

**PEMODELAN DAN KARAKTERISASI SIFAT
MEKANIK DAN TRANSPOR FLUIDA PADA
MATERIAL YANG TERSUSUN ATAS
NANOPARTIKEL**

DISERTASI

Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Doktor dari
Institut Teknologi Bandung

Oleh

MASTURI

NIM. 30210008

(Program Studi Fisika)



**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2013**

ABSTRAK

PEMODELAN DAN KARAKTERISASI SIFAT MEKANIK DAN TRANSPOR FLUIDA PADA MATERIAL YANG TERSUSUN ATAS NANOPARTIKEL

Oleh

MASTURI

NIM. 30210008

(Program Studi Doktor Fisika)

Metode pencampuran sederhana dan *hot-press* melalui rekayasa komposit digunakan untuk membuat material komposit dari sampah, dalam hal ini sampah daun dan kertas, menggunakan polivinil asetat (PVAc) sebagai perekat dan nanopartikel silika sebagai penguat. Komposisi optimum untuk kekuatan tekan tertinggi dari komposit pada rasio massa silika/PVAc/sampah sebesar 3:80:280. Dengan rasio massa ini, kekuatan komposit mencapai 68,50 MPa untuk sampel yang dibuat pada tekanan dan suhu *hot-press* berturut-turut sebesar 100 MPa dan 150°C dengan penekanan selama 20 menit. Penambahan nanopartikel silika meningkatkan kekuatan tekan komposit sampai sekitar 50% dibandingkan kekuatan komposit sebelum penambahan silika (45,60 MPa). Kekuatan tekan yang lebih tinggi diperoleh dengan menaikkan tekanan penekanan (*hot-press*). Pada tekanan 120 MPa, suhu 150°C, dan lama penekanan 20 menit diperoleh kekuatan tekan sebesar 69,10 MPa. Ketika lama penekanan dinaikkan menjadi 45 menit dengan tekanan 120 MPa, kekuatan tekan komposit mencapai 84,37 MPa.

Dengan menggunakan rekayasa komposit, dibuat juga keramik berpori dengan bahan clay untuk aplikasi filter air kotor menggunakan metode pencampuran kering dan sol gel dan diikuti tahap pembakaran keramik. Polietilen glikol (PEG) digunakan sebagai pembentuk pori. Dengan melakukan variasi rasio clay:PEG diperoleh permeabilitas membran antara $1,65 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ – $3,16 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ untuk keramik sol-gel dan antara $1,38 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ – $8,72 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ untuk keramik yang dibuat dengan metode pencampuran kering. Kekuatan takannya antara 0,28 MPa–1,71 MPa for the keramik sol gel dan antara 0,05–0,90 MPa untuk keramik pencampuran kering. Performa penyaringan diuji dengan menggunakan larutan metilen biru (MB). Konsentrasi MB yang masih tersisa karena proses penyaringan ini antara 0,98–1,44% untuk filter sol-gel dan 1,50–38,05% untuk filter yang dibuat dengan pencampuran kering. Dengan demikian, keramik berpori ini dapat digunakan untuk mengurangi konsentrasi polutan uji.

Beberapa model juga diusulkan untuk menjelaskan beberapa hasil dari eksperimen di atas. Pengaruh tekanan dan lama penekanan terhadap kekuatan tekanan komposit sampah di-

jelaskan menggunakan model efektivitas kontak pada interaksi van der Waals dengan pendekatan cakupan efektif. Prediksi model sangat sesuai dengan data eksperimen. Hubungan permeabilitas dengan porositas keramik berpori dijelaskan secara model menggunakan *effective medium approximation* (EMA) dengan pendekatan kontak efektif. Sebuah model untuk menjelaskan hubungan kekuatan tekan dengan porositas keramik juga dibuat dengan memperhitungkan interaksi van der Waals menggunakan pendekatan jumlah kontak, sedangkan hubungan performa filtrasi filter dengan permeabilitasnya dimodelkan dengan pendekatan hambatan fluida.

Berkaitan dengan pentingnya peran interaksi van der Waals dalam skala partikel, sebuah model dengan pendekatan osilasi non-linear juga dikembangkan untuk menjelaskan fenomena penyimpangan posisi pada nanopartikel yang terorganisasi (*self-organization*) dari posisi sempurna. Prediksi model kemudian dibandingkan dengan beberapa citra TEM/SEM yang diperoleh dari beberapa paper dan didapatkan kesesuaian antara prediksi model dengan data organisasi nanopartikel Ag, Fe₃O₄ and SiO₂ pada beberapa substrat.

Kata kunci: komposit sampah, keramik berpori clay, kontak efektif, *self-organization*, *effective medium approximation*, osilasi non-linear.

ABSTRACT

MODELLING AND CHARACTERIZATION OF MECHANICAL AND FLUID TRANSPORT PROPERTIES OF MATERIALS-ARRANGED BY NANOPARTICLES

By

MASTURI

NIM. 30210008

(Program of Physics Doctoral)

Using simple mixing and hot pressing methods via composite engineering a composite was made from home waste—in particular, paper and dry leaves—using polyvinyl acetate (PVAc) as an adhesive and silica nanoparticles as filler. The optimum composition for the strongest composite, in terms of compressive strength, had a mass ratio of silica nanoparticles/PVAc/solid waste of 3:80:280. With this mass ratio, a compressive strength of 68,50 MPa was obtained for samples prepared at a pressing temperature of 150°C, pressing pressure of 100 MPa, and pressing time of 20 min. The addition of silica nanoparticles increased the compressive strength up to about 50%, compared with composites made without the addition of silica (45,60 MPa). Higher compressive strength was obtained at a higher pressing pressure. At a pressing pressure of 120 MPa, pressing temperature of 150°C, and pressing time of 20 min, a compressive strength of 69,10 MPa was obtained. When the pressing time was increased to 45 min at a pressing pressure of 120 MPa, a compressive strength of 84,37 MPa was measured.

Using the composite engineering, ceramic wastewater filters were fabricated from clay using both sol-gel and simple mixing methods followed by hot-pressing and calcination process. Polyethylene glycol (PEG) was used as a pore forming agent. Varying the clay:PEG ratio modified the membrane permeability between $1,65 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ and $3,16 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ for the sol-gel ceramic and between $1,38 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ and $8,72 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ for ceramic prepared by simple mixing. The strength ranged from 0,28 MPa–1,71 MPa for the sol-gel ceramic and from 0,05–0,90 MPa for samples prepared by simple mixing. The filtration performance was measured using aqueous solutions of methylene blue (MB) as tester pollutant. The concentrations of MB remaining in the solution varied from 0,98%–1,44% for sol-gel filters and from 1,50%–38,05% for filters prepared by simple mixing. The porous ceramic can be used to reducing concentration of simulated pollutant.

The model explanations were also proposed to explain several results of the experiment above. The effects of pressing pressure and pressing time on compressive strength of the solid waste composite were explained using contact effectivity of van der Waals interaction

model with effective coverage approach. The model predictions were in good agreement with the experimental data. The permeability dependence to the porosity of ceramic porous was modeled using effective medium approximation (EMA) with effective contact approach. A model of compressive strength related to the porosity was also developed using amount of contacts approach. Meanwhile, the dependence of filtration performance to the filters permeability was modeled using fluid resistance approach.

In addition, as the importance of van der Waals interaction in particles-scales, a model using non-linear oscillation approach was also for explaining deviations of positions in self-organized nanoparticles on a substrate from their corresponding positions in perfect organization is proposed. The model predictions were compared with SEM/TEM images and reported by some authors. It was found a good consistence between the model predictions with the data of Ag, Fe₃O₄ and SiO₂ nanoparticles organization on various substrates.

Keywords: solid waste composite, clay porous ceramic, effective contact, self-organization, effective medium approximation, non-linear oscillation.

**PEMODELAN DAN KARAKTERISASI SIFAT MEKANIK
DAN TRANSPOR FLUIDA PADA MATERIAL YANG
TERSUSUN ATAS NANOPARTIKEL**

Oleh

MASTURI

NIM. 30210008

(Program Studi Doktor Fisika)

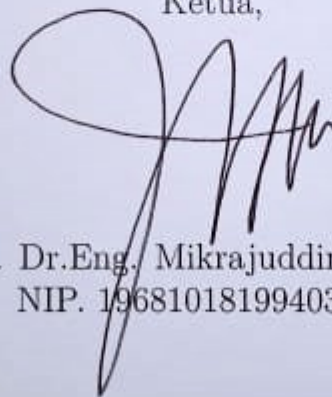
Institut Teknologi Bandung

Menyetujui,

Tim Pembimbing

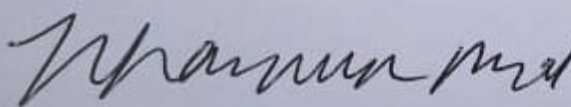
Tanggal: 15 Maret 2013

Ketua,



(Prof. Dr.Eng. Mikrajuddin Abdullah)
NIP. 196810181994031002

Anggota,



(Prof. Dr.Eng. Khairurrijal)
NIP. 196502161991031002

Anggota,



(Dr. Euis Sustini)
NIP. 195905101985032002

PEDOMAN PENGGUNAAN DISERTASI

Disertasi doktor yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Institut Teknologi Bandung, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada pengarang dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Institut Teknologi Bandung. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin pengarang dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh disertasi haruslah seizin Direktur Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung.

*Untuk ayahanda Shobar (Alm.) dan ibunda Sumiatun, kakak dan keponakan
tersayang, Masamah (Alm.) dan Muhammad Thohir serta istri dan ananda
tersayang, Susilawati dan Izzah Nur Afrina.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur *alhamdulillah*, atas rahmat-Nya akhirnya penulisan disertasi ini dapat terselesaikan.

Selanjutnya, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr.Eng. Mikrajuddin Abdullah selaku Ketua tim promotor atas segala bimbingan, masukan, diskusi dan motivasinya hingga penulis dapat menyelesaikan tahapan demi tahapan penelitian selama studi di ITB ini dengan baik dan lancar. Begitu juga kepada Prof. Dr.Eng. Khairurrijal dan Dr. Euis Sustini yang senantiasa memberikan bimbingan dan motivasi yang sangat berarti dalam tahapan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Dr. Khairul Basar selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Fisika ITB beserta segenap dosen dan tenaga administrasi yang telah memberikan bantuan dan fasilitas selama penulis menempuh studi di institut ini.

Penghargaan yang sama penulis sampaikan kepada Rektor Universitas Negeri Semarang (UNNES), Dekan FMIPA UNNES, Ketua Jurusan Fisika, segenap jajarannya dan juga seluruh kolega di Jurusan Fisika FMIPA UNNES. Tanpa dukungan dan bantuan mereka, tidak mungkin penulis dapat menjalani proses pendidikan dan belajar ini dengan penuh kelancaran. Penulis juga menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh teman-teman S3 Prodi Fisika ITB angkatan 2010, antara lain: Fikri, Amran, Endi Suhendi, Edi, Bebeh dan Wa Ode Sukmawati; dan juga para senior yang selalu membantu dalam diskusi, yakni Mahardika, Artoto, Bambang Piluharto dan Ramli. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan untuk teman-teman sejawat dan seperjuangan di Laboratorium Sintesis dan Fungsionalisasi Nanomaterial Fisika ITB, antara lain: Silvia, Bu Neni, Elfi, Osi, Bu Hasniah, Pak Sahrul, Pak Rahman dan Memoria Rosi, serta para kolega baik di Laboratorium Nuklir ITB yang telah banyak membantu penulis, antara lain: Pak Fiber, Bu Menik dan Pak Nurul. Kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI penulis sampaikan terima kasih atas beasiswa pendidikan pascasarjana (BPPS) yang penulis terima selama menjalani studi di ITB dan dana Hibah Bersaing yang penulis terima pada periode 2011-2012.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya juga penulis haturkan kepada segenap keluarga besar, baik yang ada di Demak (Jawa Tengah)

maupun yang ada di Muara Enim (Sumsel). Secara khusus, kepada ibunda di Demak, ibunda Hj. Sumiatun serta ayah dan ibu di Muara Enim, ayahanda H. Suprayogi dan ibunda Hj. Sri Astuti yang senantiasa mendo'akan putranya ini terima kasih yang tiada terkira penulis sampaikan kepada mereka. Kepada istri tercinta, Susilawati dan ananda Izzah Nur Afrina, atas kesabaran dan do'a kalian lah saya dapat menyelesaikan penulisan disertasi ini dengan penuh keceriaan dan riang gembira. Kepada seluruh kakak, adik dan keponakan yang selalu penulis sayangi, terima kasih atas semua dukungan dan bantuan kalian. Kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, penulis sampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya.

Akhirul kalam, penulis berharap karya kecil ini dapat menjadi sumbangan di tengah lautan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi yang begitu pesat dewasa ini. Amin.

Bandung, 15 Maret 2013

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Abstract	iii
Pengesahan	v
Pedoman Penggunaan Disertasi	vi
Persembahan	vii
Kata Pengantar	viii
Daftar Isi	x
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel	xvi
Daftar Lambang	xvii
I Pendahuluan	1
I.1. Urgensi Fungsionalisasi Nanomaterial	1
I.2. Pentingnya Pemodelan Nanomaterial	4
I.3. Tujuan Penelitian	7
I.4. Metode Penelitian	8
I.5. Sistematika Penelitian	9
II Komposit Sampah Berpenguat Nanopartikel Silika	11
II.1. Metode Eksperimen	11
II.2. Hasil dan Pembahasan	12
II.3. Simpulan	23
III Keramik Berpori: Sintesis, Aplikasi dan Pemodelan	24
III.1. Sintesis Keramik Berpori	24
III.2. Aplikasi Keramik Berpori untuk Filter Air Kotor (<i>Wastewater Filter</i>)	37
III.3. Pengembangan Model	42
III.4. Simpulan	59
IV Organisasi Nanopartikel <i>Self-Assembly</i>	61

IV.1. Rapat Keadaan Partikel Terorganisasi	61
IV.2. Organisasi Dua Dimensi Nanopartikel	63
IV.3. Osilasi Non-Linear Partikel Terorganisasi pada Struktur Heksagonal	64
IV.4. Verifikasi dengan Beberapa Hasil Pengamatan	68
IV.5. Simpulan	74
V Simpulan Menyeluruh	75
VI Penutup	78
Daftar Pustaka	83
Lampiran	92

DAFTAR GAMBAR

II.1	Kuat tekan sebagai fungsi fraksi sampah.	12
II.2	Citra SEM nanopartikel silika dan dengan menggunakan <i>fitting</i> log normal terhadap distribusi ukurannya (Mikrajuddin dan Khairurrijal, 2010) diperoleh ukuran rata-ratanya sekitar 75 nm.	13
II.3	Kuat tekan sebagai fungsi fraksi silika.	14
II.4	Spektrum FTIR dari (a) PVAc, (b) silika dan (c) komposit PVAc-silika saja	16
II.5	Ilustrasi interaksi van der Waals antara atom C dan O pada gugus karbonil masing-masing dengan atom O dan atom Si pada silika (<i>garis putus-putus</i>). Interaksi dapat terjadi karena atom C pada gugus karbonil yang lebih elektropositif sangat aktif dengan atom O silika yang lebih elektronegatif (Brown dkk., 1994; Hunt, 2008). Hal yang sama juga terjadi pada atom Si (silika) dengan atom O (karbonil).	17
II.6	Pengaruh tekanan penekanan terhadap kekuatan tekan sampel yang dibuat pada suhu penekanan yang berbeda. Simbol adalah data pengukuran dan kurva merupakan hasil <i>fitting</i> . Waktu penekanan dijaga tetap pada 20 menit.	19
II.7	Pengaruh waktu penekanan terhadap kekuatan tekan sampel. Simbol adalah data pengukuran dan kurva merupakan hasil <i>fitting</i> . Tekanan dan suhu penekanan dijaga konstan berturut-turut pada 100 MPa dan 150°C.	20
II.8	Model yang diusulkan untuk menjelaskan pengaruh tekanan terhadap kekuatan tekan komposit	21
III.1	Skema uji permeabilitas filter (Masturi dkk., 2012).	25
III.2	(a) Citra SEM dari partikel clay dan didapatkan ukuran rata-rata partikelnya sekitar 5,3 μm , (b) Analisis komposisi clay dengan pengukuran EDX dan didapatkan senyawa utamanya adalah silika (54,49%) dan alumina (27,20%) sehingga clay ini termasuk jenis clay <i>kaolinite</i> (Ding dkk., 2009).	27
III.3	(a) Citra SEM titania dan didapatkan ukuran rerata partikelnya sekitar 120 nm, (b) Kurva UV-Vis titania yang menunjukkan rentang absorbansi cahayanya pada daerah 150 – 600 nm (Saehana dkk., 2012).	28

III.4	Volume gas yang diserap ketika adsorpsi dan desorpsi N ₂ yang diplot relatif terhadap tekanan untuk keramik berpori dari proses: (a) sol gel dan (b) pencampuran kering. Indeks 1, 2, 3, 4 dan 5 untuk masing-masing grafik menunjukkan sampel-sampel dengan komposisi clay/PEG (w/w) berturut-turut 9,5:0,5; 9:1; 8,5:1,5; 8:2 dan 7,5:2,5.	29
III.5	Distribusi ukuran pori dari masing-masing keramik berpori dari proses: (a) sol gel dan (b) pencampuran kering menggunakan metode analisis BJH (Mohanty dan Landskron, 2009).	30
III.6	Ilustrasi keramik berpori clay yang dilapis titania.	32
III.7	Permeabilitas keramik berpori sebagai fungsi porositas untuk keramik: (a) sol gel tanpa titania (lingkaran hitam) dan dengan titania (segitiga merah), (b) pencampuran kering	33
III.8	Mikrostruktur permukaan dari keramik sol gel (a) sebelum (b) setelah pelapisan titania.	34
III.9	Kekuatan tekan filter sol gel (kotak) dan pencampuran kering (lingkaran) sebagai fungsi porositas.	37
III.10	(a) Kurva kalibrasi untuk konsentrasi metilen biru. Setelah dilakukan <i>fitting</i> secara linear (Grishchuk, 1971) didapatkan hubungan: $A = 0,04778C$ di mana A absorbansi dan C konsentrasi metilen biru, (b), (c) dan (d) Perbandingan antara absorbansi larutan metilen biru sebelum (O) dan setelah filtrasi (Indeks 1, 2, 3, 4 dan 5 berturut-turut menunjukkan filter dengan porositas of 24,25%, 24,86%, 27,25%, 32,20% dan 36,89% sol gel dan 35,83%, 39,66%, 42,64%, 47,95% dan 49,16% untuk pencampuran kering) di mana: (b) sol-gel, (c) pencampuran kering, (d) sol-gel yang dilapis titania.	39
III.11	Rejeksi metilen biru sebagai fungsi porositas untuk filter: pencampuran kering (kotak hitam), sol gel yang tidak dilapis titania (segitiga hitam) dan sol gel dilapis titania (lingkaran kosong).	40
III.12	Sampel air setelah proses penyaringan menggunakan: (a) filter pencampuran kering, (b) filter sol gel yang tidak dilapis titania, dan (c) filter sol gel yang dilapis titania. O pada (a) menunjukkan air sebelum penyaringan dan indeks 1, 2, 3, 4 dan 5 pada semua gambar berturut-turut menunjukkan porositas 35,83%, 39,66%, 42,64%, 47,95% dan 49,16% untuk pencampuran kering dan 24,25%, 24,86%, 27,25%, 32,20% dan 36,89% untuk sol gel.	41
III.13	Penampakan filter setelah beberapa kali pemakaian: (a) sebelum disinari dengan sinar matahari, (b) setelah disinari dengan sinar matahari.	42
III.14	Hambatan pada sel pori-pori	44
III.15	Hambatan pada sel medium-medium	45
III.16	(a) Hambatan pada sel pori-padat, (b) Ilustrasi rangkaian hambatan pada sel pori-padat	46

III.17	(a) Permeabilitas keramik berpori (filter) sebagai fungsi porositas. Simbol menyatakan data eksperimen berturut-turut untuk sol gel (lingkaran merah) dan pencampuran kering (segitiga hitam). Kurva menyatakan penghitungan model masing-masing untuk sol gel (merah) dengan: $\kappa_p/\kappa_m = 10000, z = 12, f = 0,74, \alpha = 40\%$ dan pencampuran kering (hitam) dengan: $\kappa_p/\kappa_m = 10^6, z = 6, f = 0,52, \alpha = 20\%$. Ambang perkolasinya masing-masing adalah 32,20% untuk sol gel dan 39,66% untuk pencampuran kering, (b) Persamaan skala (<i>scaling relation</i>) dari ambang perkolasi filter sol gel di sekitar $\phi_c = 32,20\%$ dan didapatkan: $t = 1,25$ (grafik bagian atas) dan filter pencampuran kering di sekitar $\phi_c = 39,66\%$ dan didapatkan $t = 1,30$ (grafik bagian bawah).	49
III.18	Permeabilitas sebagai fungsi porositas. Plot model (garis) cenderung sesuai (<i>fit</i>) dengan data eksperimen (simbol) pada: (a) batuan Miocene (Ehrenberg dkk., 2004), (b) batuan Troll (Dvorkin dan Brevik, 1999); (c) batuan Oseberg (Dvorkin dan Brevik, 1999); (d) batuan Costa Rica (Gamage dkk., 2011).	51
III.19	Kekuatan tekan filter sebagai fungsi porositas. Simbol menunjukkan hasil eksperimen pada filter pencampuran kering (+) dan sol gel (Δ), sementara garis menunjukkan model matematis untuk filter pencampuran kering (garis merah) dan sol gel (garis biru).	52
III.20	Konsentrasi metilen biru setelah proses penyaringan menggunakan: (a) filter sol-gel (tanpa titania). Inset: ekstrapolasi <i>fitting</i> untuk permeabilitas yang sangat besar; (b) filter pencampuran kering sebagai fungsi permeabilitas. Simbol menunjukkan data eksperimen dan garis plot model	55
III.21	Ilustrasi aliran fluida pada: (a) sel <i>simple cubic</i> (sc) pada filter pencampuran kering (SM), dan (b) sel fcc pada filter sol gel. Kotak putus-putus merupakan batas semu sel, tanda panah menunjukkan arah aliran fluida.	57
IV.1	(a) Semua partikel berada pada posisi sempurna dalam organisasi heksagonal. (b) Partikel yang ada di tengah mengalami deviasi r dari posisi sempurna. Untuk mempermudah pembahasan, deviasi kecil ini ke arah salah satu partikel di sekelilingnya.	64
IV.2	Pasangan segitiga-segitiga yang terbentuk pada saat partikel tengah (<i>center particle</i>) menyimpang dan diperoleh $\triangle ABC = \triangle ABF$ dan $\triangle ABD = \triangle ABE$	65
IV.3	Uraian gaya pada: (a) segitiga ABC, (b) segitiga ABE	66

IV.4	Citra SEM/TEM dari beberapa nanopartikel yang terorganisasi pada substrat dan distribusi deviasi terhadap posisi sempurna. Simbol didapatkan melalui pengukuran citra SEM/TEM dan garis adalah garis <i>fitting</i> menggunakan Persamaan (IV.27). (a) Nanopartikel perak (Ag) (McLeod dkk., 2005), (b) Nanopartikel Fe_3O_4 (Ogawa dkk., 2006), dan (c) Nanopartikel SiO_2 (Snyder dkk., 2007). Parameter <i>fitting</i> yang digunakan ditampilkan pada Tabel IV.1. Hak cipta diperoleh dari: (a) American Chemical Society.com, (b) Institute of Physics, dan (c) American Chemical Society.com.	70
IV.5	Profil distribusi deviasi nanopartikel untuk beberapa diameter rata-rata	72
IV.6	Profil distribusi deviasi nanopartikel untuk beberapa suhu pada saat pembentukan. Untuk suhu yang makin tinggi, <i>root mean square</i> deviasi juga semakin besar	73

DAFTAR TABEL

II.1	Parameter <i>fitting</i> yang dihasilkan	22
III.1	Luas permukaan, volume pori, ukuran rata-rata pori dan porositas keramik berpori sol gel (SG) dan pencampuran kering (SM). Ukuran rata-rata pori diperoleh menggunakan metode analisis BJH terhadap data BET (Mohanty dan Landskron, 2009).	31
III.2	Perbandingan performa filter antara hasil eksperimen dengan hasil teori pada kedua metode sintesis	58
III.3	Perbandingan nilai C_t secara teori dan eksperimen	59
IV.1	Perbandingan antara deviasi hasil pengukuran dan simulasi model	71

DAFTAR LAMBANG

\hbar	Konstanta Planck	15
c	Cepat rambat gelombang elektromagnetik pada ruang hampa	15
Δl	Pergeseran bilangan gelombang	15
E	Energi	16
σ	Parameter Lennard-Jones (energi)	16
ϵ	Parameter Lennard-Jones (jarak)	16
r	Jarak dua atom atau partikel	16
P	Tekanan	20
ψ	Kekuatan tekan	21
t	Waktu	22
Q	Debit aliran fluida	25
μ	Viskositas fluida	25
A	Luas permukaan filter	25
κ	Permeabilitas	25
κ_p	Permeabilitas pori	44
κ_m	Permeabilitas medium	44
R	Hambatan fluida	44
α	Koefisien efektivitas koneksi pori	44
R_{bp}	Hambatan <i>bulk</i> pori	45
R_c	Hambatan konstrikasi	45
R_{mm}	Hambatan padat-padat	45
R_{pm}	Hambatan pori-padat	45
R_m	Hambatan material padat	45
f	<i>Packing fraction</i>	45
ϕ_p	Porositas	45
d	Diameter pori	45
ϕ_c	Porositas kritis	53
r_p	Jari-jari pori	53
ℓ	Tebal filter	54
C_0	Konsentrasi mula-mula metilen biru	54
C_t	Konsentrasi metilen biru yang diuraikan oleh titania	57
r	Simpangan partikel dari posisi sempurna	61
D	Konstanta organisasi nanopartikel	61
r_0	Jarak sempurna antarnanopartikel	63
γ	Konstanta pegas getaran nanopartikel	63
$\phi(x)$	Fungsi interaksi van der Waals antardua partikel bola identik	63
ϕ_{ps}	Interaksi van der Waals partikel-substrat	71
ϕ_{pp}	Interaksi van der Waals partikel-partikel	71