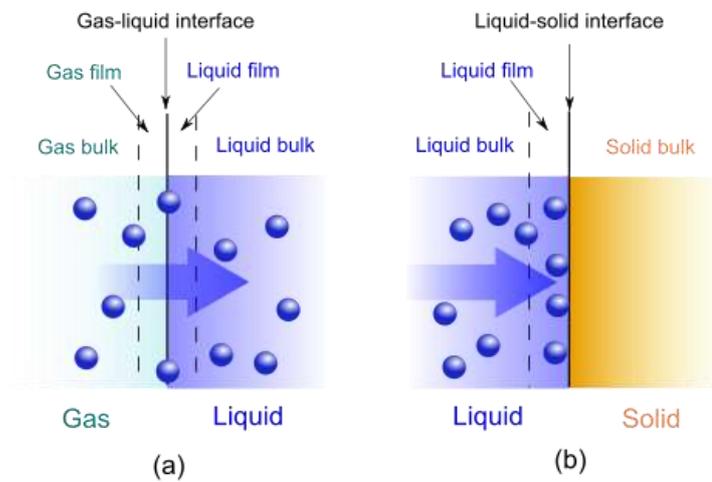


Gambar 2.2 (a) Rekayasa pembentukan pori pada komposit *cult*, (b) & (c) partikel kaca yang meleleh setelah dipanaskan pada T_1 dan T_2 (d) serbuk kaca dan PEG yang dicampur, dan (e) pori yang terbentuk akibat PEG yang menguap.

Akibat proses pemanasan, polimer PEG akan meleleh dan membentuk ruang kosong yang disebut pori. Semakin banyak jumlah fraksi massa polimer PEG dalam komposit maka pori yang akan terbentuk akan semakin banyak (Hatori *et al.*, 2001: 836; Calderon-Morena *et al.*, 2014: 2209-2220).

2.4 Absorpsi

Absorpsi adalah suatu fenomena fisik atau kimiawi atau suatu proses sewaktu atom, molekul, atau ion memasuki suatu fase limbak (*bulk*) lain yang bisa berupa gas, cairan, ataupun padatan. Proses ini berbeda dengan adsorpsi karena pengikatan molekul dilakukan melalui volume dan bukan permukaan. Salah satu contoh penyerapan lainnya adalah penukaran ion dimana terjadi proses pertukaran ion antara dua elektrolit atau antara larutan elektrolit dan senyawa kompleks. Mekanisme absorpsi ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Mekanisme absorpsi (a). Gas-Cair dan (b). Cair-Padat

Adsorpsi adalah suatu proses dimana suatu partikel menempel pada suatu permukaan akibat adanya perbedaan muatan lemah diantara kedua benda (gaya Van Der Waals), sehingga terbentuk suatu lapisan tipis dari partikel-partikel halus pada permukaan. Permukaan karbon yang mampu menarik molekul organik merupakan salah satu contoh mekanisme serapan antara air dan permukaan karbon (Boshi *et al.* 2003: 317).

Penetrasi adsorbat kedalam adsorben dapat terjadi pada ketebalan beberapa lapis. Jika penetrasi molekul terjadi pada seluruh bagian material padat, maka prosesnya disebut absorpsi (*absorption*). Dalam banyak kasus sulit dibedakan antara absorpsi dan adsorpsi sehingga munculah istilah sorpsi (*sorption*) yang mengacu pada proses absorpsi dan adsorpsi. Absorpsi merupakan suatu proses dimana suatu partikel terperangkap ke dalam suatu media dan seolah-olah menjadi bagian dari keseluruhan media tersebut. Absorpsi terdiri dari dua jenis yaitu:

a. Adsorpsi fisika (*physical adsorption*)

Absorpsi fisika dicirikan dengan tarik menarik antara adsorbat dan adsorben sangat lemah dengan energi kurang dari 40 KJ/mol dan antar keduanya tidak membentuk senyawa kimia. Adsorpsi fisika umumnya *reversible* dan *irreversible*. Sifat ini ditemukan dalam batas antar muka kimia dengan medium gas, dimana ikatan yang terjadi diakibatkan dari gaya Van Der Waals dan gaya London.

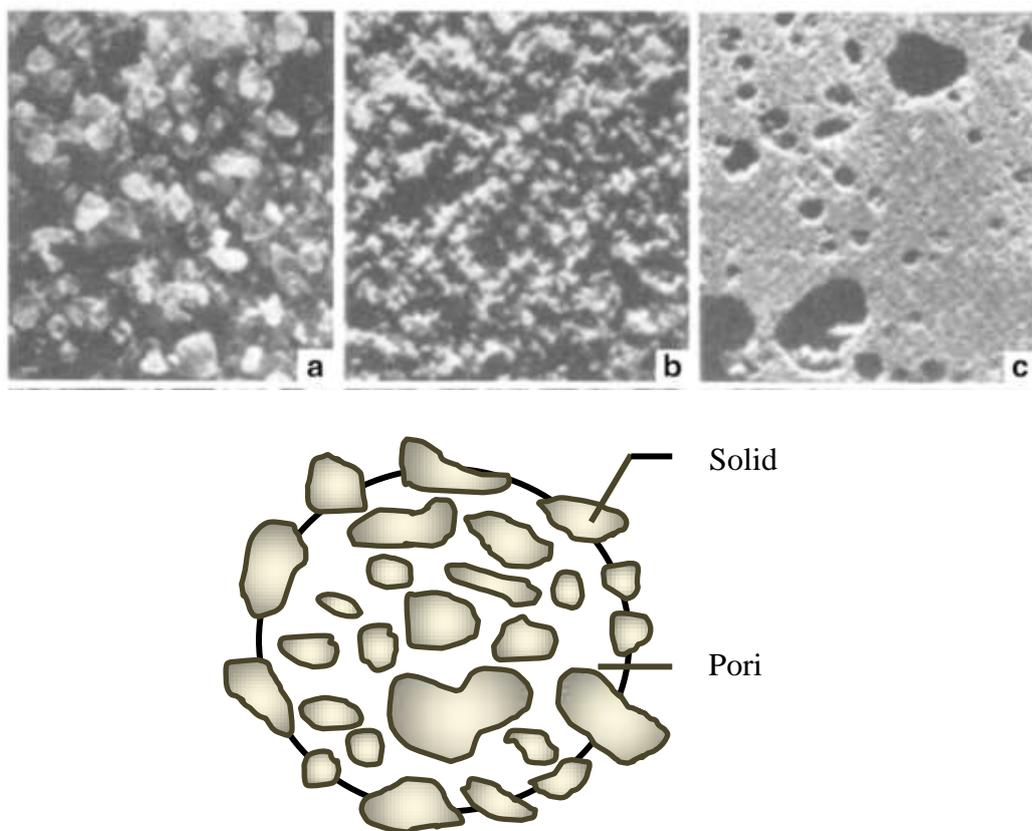
b. Adsorpsi kimia (*chemisorbtion*).

Absorpsi kimia (*chemisorbtion*) ditandai dengan pertukaran elektron/*electron exchange* antara adsorbat dengan adsorben. Interaksi yang terjadi sangat kuat sehingga terbentuk senyawa kimia dengan energi ikatnya sekitar 300 KJ/mol. Akibat dari berbagai sebab/perlakuan, ikatan dalam adsorpsi fisik dan kimia dapat lepas, proses ini disebut desorpsi.

2.5 Medium Berpori dan Porositas

Medium berpori terdiri atas *solid matrix* dan pori. Contoh medium berpori yang ada disekitar seperti kayu, batu pasir, dsb. Pori tersebut dapat berupa pori yang masih individu dan pori yang terhubung. Pori yang saling terhubung memungkinkan satu aliran cairan atau lebih dalam sebuah material. Dalam media berpori alami, distribusi pori berhubungan dengan bentuk dan ukuran. Pada skala pori (mikroskopis), kecepatan aliran dan tekanan akan tidak teratur. Mekanisme fluida mengalir pada medium berpori sangat penting untuk diketahui. Untuk jarak yang pendek, dimungkinkan hanya terdapat satu atau dua saluran. Mekanisme

fluida dapat digunakan untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada fluida yang mengalir pada media solid dan pori. Akan tetapi, apabila jaraknya besar maka akan terdapat banyak pori yang saling terhubung dan dapat didekati dengan pendekatan konvensional seperti porositas (Nield & Bejan, 2013: 1-2). Contoh dari medium berpori alami dan ilustrasinya ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Medium berpori alami, (a) *Beach Sand*, (b) *Sandstone*, dan (c) *Limestone*, (d) Ilustrasi medium berpori (Nield & Bejan, 2013: 2).

Porositas adalah besarnya persentase ruang-ruang kosong atau besarnya kadar pori yang terdapat pada suatu material. Material dengan porositas yang baik dapat dimanfaatkan sebagai material pemurnian air, *decolorizing*, *solvent recovery*, filter, katalis, *porous piezoelectric ceramics* (Koh *et al.*, 2006: 3089).

Selain itu, media penyimpanan air yang berbahan dasar karbon memerlukan porositas yang baik agar air dapat terdifusi dengan baik. Menurut IUPAC, pori terbagi menjadi tiga kategori: mikropori (<2 nm), mesopori (2-50 nm), dan makropori (>50 nm) (Yanuar *et al.*, 2009: 72). Porositas pada material komposit karbon sangatlah penting. Hal ini dikarenakan porositas akan mempengaruhi sifat fisis dari material seperti kemampuan difusi ion dan kemampuan kontak elektroda dengan cairan elektrolit pada *porous electrode* serta sifat mekanik *lightweight aggregate concrete* (Hatori *et al.*, 2001: 836-841; Lo *et al.*, 2004: 916-919).

2.6 *Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA)*

Media yang digunakan pada sistem hidroponik merupakan media non tanah seperti batu apung, arang sekam, pasir, air, dsb. Media-media tersebut berfungsi sebagai media penyimpan air dan nutrisi untuk penunjang kehidupan tanaman. Disamping media yang dapat menyimpan air, tanaman hidroponik memerlukan media berpori yang ringan serta mampu memperoleh udara yang cukup. LECA dikenal sebagai medium penyimpan air untuk tanaman hidroponik karena medium ini memiliki banyak pori dan daya penyerapan air yang sulit hilang (Kalhori *et al.*, 2013: 429; Toruan *et al.*, 2013: 190). LECA merupakan agregat yang berasal dari *clay* yang dibuat dengan proses pembakaran pada suhu yang tinggi. Proses ini menjadikan LECA memiliki karakteristik seperti densitas kecil, ringan, dan kuat (Ke *et al.*, 2009: 2821).

LECA memiliki sifat mekanik dan *durability* yang baik (Lo & Cui, 2004: 916). Keunggulan sifat tersebut menjadikan LECA biasa digunakan sebagai penguat bangunan. Penggunaan LECA pada struktur bangunan dapat menekan biaya operasional, *eases construction*, dan mendukung adanya “*green building*” (Cui dkk, 2012: 149). Selain itu, LECA juga banyak dimanfaatkan sebagai media tanam (Gunning *et al.*, 2009: 2727). LECA dimanfaatkan sebagai media tanam dikarenakan memiliki kemampuan absorpsi air yang baik. Hal ini dikarenakan *aggregate* memiliki pori yang banyak sebagai tempat untuk menyimpan air (Lo *et al.*, 2006: 623).

Data dari *Aquaponics Company* menyebutkan bahwa LECA berbahan dasar *clay* memiliki sifat fisika seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 (Nuevaespana & Matias, n.d: 3).

Tabel 2.1 Sifat Fisika LECA Berbahan Dasar *Clay*

Parameter	LECA Berbahan Dasar <i>clay</i>
Diameter (mm)	6.4 ± 0.8
Massa (gram)	1.4 ± 0.1
<i>Surface area</i> (mm ²)	127 ± 34
Porositas (%)	8 ± 3
Absorpsi air (%)	14 ± 7
Absorpsi air/ <i>surface area</i> (µl/mm ²)	0.16 ± 0.1
Absorpsi air/ volume LECA (ml/mm ²)	86 ± 30

Ada berbagai macam bahan dasar dalam pembuatan *lightweight aggregate* seperti limbah tenaga uap, limbah sisa pembakaran arang, *shale*, *lelite*, dsb. Saat ini, bahan dasar dari *aggregate* sudah merambah ke bahan-bahan limbah seperti *recycle glass* yang digunakan sebagai penguat *aggregate* yang berasal dari limbah batu bara. Selain itu, ada pula *lightweight aggregate* yang berasal dari limbah

industri (Koutri & Cheeseman, 2010: 769; Gonzales-Corrochano *et al.*, 2009; 2801). *Lightweight aggregate* yang berasal dari berbagai macam bahan ditunjukkan pada Gambar 2.5.



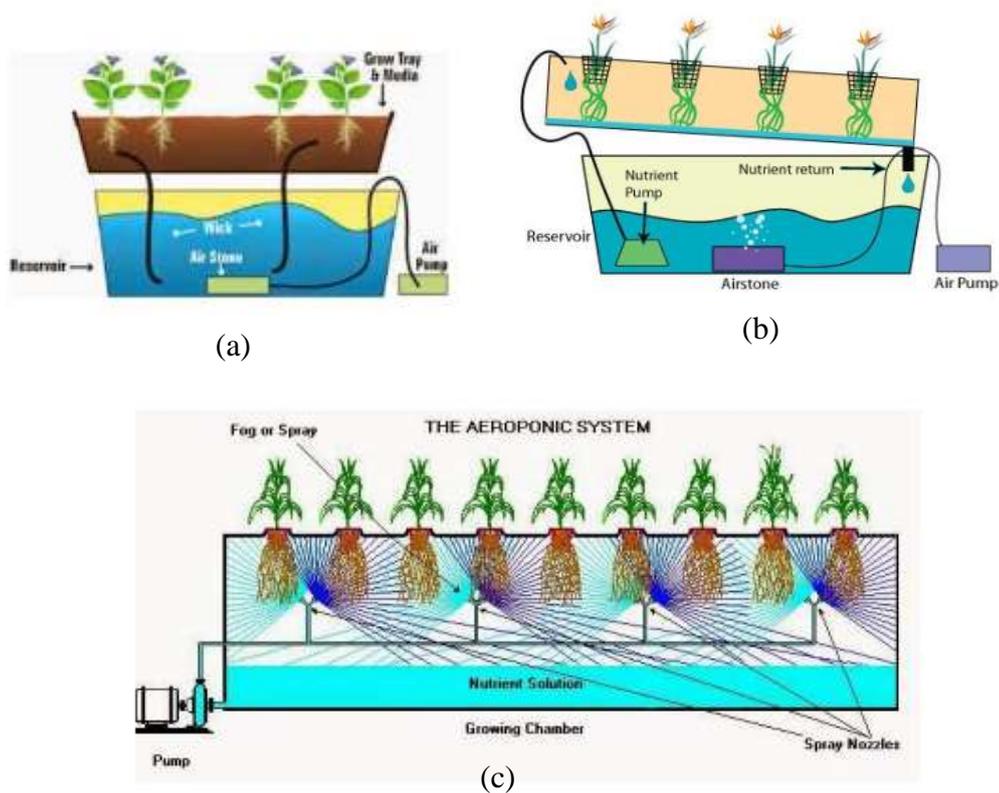
Gambar 2.5 *Lightweight aggregate* yang berasal dari (a) *clay* dan (b) semen.

Bahan lain yang berpotensi dijadikan sebagai bahan baku pembuatan *lightweight aggregate* adalah karbon. Ada banyak sumber material karbon, salah satunya adalah karbon yang berasal dari hasil pirolisis limbah daun. Hal ini menjadi penting karena pemanfaatan karbon yang berasal dari arang limbah daun akan menekan volume dari limbah daun. Oleh karena itu, selain pemanfaatan karbon dari limbah daun yang ramah lingkungan, pemilihan sumber karbon ini dikarenakan temperatur pembakarannya yang rendah, pembentukan pori dapat dikontrol, dan *eco-friendly*.

2.7 Hidroponik

Hidroponik merupakan cara bertanam tanpa menggunakan media tanah. Hidroponik menggunakan media padatan (bukan tanah) yang dapat menyimpan air dan nutrisi sehingga dapat menopang kehidupan tanaman. Teknik ini mampu

meningkatkan hasil tanaman per satuan luas sampai sepuluh kali dibanding teknik pertanian konvensional. Keuntungan lain yang dapat diperoleh budidaya tanaman secara hidroponik adalah perawatan lebih praktis, gangguan hama dan penyakit dapat dikontrol, kebersihan dapat dijaga, tidak tergantung musim/ waktu tanam dan produksi lebih terjamin (Rahayu *et al.*, 2008: 75). Media yang biasa digunakan pada cara penanaman dengan hidroponik adalah batu apung, arang sekam, pasir, dsb (Utama *et al.*, 2006: 1). Gambar 2.6 menunjukkan tiga macam sistem tanam hidroponik.



Gambar 2.6 Sistem hidroponik (a) *Wick*, (b) *Nutrient Film Technique*, dan (c) *Aeroponic*.

Gambar 2.6 menunjukkan 3 macam sistem tanam hidroponik. Gambar 2.6 (a) merupakan sistem hidroponik *wick*. Sistem tersebut merupakan sistem yang paling sederhana. Gambar 2.6 (b) merupakan sistem hidroponik *Nutrient Film Technique*, dimana sistem ini menggunakan aliran air (*nutrient*) sebagai medianya dan bagian (c) merupakan sistem *aerophonic* yang memanfaatkan *spraying* pada akar untuk memenuhi nutrisi tanaman. Seiring dengan perkembangan penelitian dibidang hidroponik, banyak metode baru yang diterapkan untuk memberikan kebutuhan air pada tanaman, salah satunya adalah sistem hidroponik dengan menggunakan LECA sebagai media tanam.

LECA merupakan salah satu media tanam hidroponik. Hal ini dikarenakan LECA dapat menjadi media penyimpan air (Gunning *et al.*, 2009: 2727). *Lightweight aggregate* sendiri memiliki kemampuan absorpsi air yang sangat baik. Hal ini dikarenakan *aggregate* memiliki pori yang banyak sebagai tempat untuk menyimpan air (Lo Liu *et al.*, 2011: 335-343). Gambar 2.7 merupakan gambar salah satu tanaman hidroponik yang tumbuh di atas media tanam LECA.



Gambar 2.7 LECA dari *clay* digunakan sebagai media tanam hidroponik (serbahidroponik, 2015).

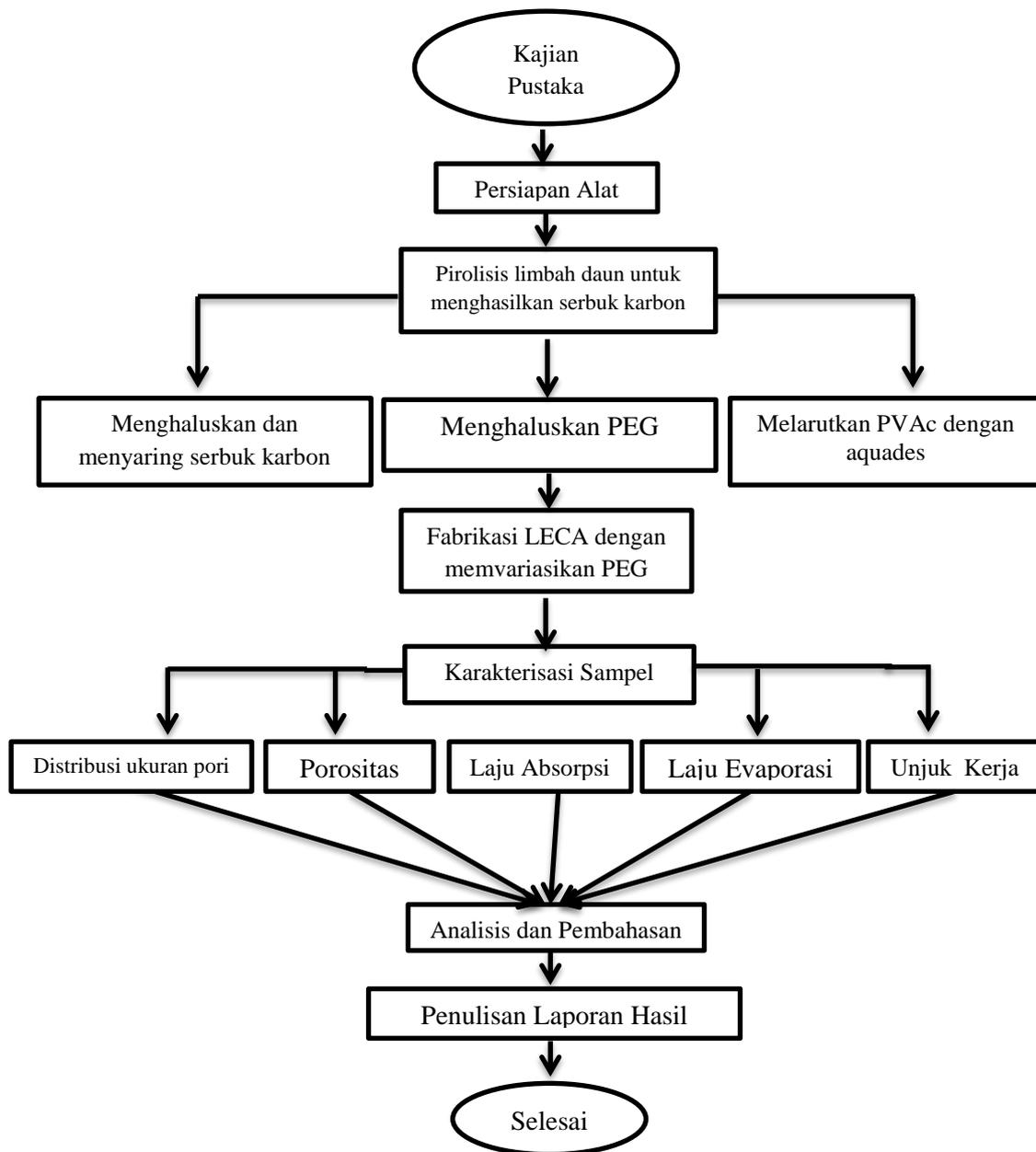
BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian tentang fabrikasi LECA berbahan dasar serbuk karbon hasil pirolisis limbah daun dilaksanakan dalam empat tahapan kegiatan yaitu, pertama pirolisis limbah daun, kedua fabrikasi LECA, ketiga karakterisasi LECA dan keempat adalah unjuk kerja LECA sebagai media tanam hidroponik.

Proses penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Terapan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang gedung D9 lantai 3, dilanjutkan dengan karakterisasi LECA menggunakan mikroskop optik, pendekatan selisih densitas, dan unjuk kinerja LECA sebagai media tanam hidroponik. Penggunaan mikroskop optik sendiri dimaksudkan untuk mengetahui rata-rata ukuran pori yang berada dalam LECA. Penelitian dan karakterisasi, keduanya dilakukan di Laboratorium Fisika Material Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang gedung D9 lantai 3.

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental. Karakteristik LECA dikaji berdasarkan pengaruh penambahan persen massa PEG terhadap sifat fisis yang dimiliki LECA. Tahapan penelitian dapat dilihat dalam diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir proses penelitian

3.1 Pembuatan Serbuk Karbon

Limbah daun yang diperoleh dari sekitar Unnes dibakar pada kondisi oksigen yang rendah. Hasil dari proses ini berupa arang yang kemudian digerus

menjadi serbuk-serbuk karbon. Karbon yang telah digerus kemudian disaring menggunakan *screen sablon* ukuran T90 agar diperoleh ukuran serbuk karbon yang homogen. Serbuk karbon dengan ukuran yang homogen menjadi bahan utama dalam pembuatan LECA.

3.2 Pembuatan LECA

Bahan yang dipersiapkan dalam fabrikasi LECA adalah karbon hasil pirolisis dari limbah daun, PEG, PVAc, dan aquades. Serbuk karbon sebanyak 2 gram dicampur dengan PEG (agen pembentuk pori) dan PVAc sebanyak 1 gram pada cawan porselen. Persen massa PEG dalam LECA divariasikan dari 5%, 10%, 15%, 20% dan 25%. Variasi tersebut dilakukan untuk membentuk pori yang berbeda-beda. Serbuk karbon yang telah dicampur kemudian dibentuk bulat dan dipanaskan dengan perangkat *furnace* merk Thermo Scientific pada temperatur 120 °C selama 1 jam (Priatama *et al.*, 2010: 43).

3.3 Karakterisasi LECA

Untuk mengetahui sifat fisis LECA dengan variasi persen massa PEG maka diperlukan besaran dasar agar efek penambahan PEG pada LECA dapat diamati. Berdasarkan perannya sebagai aktivator pembentuk pori, maka distribusi ukuran pori menjadi parameter yang penting untuk dikaji. Distribusi ukuran pori dapat diketahui dari penampang LECA dengan menggunakan mikroskop optik. Untuk mengetahui persentase pori pada LECA maka pengujian porositas dilakukan. Porositas LECA diestimasi dengan pendekatan sederhana berupa

selisih densitas (Nimmo, 1980: 296; Nuevaespana (n.d)). Selain itu, kemampuan LECA dalam menyerap dan menyimpan air dikaji melalui laju absorpsi dan laju evaporasi.

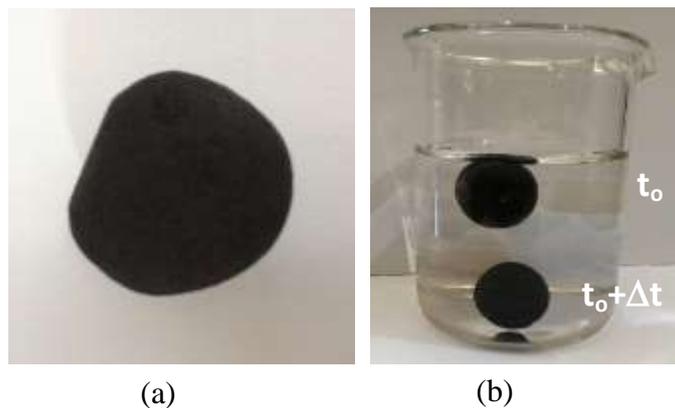
Selanjutnya, unjuk kerja LECA sebagai media tanam hidroponik diamati dari parameter pertumbuhan tanaman. Unjuk kerja dilakukan dengan menumbuhkan biji Kangkung (*Ipomea aquantica*), Pakchoy (*Brassica rapa L.*), Bunga kertas (*Zinnia elegans Jacq.*), Bunga tapak kuda (*Ipomea purpurea*), dan Bunga kenikir (*Cosmos bipinnatus*). LECA dengan variasi PEG yaitu 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% diuji cobakan untuk mengetahui LECA yang paling efektif untuk menumbuhkan 5 jenis tanaman hidroponik. Pengujian ini dilakukan selama 2 minggu.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Morfologi dan Distribusi Ukuran Pori LECA

LECA dibuat dengan metode pencampuran sederhana. Serbuk karbon hasil pirolisis limbah daun dicampur dengan PEG sebagai agen pembentuk pori, aquades, dan PVAc sebagai perekat. PEG divariasikan dari 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Serbuk karbon yang telah dicampur dengan PEG, PVAc, dan aquades kemudian dibentuk bulat dan dipanaskan pada suhu 120 °C selama 1 jam. LECA yang telah berhasil difabrikasi ditunjukkan pada Gambar 4.1(a).



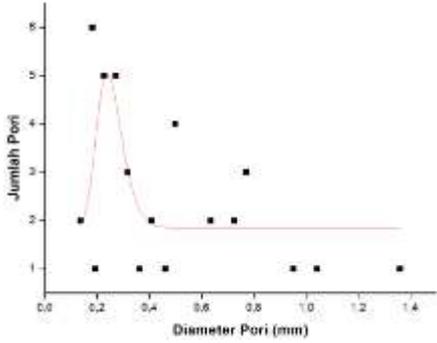
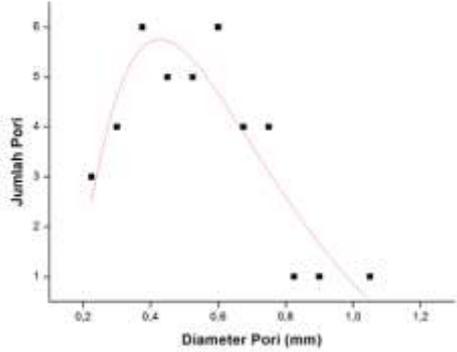
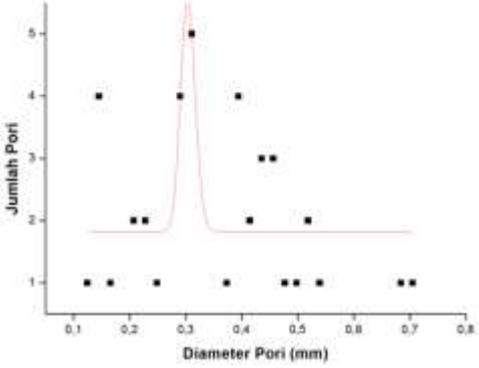
Gambar 4.1 (a) LECA dari karbon limbah daun dan (b) karakteristik LECA yang ringan.

LECA pada Gambar 4.1(b) mengambang karena densitasnya yang lebih kecil daripada air sehingga sifatnya ringan. Sifat ringan ini juga dimiliki oleh LECA berbadan dasar *clay* (Lee *et al.*, 2009: 819). Pada saat pengujian pada t_0 LECA akan terapung di air namun selang beberapa saat LECA akan tenggelam. Hal ini menunjukkan bahwa LECA telah terisi oleh air. Air dapat terserap oleh LECA dalam rentang waktu $t_0 + \Delta t$ dikarenakan ruang kosong. Ruang kosong tersebut terbentuk akibat PEG yang menguap pada proses pemanasan pada $t=120$ °C. Ruang kosong inilah yang disebut dengan pori. Pori yang telah ditempati air menjadikan massa LECA semakin besar dan menjadikannya dapat tenggelam.

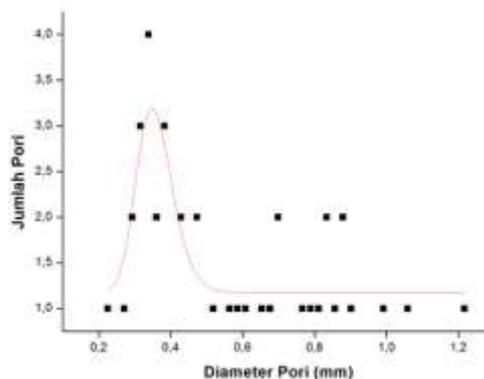
Sifat fisis LECA akibat penambahan persen massa PEG dapat diketahui dari besaran dasar yang akan dikaji. Berdasarkan perannya sebagai aktivator pembentuk pori, maka distribusi ukuran pori menjadi parameter yang penting untuk dikaji. Tabel 4.1 menunjukkan distribusi ukuran pori dan penampang melintang LECA untuk tiap variasi persen massa PEG yang diperoleh dari mikroskop optik merk Moritex.

Sifat fisis LECA teramati dari perubahan distribusi ukuran pori. Seperti yang telah disajikan oleh Tabel 4.1, bahwa penambahan persen massa PEG yang semakin besar mengakibatkan distribusi ukuran pori berubah dan memang secara

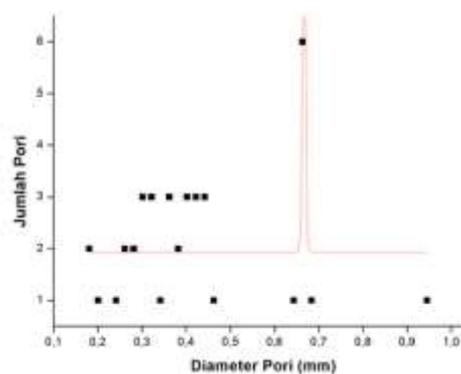
Tabel 4.1 Morfologi dan Distribusi Ukuran Pori LECA

Persen Massa PEG (%)	Morfologi LECA	Distribusi Pori
1	2	3
5		
10		
15		

20



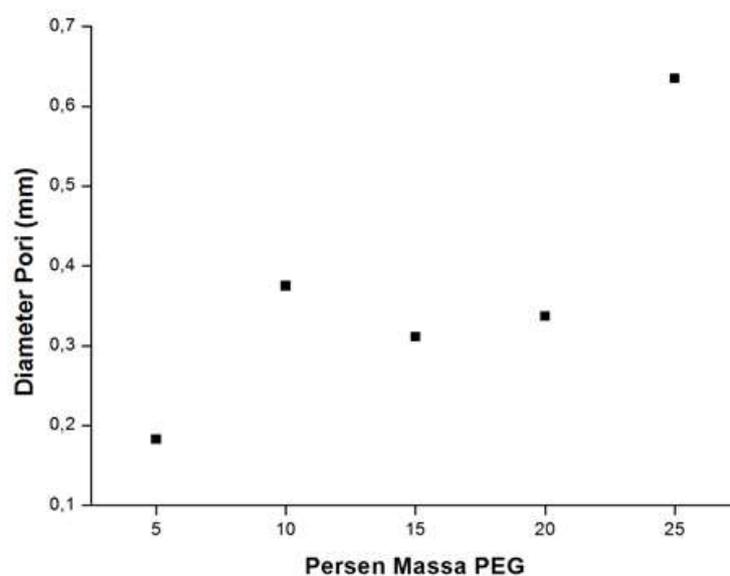
25



umum ukuran pori dalam sebuah material tidak seragam (Nimmo, 2004). Hal tersebut membutuhkan analisis distribusi ukuran pori yang dominan pada suatu material.

LECA dengan persen massa PEG sebesar 5% memiliki diameter pori yang dominan sebesar 0.183 mm. Untuk LECA dengan persen massa PEG sebesar 10% memiliki diameter pori dominan sebesar 0.375 mm kemudian untuk LECA dengan persen massa PEG sebesar 15%, 20%, dan 25% memiliki diameter pori dominan yaitu 0.311 mm, 0.337 mm, dan 0.635 mm. Dilihat dari ukuran pori, penambahan PEG yang semakin banyak tidak selalu sejalan dengan diameter pori yang semakin besar akan tetapi pengaruh PEG lebih dominan terhadap banyaknya ukuran pori pada LECA. LECA dengan PEG sebesar 5%, 10%, 15%, dan 25% memiliki ukuran pori sebanyak 16, 11, 19, 18 macam ukuran sedangkan LECA

dengan penambahan PEG sebesar 20% memiliki ukuran pori terbanyak yaitu 26 macam. Agar lebih jelas, beragam ukuran pori pada LECA disajikan pada lampiran. Pengaruh PEG terhadap diameter pori ditunjukkan pada Gambar 4.2.

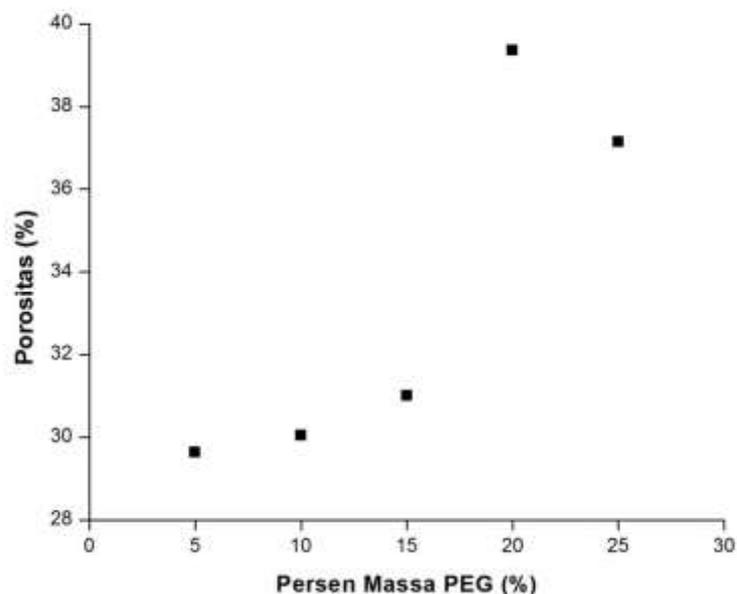


Gambar 4.2 Distribusi ukuran pori rata-rata LECA akibat pengaruh persen massa

4.2 Porositas LECA

Porositas merupakan persentase ruang kosong yang berada pada sebuah material. Porositas juga dapat diartikan sebagai fraksi dari total volume suatu material yang ditempati oleh pori (Nield & Bejan, 2013: 4). Karakteristik porositas banyak menjadi perhatian dunia karena material yang memiliki porositas dapat dimanfaatkan sebagai filter, *active carbon*, katalis, dsb. Porositas pada suatu material dapat mempengaruhi karakteristik fisis material tersebut seperti kemampuan dalam mengabsorpsi fluida. Porositas yang dimiliki LECA menjadi bahasan yang penting karena fungsi dari LECA sendiri sebagai media pengabsorpsi air untuk tanaman hidroponik.

Kinerja LECA sebagai media pengabsorpsi air sangat dipengaruhi oleh persentase pori yang dimiliki. Dalam dunia komposit, persentase pori dalam sebuah material dapat direkayasa dengan menambahkan polimer yang memiliki titik leleh yang lebih rendah dari material penyusun utama. Salah satu polimer yang digunakan untuk membentuk dan memvariasikan pori adalah *Polyethylene Glycol* (PEG). Porositas LECA diestimasi dengan pendekatan sederhana yaitu selisih densitas LECA pada kondisi basah dan kering (Nimmo, 2004: 296). Distribusi nilai porositas LECA dengan variasi persen massa PEG ditunjukkan pada Gambar 4.3. Nilai porositas LECA dari limbah daun teramati meningkat dengan kenaikan persen massa PEG. Hal ini dikarenakan penambahan PEG yang semakin besar maka pori yang terbentuk akan semakin banyak dan mengakibatkan porositas akan semakin tinggi (Hatori *et al.*, 2001: 836; Aminudin *et al.*, 2013: 47). Hal ini memungkinkan penyerapan air akan lebih maksimal. Hasil ini menunjukkan bahwa PEG sebagai aktivator pori dalam LECA sangat efektif. Pada proses pemanasan dengan temperatur yang cukup rendah dan waktu yang relatif singkat telah berhasil menjadikan PEG pada LECA menguap.



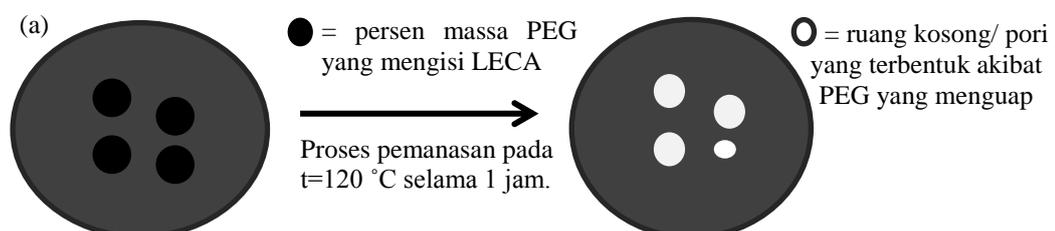
Gambar 4.3 Distribusi nilai porositas LECA akibat variasi persen massa PEG 5%,10%, 15%, 20%, dan 25%.

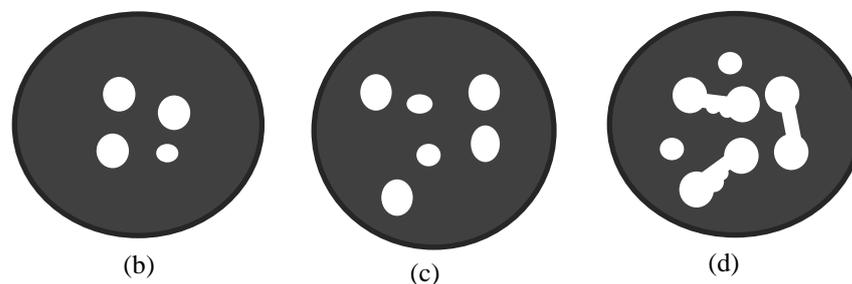
Pori dapat dianggap sebagai kumpulan saluran dimana cairan dapat mengalir. Lebar efektif dalam pori pun bervariasi disepanjang pori tersebut. Pori merupakan bagian yang relatif luas sedangkan *neck* pori adalah bagian yang relatif sempit. Secara garis besar, kenaikan porositas pada penambahan persen massa PEG sebesar 5%, 10% dan 15% tidak terlalu tinggi. Hal ini dikarenakan pori masih berupa individu pori yang memiliki banyak *neck* pori. Diduga pada penambahan persen massa PEG tersebut, air yang diserap masih sulit untuk berpindah dari pori satu ke pori lainnya dikarenakan air harus melalui banyak *neck* pori yang relatif sempit (Nimmo, 2004: 297).

Fenomena lainnya teramati pada LECA dengan persen massa PEG sebesar 20%, pada komposisi ini terjadi lonjakan nilai porositas yang signifikan.

Diprediksi bahwa pembentukan pori pada komposisi ini menyebabkan pori saling terhubung satu sama lain. Selain itu juga menyebabkan peluang pori memiliki tetangga yang dekat semakin besar. Ilustrasi pembentukan pori akibat penambahan PEG ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada ilustrasi tersebut dapat diketahui pori-pori yang terhubung akibat penambahan PEG yang semakin banyak tentunya akan membentuk pori semakin luas yang dapat mempermudah air bergerak. Berbeda dengan hal tersebut, pori yang belum terhubung menjadikan air sulit untuk bergerak dikarenakan air harus melewati *neck* pori yang relatif sempit lebih dari sekali.

Porositas LECA dengan persen massa PEG sebesar 25% mengalami penurunan. Diduga pembentukan pori pada komposisi ini mengalami saturasi. Hal tersebut dikarenakan banyaknya pori pada LECA yang dibentuk PEG sebesar 25% tidak jauh berbeda dengan pori yang dibentuk oleh PEG sebesar 20%. Selain itu, faktor lain yang mendukung penurunan porositas adalah distribusi PEG yang tidak merata di dalam LECA. Distribusi PEG tersebut diduga tidak seluruhnya berada di dalam LECA melainkan berada di permukaan LECA sehingga air yang mengisi pori tidak maksimal. Fenomena porositas LECA ini dipengaruhi oleh struktur pori termasuk distribusi ukuran pori, bentuk geometris, persentase *broken grains*, dan interkoneksi antar pori (Ke *et al.*, 2009: 2822; Wang *et al.*, 2012: 22).



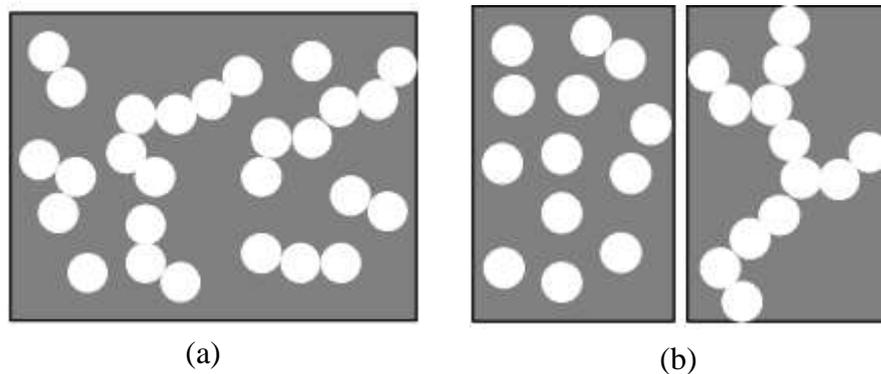


Gambar 4.4 Ilustrasi pembentukan pori pada LECA (a) akibat pemanasan dengan persen massa PEG, (b) 10%, (c) 15%, dan (d) 20%.

Ilustrasi pembentukan pori diatas telah umum digunakan untuk menjelaskan *porous material* yaitu pergerakan ion pada *porous electrodes* dan efek komposisi dan struktur pori elektroda pada *electrochemical capacitors* (Biesheuvel *et al.*, 2012: 580; Lin *et al.*, 2002: A167). Gambar 4.4 menunjukkan proses pembentukan pori pada LECA akibat PEG yang menguap ketika dipanaskan. Semakin banyak PEG maka pori yang terbentuk semakin banyak. Porositas sebuah material dipengaruhi oleh distribusi bentuk pori yang meliputi *polydisperse* dan *monodisperse*. *Polydisperse* diartikan sebagai distribusi bentuk pori yang beragam sedangkan *monodisperse* memiliki distribusi bentuk pori yang cenderung seragam. Material yang memiliki beragam bentuk pori akan menghasilkan porositas yang besar sedangkan yang seragam cenderung akan memiliki porositas yang kecil (Nimmo, 2004; 295-296).

Terlihat pada Gambar 4.4b dan 4.4c, pori yang terbentuk dengan penambahan persen massa PEG sebesar 20% telah menjadikan LECA memiliki ukuran pori yang beragam sehingga porositas pada PEG tersebut mengalami lonjakan yang signifikan. Fenomena porositas yang terjadi pada LECA berkaitan

dengan kemampuan cairan dalam bergerak pada pori-pori bahan. Kemampuan ini disebut dengan permeabilitas. Permeabilitas dalam material berpori ditentukan oleh koneksi antar pori (Abdullah & Khairurrijal, 2009: 16). Medium berpori dimodelkan sebagai gelembung-gelembung yang tersebar dalam matrik yang padat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Medium poros yang dimodelkan sebagai gelembung-gelembung (*void circles*) yang tersebar pada matrix padat (hitam) (a) gelembung-gelembung yang tidak terkoneksi (kiri) dan (b) gelembung yang terkoneksi (kanan) (Abdullah & Khairurrijal, 2009: 16).

Material yang terdiri atas pori-pori yang tidak terhubung akan memiliki permeabilitas yang kecil sebaliknya material dengan pori-pori yang saling terhubung akan berdampak pada permeabilitasnya yang besar. Pada Gambar 4.5(b) terlihat bahwa jumlah gelembung pada bagian kiri samadengan gelembung pada bagian kanan. Akan tetapi permeabilitas Gambar 4.5(b) bagian kanan lebih besar daripada bagian kiri. Hal ini dikarenakan pori-pori pada Gambar 4.5(b) bagian kanan telah terkoneksi. Pada jumlah pori tertentu (pori kritis), interkoneksi antar pori hampir merata di dalam material, hal ini yang menyebabkan terjadinya peningkatan porositas secara signifikan (Abdullah & Khairurrijal, 2009: 16).

4.3 Laju Absorpsi dan Laju Evaporasi LECA sebagai Media Penyimpan Air

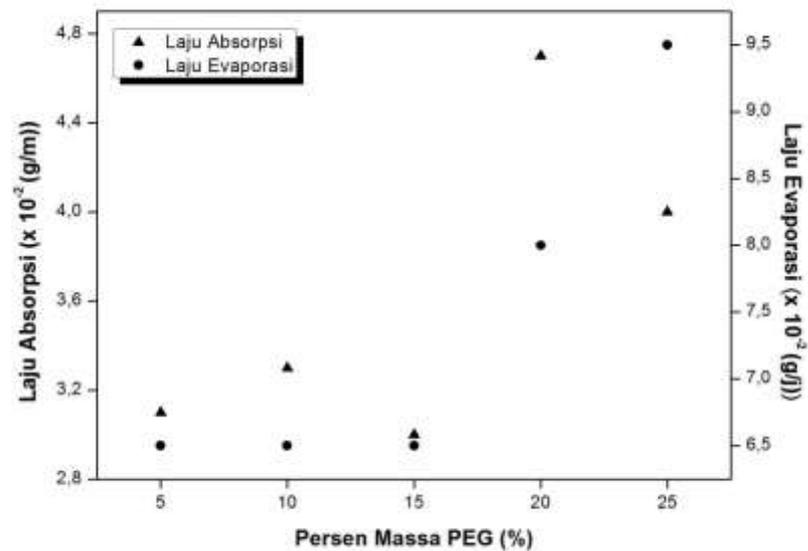
Sebagai media penyimpan air, LECA haruslah memiliki sifat absorpsi yang baik. Medium penyimpan air yang mampu menyimpan air secara efisien dengan waktu penyimpanan yang lama akan meminimalisir penggunaan air untuk fungsional tertentu. Absorpsi yang LECA bergantung pada porositas. Porositas yang tinggi akan menjadikan LECA memiliki daya absorpsi yang tinggi. Hal ini dikarenakan semakin banyak pori yang terbentuk maka akan semakin banyak pula air yang dapat mengisi LECA. Pengujian absorpsi dilakukan dengan menghitung selisih densitas setelah LECA direndam dalam air selama 30 menit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 LECA direndam dalam *aquades*.

Pengujian tersebut untuk mengetahui banyaknya air yang mengisi pori-pori LECA dalam waktu tertentu. Grafik hasil karakterisasi laju absorpsi ditunjukkan pada Gambar 4.7. Tiga variasi awal persen massa PEG yaitu 5%, 10%, dan 15% memberikan laju absorpsi dalam rentang yang hampir sama yaitu

$3-3,3 \times 10^{-2}$ g/m. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan PEG pada komposisi tersebut belum efektif dikarenakan air masih sulit untuk berpindah dari pori satu ke pori lainnya.

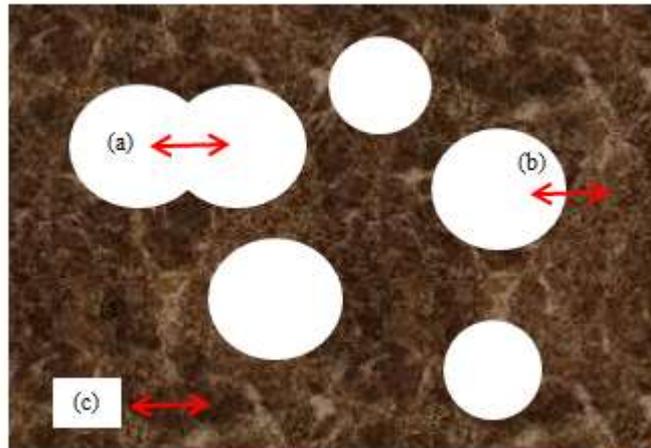


Gambar 4.7 Laju absorpsi dan laju evaporasi LECA dengan variasi persen massa PEG 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%.

Fenomena lain teramati pada laju absorpsi dengan penambahan PEG 20%. Pada komposisi tersebut, laju absorpsi naik secara signifikan. Interkoneksi antar pori pada komposisi ini masih dijadikan sebagai alasan untuk menjelaskan fenomena tersebut. Selain laju absorpsi, laju evaporasi dari LECA pun penting untuk diketahui. Laju evaporasi diestimasi dari pengurangan massa LECA setelah didiamkan selama 2 jam pada suhu kamar. Berdasarkan data yang diperoleh, laju evaporasi yang tertinggi adalah LECA dengan PEG sebesar 25%. Diduga bahwa pada penambahan persen massa PEG tersebut, semakin banyak pori yang menjadi jalan bagi udara untuk menguapkan air.

Penentuan sifat yang efektif pada material komposit sangat perlu untuk diketahui. Metode yang biasa digunakan untuk memahami *macroscopically inhomogeneous medium* adalah *Effective Medium Theory* (EMT). Pendekatan teori ini banyak menyumbang pemahaman penting dalam dunia komposit seperti pemahaman mengenai pengaruh impuritas dan pemahaman mengenai material yang berpotensi *crack*. (Ferrari, 1991: 251). Penambahan impuritas sangat perlu untuk diketahui perilaku alaminya agar dapat dikembangkan material yang tepat untuk aplikasi tertentu. Sifat fisis dari suatu material yang ditambah dengan impuritas tidak akan tepat kecuali dicari distribusi dari impuritas yang diberikan. Salah satu impuritas yang dapat memberikan efek besar adalah impuritas yang dapat menyebabkan *void* (Steinhardt, 1992: 1).

LECA merupakan material dengan *void*/ pori didalam matrik karbon. Hal ini telah memberikan karakteristik seperti yang telah dijelaskan pada Bab 4.1 Penambahan persen massa PEG sebesar 20% telah menyebabkan porositas dan laju absorpsi melonjak dengan tajam. Karakteristik porositas dan laju absorpsi pada penambahan persen massa PEG tersebut dapat dijelaskan dengan EMT. Material berpori LECA memiliki tiga tipe kontak yaitu *region* pori dengan pori, *region* karbon dengan karbon, dan *region* pori dengan karbon. Tiga tipe *region* tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Tiga tipe kontak dalam material berpori, *region* (a) pori dengan pori (b) karbon dengan pori, dan (c) karbon dengan karbon.

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa pergerakan air pada media berpori dipengaruhi oleh tiga tipe kontak *region* tersebut. Resistensi cairan ini sangat penting untuk menjelaskan absorpsi yang dimiliki LECA. Air yang melewati *region* pori dengan pori akan lebih mudah bergerak dikarenakan resistansi pada *region* ini kecil. Resistansi yang besar akan dialami air yang melewati *region* pori dengan karbon sedangkan untuk air yang melewati *region* karbon dengan karbon, resistansi yang dihasilkan akan lebih besar lagi (Masturi *et al.*, 2012: 88-89).

Untuk dua pori yang mengalami kontak, resistansinya adalah jumlah resistansi seri dari *porous bulk* (R_{bp}) dan *neck* pori atau biasa disebut dengan *contriction resistance* (R_c) sehingga total resistansinya adalah

$$R_{pp} = R_{bp} + R_c \quad (4.1)$$

Untuk dua karbon yang mengalami kontak, total resistansinya seperti pada Persamaan 4.2.

$$R_{kk} = R_k = (1/A_k d^2) = (1/A_k d) \quad (4.2)$$

dengan absorpsi karbon (k_k) adalah absorpsi rata-rata dari karbon ke karbon.

Untuk kontak pori dan karbon, resistansi total dideskripsikan dengan Persamaan 4.3.

$$R_{pk} = \frac{1}{2} R_k \quad (4.3)$$

dan absorpsi rata-rata adalah $2A_k$.

Absorpsi pori dan absorpsi karbon dimisalkan sebagai A_1 dan A_2 , dimana $A_1 \gg A_2$. Dalam *porous material*, tiga probabilitas kontak *region* ditunjukkan pada Persamaan 4.1, 4.2, dan 4.3.

$$P_{pp} = \alpha \left(\frac{\varphi_p}{f} \right)^2 \quad (4.4)$$

$$P_{kk} = \left(1 - \frac{\varphi_p}{f} \right)^2 \quad (4.5)$$

$$P_{pm} = 2(1 - \alpha) \left(\frac{\varphi_p}{f} \right) \left(1 - \frac{\varphi_p}{f} \right) \quad (4.6)$$

dimana α adalah fraksi dari pori yang terhubung satu sama lain dan f adalah porositas dan *packing fraction* dari kisi sehingga rumusan EMT untuk tiga tipe kontak *region* tersebut disajikan pada Persamaan 4.7.

$$0 = \alpha \left(\frac{\varphi}{f} \right)^2 \frac{A_{pp} - A_e}{A_{pp} + \left(\frac{z-1}{2} \right) A_e} + \left(\frac{1-\varphi}{f} \right)^2 \frac{A_{kk} - A_e}{A_{kk} + \left(\frac{z-1}{2} \right) A_e} + 2(1 - \alpha) \left(\frac{\varphi}{f} \right) \left(\frac{1-\varphi}{f} \right) \frac{A_{pk} - A_e}{A_{pk} + \left(\frac{z-1}{2} \right) A_e} \quad (4.7)$$

dengan A_{pp} = Absorpsi rata-rata dari *region* pori dengan pori pada saat terjadi kontak, A_{kk} = Absorpsi rata-rata dari *region* karbon dengan karbon pada saat

terjadi kontak, dan A_{pk} = Absorpsi rata-rata dari *region* pori dengan karbon dan z adalah nomor koordinasi (Masturi *et al.*, 2012: 87-89). Dapat disimpulkan bahwa kemampuan absorpsi rata-rata dari *region* pori dengan pori lebih besar dari pada absorpsi pori dengan karbon dan absorpsi karbon dengan karbon.

4.4 Unjuk Kerja LECA sebagai Media Tanam Hidroponik

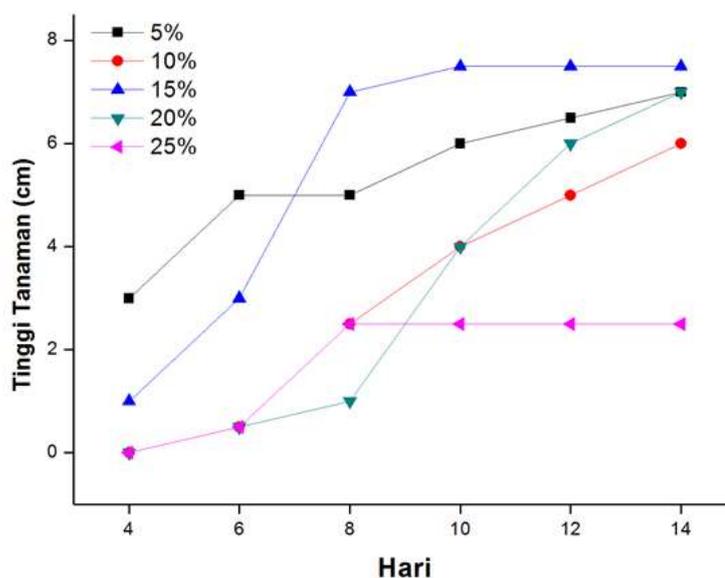
Unjuk kerja LECA dilakukan untuk mengetahui pengaruh distribusi ukuran pori LECA sebagai fungsinya sebagai media tanam hidroponik. Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 4.1-4.2, bahwa penambahan PEG yang bervariasi telah mempengaruhi sifat LECA seperti porositas, laju absorpsi, dan laju evaporasi. Pada Gambar 4.9 ditunjukkan unjuk kerja LECA sebagai media tanam hidroponik.



Gambar 4.9 Unjuk kerja LECA sebagai media tanam hidroponik selama 10 hari.

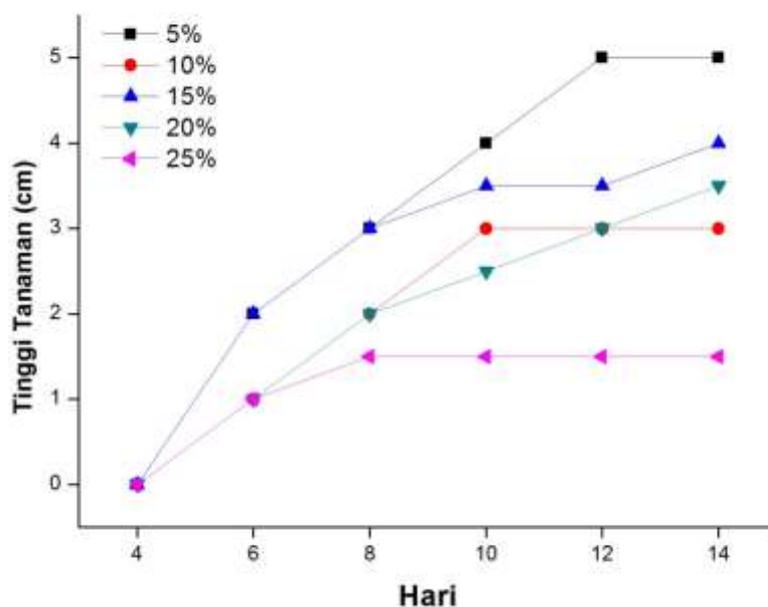
Biji yang digunakan pada pengujian adalah biji dari tanaman Kangkung (*Ipomea aquantica*), Pakchoy (*Brassica rapa* L.), Bunga kertas (*Zinnia elegans* Jacq.), Bunga tapak kuda (*Ipomea purpurea*), dan Bunga kenikir ditumbuhkan pada media LECA selama 2 minggu. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa LECA sangat efektif sebagai media penyimpanan air untuk tanaman hidroponik. Hal ini dikarenakan kelima biji tersebut dapat tumbuh dan berkembang.

Unjuk kerja LECA sebagai media tanam hidroponik diamati dari pertumbuhan tanaman. Dari data pengamatan yang diperoleh, tanaman kangkung tumbuh baik pada semua media LECA akan tetapi optimum pada penambahan persen massa PEG sebesar 15%, dimana tinggi tanaman kangkung mencapai 7,5 cm dalam waktu 14 hari seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10.



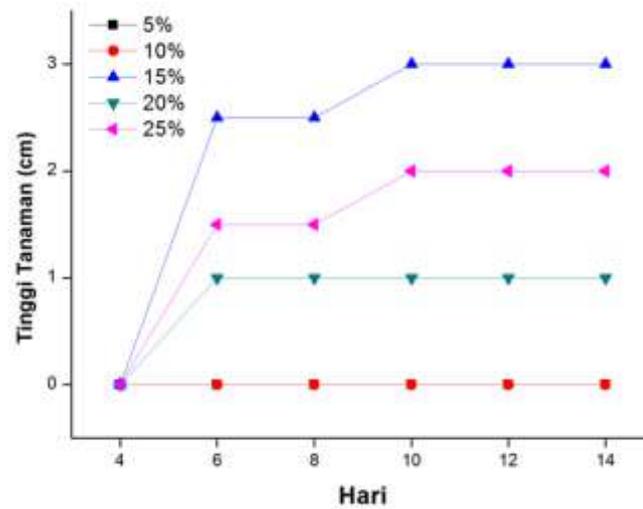
Gambar 4.10 Pengaruh variasi persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman kangkung selama 14 hari.

Tanaman kedua yaitu pakchoy juga tumbuh baik pada media LECA dengan penambahan persen massa PEG sebesar 5% sedangkan pakchoy pada media LECA dengan penambahan persen massa PEG sebesar 25% mengalami pertumbuhan yang kurang baik seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.11.



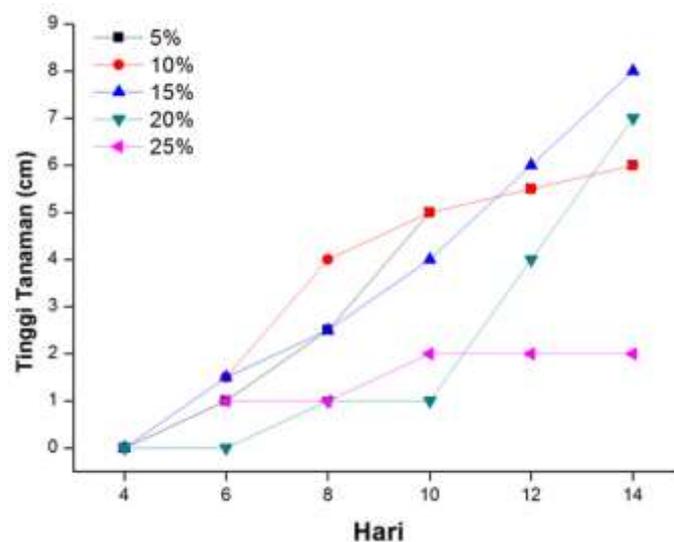
Gambar 4.11 Pengaruh variasi persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman pakchoy selama 14 hari.

Ditinjau dari tinggi tanaman, Bunga kertas menunjukkan pertumbuhan yang kurang baik. Selama 14 hari, tinggi tanaman Bunga kertas hanya mencapai 3 cm pada media LECA dengan penambahan persen massa PEG sebesar 15% dan Bunga kertas pada media LECA dengan persen massa PEG sebesar 10% tidak tumbuh. Fenomena lain yang dapat dilihat adalah pertumbuhan tanaman yang stagnan pada hari ke 10. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 4.12.

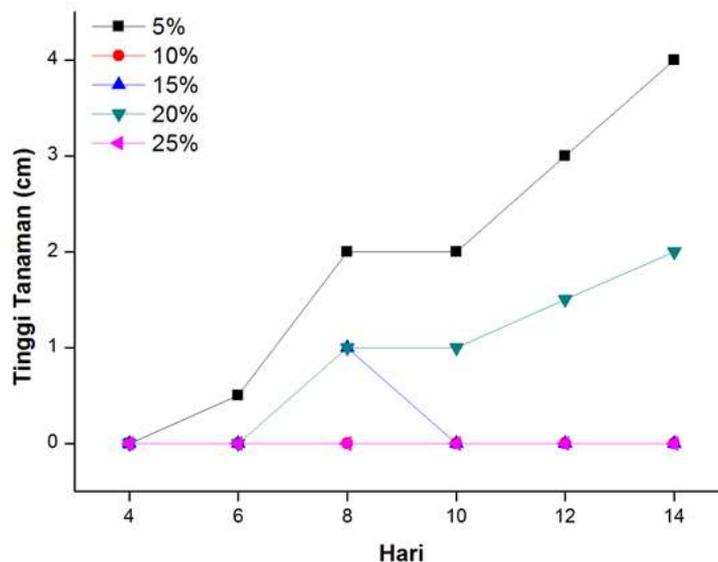


Gambar 4.12 Pengaruh persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman Bunga kertas selama 14 hari.

Pertumbuhan dua tanaman yang terakhir yaitu Bunga tapak kuda dan Bunga kenikir menunjukkan perbedaan. Tanaman Bunga tapak kuda tumbuh dengan baik dan tingginya mencapai 8 cm pada media dengan persen massa PEG sebesar 15%. Grafik pertumbuhan kedua tanaman tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14.



Gambar 4.13 Pengaruh persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman Bunga tapak kuda selama 14 hari.



Gambar 4.14 Pengaruh persen massa PEG pada pertumbuhan tanaman Bunga kenikir selama 14 hari.

Dapat diambil kesimpulan untuk media LECA dengan penambahan persen massa PEG sebesar 25% semua tanaman tidak dapat tumbuh dengan baik. Dari hasil ini diketahui bahwa LECA dengan persen massa PEG dan karakteristik tertentu hanya cocok untuk tanaman tertentu pula. Media tanam LECA dengan penambahan PEG sebesar 15% cocok untuk pertumbuhan tanaman Kangkung, Bunga kertas, dan Bunga tapak kuda sedangkan media tanam LECA dengan penambahan PEG sebesar 5% cocok untuk pertumbuhan tanaman Pakchoy dan Bunga kenikir. Selain itu, karakteristik tanaman juga akan mempengaruhi karena diduga ada tanaman yang cocok tumbuh di media yang memiliki banyak air dan ada tanaman yang cocok tumbuh di media yang minim air.

Fenomena menarik terjadi pada LECA dengan penambahan persen massa PEG sebesar 20%. Unjuk kinerja pada komposisi tersebut memperlihatkan bahwa

semua biji tanaman dapat tumbuh sehat. Hal ini diprediksi karena LECA pada komposisi ini memiliki banyak pori sehingga banyak mengandung air untuk kelangsungan hidup tanaman. Berbeda dengan komposisi persen massa PEG sebesar 5%, 10%, 15%, dan 25%, pada komposisi tersebut tidak semua biji tanaman yang diujikan dapat tumbuh dengan sehat. Selain pertumbuhan tanaman, LECA dianggap efektif sebagai media tanam dikarenakan akar tanaman biji hidroponik yang diujikan mencengkram LECA seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.



(a)

(b)

Gambar 4.15 (a) Akar tanaman yang mencengkram LECA dan (b) pertumbuhan LECA setelah unjuk kerja selama 14 hari.

BAB V

PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Fabrikasi LECA berbahan dasar karbon dari limbah daun dengan metode pencampuran sederhana telah berhasil dibuat. LECA berbahan dasar karbon limbah daun memiliki karakteristik yang sama dengan LECA berbahan dasar *clay* seperti ringan dan dapat dimanfaatkan sebagai media penyimpan air.
2. Rekayasa pori yang dilakukan dengan penambahan persen massa PEG sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, 25% telah mempengaruhi sifat fisis LECA. Distribusi ukuran pori pada LECA teramati meningkat sejalan dengan penambahan persen massa PEG yang semakin besar. Distribusi ukuran pori juga telah mempengaruhi porositas, laju absorpsi, dan laju evaporasi. Fenomena porositas yang terjadi maksimum pada penambahan PEG sebesar 20%.
3. LECA dengan kemampuan menyimpan air efektif digunakan untuk media tanam hidroponik. Hal ini diketahui dari hasil pengujian bahwa biji tanaman hidroponik telah tumbuh pada media LECA.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian di atas, beberapa saran yang dapat diberikan yaitu :

1. Fabrikasi LECA selanjutnya disarankan untuk menggunakan metode sol-gel agar distribusi pori dapat terkontrol dan merata.
2. Karakterisasi lebih lanjut seperti kuat tekan dan BET diperlukan untuk mengetahui beban maksimum yang dapat ditahan oleh LECA dan untuk mengetahui secara pasti ukuran pori yang berada pada LECA.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. & Khairurrijal. 2009. Gelation Model for porosity Dependent Fluid Permeability in Porous Materials. *Jurnal Matematika dan Sains*, 14(1): 15-19.
- Aminudin, N.N., H. Basri, Z. Harun, M.Z. Yunos, & G.P. Sean. 2013. Comparative Study on Effect of PEG and PVP as Additives on Polysulfone (PSF) Membrane Structure and Performance. *Jurnal Teknologi*, 65(4): 47-51.
- Ardakani, A. & M. Yazdani. 2014. The Relation Between Particle Density and Static Elastic Moduli of Lightweight Expanded Clay Aggregate. *Applied Clay Science*, 93-94: 28-34.
- Baccour, H., M. Medhioub, F. Jamoussi, & T. Mhiri. 2009. Influence of firing temperature on the ceramic properties of Triassic clays from Tunisia. *Journal Material Processing Technology*, 209: 2812-2817.
- Baldwin, K.R. & J.T. Greenfield (eds). 2009. *Composting on Organic Farms in Center for Environmental Farming Systems*. North Carolina: North Carolina Cooperative Extension Service.
- Biesheuvel, P.M., Y. Fu, & M.Z. Bazant. 2012. Electrochemistry and Capacitive Charging of Porous Electrodes in Asymmetric Multicomponent Electrolytes. *Russian Journal of Electrochemistry*, 48(6): 580-592.
- Blasi, C.D. 2008. Modeling Chemical and Physical Processes of Wood and Biomass Pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34: 47-90.
- Boshi, Q.H., Y. Tian, X-Y. Dong, S. Bai, & Y. Sun. 2003. Chitosan coated silica bead as immobilized metes affinity support for protein absorption. *Biochemical Engineering Journal*, 16: 284-289.
- Calderon-Moreno, J.M., S. Preda, L. Predoana, M. Zaharescu, M. Stoica, M. Gartner, M. Mihala, & B. Serban. 2014. Effect of Polyethylene Glycol on Porous Transperent TiO₂ Films Prepared By Sol-Gel Method. *Ceramics International*, 40: 2209-2220.
- Cheng *et al.* 2011. Mass absorption efficiency of elemental carbon and water-soluble organic carbon in Beijing, China. *Atmos. Chem. Phys.*, (11): 11497-11510.

- Cui, H.Z., T.Y. Lo, S.A. Memon, & W. Xu. 2012. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 35: 149-158.
- Damanhuri, E. 2010. Kegiatan Daur Ulang Sampah di Indonesia. Bandung: ITB Press.
- Damayanti, A & Megawati. 2011. Pengaruh Suhu terhadap Kecepatan Reaksi dan Reaksi Hidrolisis Lignoselulosa dari Tongkol Jagung dengan Asam Encer pada Kondisi Non-isotermal. *Jurnal Kompetensi Teknik*, 2(2): 89-94.
- Fairus, S., Salafudin, L. Rahman, & E. Apriani. 2011. Pemanfaatan sampah organik secara padu menjadi alternatif energi : Biogas dan Precursor Briket. *Prosiding Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*, Yogyakarta (22 Februari 2011).
- Ferrari, M. 1991. Asymmetry and the high concentration limit of the Mori-Tanaka effective medium theory. *Mechanics of Materials*, 11: 251-256.
- Fitzer, E. 1987. The Future of Carbon-Carbon Composite. *Pergamon Journal*, 25(2): 163-190.
- Goldberg, E.D. 1985. *Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution*. New York: Wiley.
- Gonzales-Corrochano, B., J. Alonso-Azcarate, & M. Rodas. 2009. Production of Lightweight Aggregates from Mining and Industrial Wastes. *Journal of Environmental Management*, 90: 2801-2812.
- Gunning, P.J., C.D. Hills, & P.J. Carey. 2009. Production of Lightweight aggregate from industrial waste and carbon dioxide. *Waste Management*, 29: 2722-2728.
- Hadiyawardman, A. Rijal, B. Nuryadin, B., M. Abdullah, and Khairurrijal. 2008. Fabrication of super-strong, lightweight, and transparent nanocomposite materials using simple mixing method. *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi*, pp. 15-21.
- Hatori, H., T. Kobayashi, Y. Hanzawa, Y. Yamada, Y. Iimura, T. Kimura, and M. Shiraishi. 2001. Mesoporous Carbon Membranes from Polyimide Blended with Poly(ethylene glycol). *Journal of Applied Polymer Science*, 79: 836-841.
- Juma, M., Z. Korenova, J. Markos, J. Annus, & L. Jelemensky. 2006. Pyrolysis and Combustion of Scrap Tire. *Petroleum & Coal*, 48(1): 15-26.

- Kalhuri, E.M., K. Yetilmezsoy, & N. Uygur. 2013. Modeling of Absorption of Toxic Chromium on Natural and Surface Modified Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA). *Applied Surface Science*, 287: 428-442.
- Kasischke, E., and E.E. Hoy. 2012. Controls on Carbon Consumption During Alaskanwildland Fires. *Global Change Biology*, 18: 685-699.
- Ke, Y., A.L. Beaucour, S. Ortola, S. Dumontet, & R. Cabrillac. 2009. Influence of volume fraction and characteristic og lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 105: 2821-2828.
- Koh, Y-H., J-H. Song, E-J. Lee, & H.E. Kim. 2006. Freezing Dilute Ceramic/ Camphene Slurry for Ultra-High Porosity Ceramics with Completely Interconnected Pore Networks. *Journal of The American Society*, 89(10): 3089-3093.
- Kourti, L. & C.R. Cheeseman. 2010. Properties and Microstructure of Lightweight Aggregate Produced from Lignite Coal Fly Ash and Recycle Glass. *Resource, Conservation and Recycling*, 54: 769-775.
- Kroschwitz, J. 1987. *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Kumagai, S., and J. Sasaki. 2009. Carbon/silica composite fabricated from rice husk by means of binderless hot-pressing. *Bioresource Technology*, 100: 3308-3315.
- Lee, J-Y., M. Kim, & S-C. Kwon. 2009. *Effect of Polyethylene Glycol ion Electrochemically Deposited Trivalent Chromium Layers*. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 19: 819-823.
- Lin, C.L., B.N. Popov, & H.J. Ploehn. 2002. Modeling the Effects of Electrode Composition and Pore Structure on The Performance of Electrochemical Capacitors. *Journal of The Electrochemical Society*, 149(2):A167-A175.
- Lin, Y-C., J. Cho, G.A. Tompsett, P.R. Westmoreland, & G.W. Huber. 2009. Kinetics and Mechanism of Cellulose Pyrolysis. *Journal Physics Chemistry*, 113: 20097-20107.
- Liu, X., K.S. Chia, & M-H. Zhang. 2011. Water Absorption, Permeability, and Resistance to Chloride-Ion Penetration On Lightweight Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 25: 335-343.

- Lo, T.Y. & H.Z. Cui. 2004. Effect of Porous Lightweight Aggregate on Strength of Concrete. *Materials Letters*, 58: 916-919.
- Lo, T.Y., H.Z. Cui, W.C. Tang, & W.M. Leung. 2008. The effect of aggregate absorption on pore area at interface zone of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 22: 623-628.
- Lufina, I., B. Susilo, & R. Yulianingsih. 2013. Studi Pembakaran Minyak Karet (*Hevea brasiliensis*) sebagai Bahan Bakar pada Kompor Rumah Tangga. *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 1(1): 60-68.
- Masturi, M. Abdullah, & Khairurrijal. 2011. High compressive strength of home waste and polyvinyl acetate composite containing silica nanoparticle filler, *J Mater Cycle Waste Manag*, , pp.225-1.
- Masturi, Silvia, M.P. Aji, E. Sustini, Khairurrijal, & M. Abdullah. 2012. Permeability, Strength and Filtration Performance for Uncoated and Titania-Coated Clay Wastewater Filters. *American Journal of Environmental Sciences*, 8(2): 79-94.
- Nield, D.A & A. Bejan. 2013. *Mechanics of Fluid Flow Through a Porous Media*. Convection in Porous Media. New York: Springer Science.
- Nimmo, J.R. 2004. *Porosity and Pore Size Distribution*. Encyclopedia of Soils in the Environment, London: Elsevier.
- Nuevaespana, J. & J.R. Matias. n.d. *Comparison of The Physical Profile of Klayton and LECA as Media For Aquaponics*. Iloilo: Philippines.
- Priatama, A., M. Abdullah, Khairurrijal dan H. Mahfudz. 2010. Fabrication of Microporous Water Filter Using Titanium Dioxide Particles, Silica Particles, and Polyethylene Glycol. *ITB J. Eng. Sci*, 42(1): 39-52.
- Rahayu, M., Samanhudi dan A.S. Widodo. 2008. Pengaruh Macam Media dan Konsentrasi Pupuk Fermentasi Ampas Tahu terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Seledri. *Sains Tanah-Jurnal Ilmiah Ilmu Tanah dan Agroklimatologi*, 5(II): 75-82.
- Rakhmatullah, D. Karsa, G. Wiradini, N.P. Ariyanto. 2007. *Pembuatan Adsorben dari Zeolit Alam dengan Karakteristik Adsorption Properties untuk Kemurnian Bioetanol*. Bandung : Program Studi Teknik Fisika. Fakultas Teknologi Industri. ITB.
- Rombaldo, C.F.S & A.C.L. Lisboa. 2008. Effect of Operatinrg Conditions on Scrap Tire Pyrolysis. *Materials Research*, 11(3): 359-363.

- Serba hidroponik. 2015. *Menanam Anggrek Hidroponik*. Online. Tersedia di <http://serbahidroponik.blogspot.co.id/2015/02/menanam-anggrek-hidroponik.html> [akses 02-02-2015].
- Sheth, C., B.R. Parekh, L.M. Manocha, & P. Sheth, P. 2013. Influence of Conductive Carbon Black from Waste Rubber Tire on Electrical and Mechanical Response of Polymer Composites. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences (IJIES)*, pp.5-10.
- Shrestha, G., S.J Train, & C.W. Swanston. 2010. Black Carbon's Properties and Role in the Environment: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 2: 294-320.
- Steinhard, P.J. 1992. Effective Medium Theory for The Elastic Properties of Composites and Acoustics Application, Virginia: JASON The Mitre Corporation.
- Sulhadi, M.I. Savitri, M.A.N. Said, I. Muklisin, R. Wicaksono, & M.P. Aji, 2014a. Fabrication of mesoporous composite from waste glass and its use as a water filter. *AIP Conference Proceedings*, 1586: 139-142.
- Sulhadi dan M.P. Aji. 2014b. *Fabrikasi Material Komposit Berpori dari Limbah Kaca untuk FilterAir*, Laporan Penelitian Hibah Bersaing, Semarang : LP2M UNNES.
- Sulhadi, Susanto, Savitri, M.I., Said, M.A.N, Wiguna, P.A., dan Aji, M.P.2015, Heating Time Dependent Pore Size of Porous Composite from Waste Glass. *Advanced Materials Research* (in peer review).
- Surjandari, I., A. Aidayatno, & A. Supriatna. 2009. Model Dinamis Pengelolaan Sampah untuk Mengurangi Beban Penumpukan. *Jurnal Teknik Industri*, 11(2): 134-147.
- Thoha, M.Y. & D.E. Fajrin. 2010. Pembuatan Briket Arang dari Daun Jati dengan Sagu Aren sebagai Pengikat. *Jurnal Teknik Kimia*, (1)1: 34-43.
- Toruan, A.L., O.H. Kaseke, L.F. Kereh, & T.K. Sendow. 2013. Pengaruh Porositas Agrerat terhadap Berat Jenis Maksimum Campuran. *Jurnal Sipil Statik*, 1(3): 190-195.
- Utama, H.S., S.M. Isa, & A. Indragunawan. 2006. Rancangan dan Implementasi Sistem Otomatisasi Pemeliharaan Tanaman Hidroponik. *TESLA Jurnal Teknik Elektro*, 8(1): 1-4.
- Wang, C., L. Feng, W. Li, J. Zheng, W. Tian, & X. Li. 2012. Shape-stabilized Phase Change Materials based on Polyethylene Glycol/Porous Carbon

Composite: The Influence of Pore Structure of The Carbon Materials. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 105: 21-26.

Wiguna, P.A., Susanto, M.A.N. Said, R. Wicaksono, M.P. Aji, & Sulhadi. 2014. Fabrikasi Tinta Printer Berbahan Dasar Pigmen Organik dari Sampah Daun. *Jurnal Fisika*, 4(2): 64-68.

Yanuar, Iwantono, E. Taer, & R. Andriani. 2010. Pengaruh Ketebalan Elektroda terhadap Nilai Kapasitansi Spesifik dan “Retained Ratio” Serbuk Gergaji Kayu Karet untuk Pembuatan Supercapacitor. *Prosiding Seminar Nasional Fisika II*, Surabaya (17 Juli 2010).

Zhi, M., F. Yang, F. Meng, M. Li, A. Manivannan, & N. Wu. 2014. Effects of Pore Structure on Performance of An Activated-Carbon Supercapacitor Electrode Recycled from Scrap Waste Tires. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, pp.1592-1598.

LAMPIRAN

5.1 Tabel Pertumbuhan Tanaman Hidroponik pada Media LECA

<i>Ipomea aquatica</i> (Kangkung)			
Hari ke	Persen Massa PEG (%)	Tinggi Tanaman (cm)	Kondisi
4	5	3	
	10	-	Pecah biji
	15	1	
	20	-	Pecah biji
	25	-	Pecah biji
6	5	5	Tumbuh cepat
	10	0,5	Tumbuh lambat
	15	3	-
	20	0,5	Tumbuh lambat
	25	0,5	Tumbuh lambat
8	5	5	Tumbuh daun
	10	2,5	Tumbuh daun
	15	7	-
	20	1	-
	25	2,5	-
10	5	6	Tumbuh cepat
	10	4	-
	15	7,5	-
	20	4	Tumbuh lambat
	25	2,5	Stagnan
12	5	6,5	Tumbuh daun
	10	5	
	15	7,5	Stagnan
	20	6	-
	25	2,5	Stagnan
14	5	7	Tumbuh daun
	10	6	
	15	7,5	Stagnan
	20	7	-
	25	2,5	Stagnan

Pakchoy (<i>Brassica rapa</i> L.)			
Hari ke	Persen Massa PEG (%)	Tinggi Tanaman(cm)	Kondisi
4	5	-	Pecah biji
	10	-	Pecah biji
	15	-	Pecah biji
	20	-	Pecah biji
	25	-	Pecah biji
6	5	2	Tumbuh daun
	10	1	-
	15	2	Tumbuh daun
	20	1	Tumbuh daun
	25	1	Tumbuh daun
8	5	3	-
	10	2	Tumbuh daun
	15	3	-
	20	2	-
	25	1,5	-
10	5	4	
	10	3	
	15	3,5	
	20	2,5	
	25	1,5	Stagnan
12	5	5	-
	10	3	Stagnan
	15	3,5	Stagnan
	20	3	-
	25	1,5	Stagnan
14	5	5	Stagnan
	10	3	Stagnan
	15	4	-
	20	3,5	-
	25	1,5	Stagnan
Bunga Kertas (<i>Zinnia elegans</i> Jacq.)			
Hari ke	Persen Massa PEG (%)	Tinggi Tanaman(cm)	Kondisi
1	2	3	4
4	5	-	-
	10	-	-
	15	-	Pecah biji
	20	-	Pecah biji
	25	-	Pecah biji
6	5	-	-
	10	-	-
	15	2,5	-
	20	1	-
	25	1,5	-

1	2	3	4
8	5	-	-
	10	-	-
	15	2,5	Tumbuh daun
	20	1	Stagnan
	25	1,5	Stagnan
10	5	-	Pecah biji
	10	-	-
	15	3	Tumbuh Daun
	20	1	Tumbuh Daun
	25	2	-
12	5	-	Stagnan
	10	-	-
	15	3	Stagnan
	20	1	Stagnan
	25	2	Stagnan
14	5	-	Stagnan
	10	-	-
	15	3 cm	Stagnan
	20	1 cm	Stagnan
	25	2 cm	Stagnan
Bunga Tapak Kuda (<i>Ipomea purpurea</i>)			
Hari ke	Persen Massa PEG (%)	Tinggi Tanaman(cm)	Kondisi
1	2	3	4
4	5	-	Pecah biji
	10	-	Pecah biji
	15	-	Pecah biji
	20	-	-
	25	-	Pecah biji
6	5	1	-
	10	1,5	-
	15	1,5	-
	20	-	-
	25	1	-
8	5	2,5	-
	10	4	Tumbuh daun
	15	2,5	Tumbuh daun
	20	1	-
	25	1	Stagnan
10	5	5	-
	10	5	Tumbuh daun
	15	4	Tumbuh daun
	20	1	Stagnan
	25	2	Tumbuh daun

1	2	3	4
12	5	5,5	-
	10	5,5	-
	15	6	Tumbuh daun
	20	4	Tumbuh daun
	25	2	Stagnan
14	5	6	-
	10	6	Tumbuh daun
	15	8	Tumbuh daun
	20	7	Tumbuh daun
	25	2	Stagnan
Bunga Kenikir (<i>Cosmos bipinnatus</i>)			
Hari ke	Persen Massa PEG (%)	Tinggi Tanaman(cm)	Kondisi
4	5	-	Pecah biji
	10	-	-
	15	-	-
	20	-	-
	25	-	-
6	5	0,5	-
	10	-	-
	15	-	Pecah biji
	20	-	-
	25	-	-
8	5	2	-
	10	-	-
	15	1	-
	20	1	-
	25	-	-
10	5	2	Tumbuh daun
	10	-	-
	15	-	Pecah biji
	20	1	Stagnan
	25	-	-
12	5	3	-
	10	-	-
	15	-	Stagnan
	20	1,5	-
	25	-	-
14	5	4	-
	10	-	-
	15	-	Stagnan
	20	2	-
	25	-	-

5.2 Beragam Ukuran Pori pada LECA

Komposisi PEG (%)	Macam Ukuran Pori (mm)	Jumlah
5%	0,136	2
	0,1813	6
	0,1926	1
	0,2265	5
	0,2719	5
	0,3172	3
	0,3625	1
	0,4078	2
	0,4615	1
	0,4985	4
	0,6344	2
	0,7251	2
	0,7704	3
	0,9517	1
	1,0423	1
1,3595	1	
10%	0,225	3
	0,30	4
	0,375	6
	0,45	5
	0,525	5
	0,600	6
	0,675	4
	0,750	4

15%	0,825	1
	0,90	1
	1,050	1
	0,1244	1
	0,1451	4
	0,1659	1
	0,2073	2
	0,2281	2
	0,2488	1
	0,2903	4
	0,3109	5
	0,3732	1
	0,3939	4
	0,4147	2
	0,4359	3
0,4561	3	
0,4769	1	
0,4976	1	
0,5183	2	
0,5391	1	
0,6842	1	
0,7049	1	
20%	0,2252	1
	0,2703	1
	0,2928	2
	0,3153	3
	0,3378	4
	0,3604	2
	0,3829	3
0,4279	2	

	0,4729	2
	0,5180	1
	0,5631	1
	0,5856	1
	0,60812	1
	0,6532	1
	0,6757	1
	0,6982	2
	0,7658	1
	0,7883	1
	0,8108	1
	0,8333	2
	0,8559	1
	0,8784	2
	0,9009	1
	0,9909	1
	1,0586	1
	1,2163	1
	0,180965	2
	0,201072	1
	0,241287	1
	0,261394	2
	0,281501	2
25%	0,301609	3
	0,321716	3
	0,341823	1
	0,36193	3
	0,382038	2
	0,402145	3
	0,422252	3

	0,462466	1
	0,643432	1
	0,663539	6
	0,683646	1
	0,94504	1

5.3 Dokumentasi Fabrikasi LECA



Gambar 5.1 Proses pirolisis limbah daun dan menghomogenkan serbuk karbon.



Gambar 5.2 Persiapan fabrikasi LECA dengan menimbang bahan-bahan yang diperlukan.



Gambar 5.3 (a) Serbuk karbon, PEG, *aquades*, dan PVAc dicampur dalam cawan, (b) diaduk, (c) LECA yang berhasil difabrikasi, (d) *furnace* untuk memanaskan LECA, dan (e) LECA yang telah dipanaskan.

5.4 Dokumentasi Karakterisasi LECA



Gambar 5.4 (a) LECA direndam dalam *aquades*, (b) karakterisasi LECA dengan Mikroskop optik.