KINERJA MATERIAL *SENSING LAYER* PADA SENSOR KELEMBAPAN BERBASIS *QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE*

SISKA ILHAMI

DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
   a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul "Kinerja Material *Sensing Layer* Pada Sensor Kelembapan Berbasis *Quartz Crystal Microbalance*" adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Desember 2024

Siska Ilhami
G7401201001

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
   a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

ABSTRAK

SISKA ILHAMI. Kinerja Material *Sensing Layer* Pada Sensor Kelembapan Berbasis *Quartz Crystal Microbalance*. Dibimbing oleh HERIYANTO SYAFUTRA dan IQBAL SYAMSU.

Kinerja sensor kelembapan berbasis *quartz crystal microbalance* (QCM) dapat ditingkatkan dengan mendeposisikan material *sensing layer* pada permukaannya. *Graphene oxide* (GO), *reduced graphene oxide* (rGO) dan *carbon nanotubes* (CNT) dipilih sebagai material *sensing layer* karena memiliki luas area sensitif yang besar sehingga memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan teknik *drop-casting* untuk mendeposisikan material *sensing layer*. Struktur kristal, morfologi permukaan, luas permukaan spesifik, serta keberadaan gugus fungsi oksigen dari material yang digunakan dianalisis menggunakan *x-ray diffraction* (XRD), *scanning electron microscopy* (SEM), *brunauer emmett teller* (BET) dan *fourier transform infrared spectroscopy* (FTIR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap *sensing layer* menunjukkan kinerja yang berbeda. Sensor dengan *sensing layer* GO menunjukkan sensitivitas 91,06 Hz/%RH dengan waktu respons 77 detik dan waktu pemulihan 16 detik, sedangkan sensor dengan *sensing layer* CNT menunjukkan sensitivitas 11,9 Hz/%RH dengan waktu respons 25 detik dan waktu pemulihan 20 detik. Sementara itu, sensor dengan *sensing layer* rGO menunjukkan perilaku anti-Sauerbrey.

Kata kunci: CNT, GO, rGO, sensor kelembapan, QCM

ABSTRACT

SISKA ILHAMI. Performance of Sensing Layer Material in Humidity Sensor Based on Quartz Crystal Microbalance. Supervised by HERIYANTO SYAFUTRA and IQBAL SYAMSU.

The performance of quartz crystal microbalance (QCM) based humidity sensor can be improved by depositing a sensing layer material on its surface. Graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO) and carbon nanotubes (CNT) were chosen as sensing layer materials because they have a large sensitive area and thus high adsorption capacity. This research was conducted by using drop-casting technique to deposit the sensing layer material. The crystal structure, surface morphology, specific surface area, and presence of oxygen functional groups of the materials used were analyzed using scanning electron microscopy (SEM), brunauer emmett teller (BET) and fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results showed that each sensing layer showed different performance. The sensor with GO sensing layer showed a sensitivity of 91,06 Hz/%RH with a response time of 77 seconds and a recovery time of 16 seconds, while the sensor with CNT sensing layer showed a sensitivity of 11,9 Hz/%RH with a response time of 25 seconds and a recovery time of 20 seconds. Meanwhile, the sensor with rGO sensing layer shows anti-Sauerbrey behavior.

Keywords: CNT, GO, rGO, humidity sensor, QCM

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2024
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

KINERJA MATERIAL *SENSING LAYER* PADA SENSOR KELEMBAPAN BERBASIS *QUARTZ CRYSTAL MICROBALANCE*

SISKA ILHAMI

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Fisika

DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:
1. Dr. Ir. Irmansyah, M.Si.
2. Dr. Yessie Widya Sari, S.Si., M.Si.

@Hak cipta milik IPB University
IPB University
IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Judul Skripsi : Kinerja Material *Sensing Layer* Pada Sensor Kelembapan Berbasis *Quartz Crystal Microbalance*
Nama : Siska Ilhami
NIM : G7401201001

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Heriyanto Syafutra, S.Si., M.Si.
NIP. 198604232014041001

Pembimbing 2:
Iqbal Syamsu, M.T.
NIP. 197311191994031001

Diketahui oleh

Ketua Departemen Fisika:
Prof. Dr. R. Tony Ibnu Sumaryada Wijaya Puspita, M.Si.
NIP. 19720519 1997021001

Tanggal Ujian: 10 Desember 2024 Tanggal Lulus:

Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat dari BSrE, silahkan lakukan verifikasi pada dokumen elektronik yang dapat diunduh dengan melakukan scan QR Code

IPB University — Bogor Indonesia —

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
   a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PRAKATA

Alhamdulillahi Rabbil'alamin, Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan yang dilaksanakan sejak bulan Maret 2024 sampai bulan Juli 2024 dengan judul "Kinerja Material *Sensing Layer* Pada Sensor Kelembapan Berbasis *Quartz Crystal Microbalance*". Terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Orang tua tercinta, Bapak Usup dan Ibu Suhenah selaku orang tua penulis yang telah memberikan dukungan berupa moral, materil, doa dan kasih sayang, serta seluruh keluarga lainnya atas segala bentuk dukungan dan doa yang diberikan kepada penulis hingga skripsi ini dapat selesai. Kehadiran kalian sangat berarti dalam hidup penulis.
2. Bapak Dr. Heriyanto Syafutra, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing pertama dan Bapak Iqbal Syamsu, M.T. selaku pembimbing kedua yang senantiasa memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan dengan penuh kesabaran sejak awal penulis menjalankan tugas akhir hingga skripsi ini diterbitkan.
3. Bapak Dr. Ir. Irmansyah, M.Si. selaku dosen penguji pertama dan Ibu Dr. Yessie Widya Sari, S.Si., M.Si. selaku dosen penguji kedua yang telah memberikan arahan serta motivasi kepada penulis dalam proses penelitian dan penyusunan skripsi.
4. Bapak Dr. Hendradi Hardienata, M.Si. selaku dosen penggerak penulis yang telah sabar membimbing dan memotivasi selama perkuliahan.
5. Bapak Prof. Dr. R. Tony Ibnu Sumaryada Wijaya P., M.Si., Bapak Firman Permana, S.Sos., serta seluruh dosen, staf Fisika IPB yang telah banyak membantu segala proses administrasi, memberikan ilmu serta motivasi selama perkuliahan.
6. Teman-teman Fisika 57 yang senantiasa menemani perjuangan penulis selama menjalankan masa perkuliahan. Khususnya Deviana, Deva, Reni, Yena, Riana, Nazwa, Dea, Juli, Alya yang selalu membantu dan mendukung penulis pada saat proses penelitian hingga penulisan skripsi.
7. Bapak Erry Dwi Kurniawan Ph.D., Bapak Prof. Goib Wiranto, Bapak I Dewa Putu Hermida, Bapak Shobih, Bapak Bagus, Kak Melyna, Kak Nurhandayani, Kak Fitri, Evi, Sulis, Reva dan semua pihak yang telah membantu penulis selama proses penelitian dan pengumpulan data di BRIN KST Samaun Samadikun, Bandung.
8. Alfin, Aslurita, Ayu, Alda, Ellisa, Ina, Putri, Nazswa, Rifa, dan Risa yang senantiasa memberikan semangat dan do'anya kepada penulis.
9. Diri sendiri yang telah berjuang selama perkuliahan berlangsung hingga mampu menyelesaikan rangkaian tugas akhir ini.

Penulis mengucapkan terima kasih dan mohon maaf apabila masih terdapat kesalahan dan kekeliruan. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca, serta dalam perkembangan ilmu pengetahuan.

Bogor, Desember 2024

Siska Ilhami

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
   a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL xi

DAFTAR GAMBAR xi

DAFTAR LAMPIRAN xii

I PENDAHULUAN 1
- 1.1 Latar Belakang 1
- 1.2 Rumusan Masalah 2
- 1.3 Tujuan 2
- 1.4 Manfaat 2

II TINJAUAN PUSTAKA 3
- 2.1 *Quartz Crystal Microbalance* (QCM) 3
  - 2.1.1 Struktur sensor QCM 3
  - 2.1.2 Prinsip kerja sensor QCM 4
  - 2.1.3 Sensor QCM dalam mendeteksi kelembapan 4
- 2.2 Material *Sensing Layer* 5
  - 2.2.1 *Graphene Oxide* (GO) 6
  - 2.2.2 *Reduced Graphene Oxide* (rGO) 7
  - 2.2.3 *Carbon Nanotubes* (CNT) 8
- 2.3 Teknik *Drop Casting* 9
- 2.4 Osilator 10
- 2.5 *Frequency Counter* 10

III METODE PENELITIAN 12
- 3.1 Waktu dan Tempat 12
- 3.2 Alat dan Bahan 12
- 3.3 Prosedur Kerja 12
  - 3.3.1 Sintesis GO 12
  - 3.3.2 Preparasi sensor 13
  - 3.3.3 Pengukuran frekuensi fundamental sensor QCM 13
  - 3.3.4 Preparasi material *sensing layer* 13
  - 3.3.5 Deposisi *sensing layer* 13
  - 3.3.6 Pengukuran frekuensi sensor setelah pelapisan 14
  - 3.3.7 Pengujian sensor dalam mendeteksi kelembapan 14
- 3.4 Karakterisasi 15
  - 3.4.1 Karakterisasi struktur kristal menggunakan XRD 15
  - 3.4.2 Karakterisasi gugus fungsi menggunakan FTIR spektroskopi 16
  - 3.4.3 Karakterisasi morfologi *sensing layer* 16
  - 3.4.4 Pengukuran luas permukaan spesifik dan ukuran pori material 16

IV HASIL DAN PEMBAHASAN 17
- 4.1 Karakterisasi Material 17
  - 4.1.1 Pola difraksi GO 17
  - 4.1.2 Identifikasi gugus fungsi material *sensing layer* 18

IPB University — Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Perpustakaan IPB University

4.1.3 Luas permukaan spesifik dan porositas material *sensing layer* 19
4.2 Morfologi *sensing layer* yang terbentuk pada permukaan QCM 20
4.3 Pengaruh perubahan frekuensi terhadap perubahan massa 22
4.4 Hubungan frekuensi sensor QCM terhadap kelembapan relatif (RH) dengan *sensing layer* GO, CNT dan rGO 23
4.5 Pengaruh morfologi *sensing layer* terhadap kinerja sensor QCM dalam mendeteksi kelembapan 25
4.5.1 Sensitivitas sensor 25
4.5.2 Waktu respons dan pemulihan sensor 30

V SIMPULAN DAN SARAN 33
5.1 Simpulan 33
5.2 Saran 33

DAFTAR PUSTAKA 34

LAMPIRAN 40

RIWAYAT HIDUP 46

@Hak cipta milik IPB University
IPB University
IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

DAFTAR TABEL

1	Variasi Material dan volume *drop casting* pada sensor QCM	14
2	Puncak XRD dan jarak antar bidang dari grafit dan GO	17
3	Luas permukaan spesifik dan porositas material GO dan CNT	19
4	Data pergeseran frekuensi dan massa material yang terdeposisi pada permukaan QCM	22
5	Sensitivitas sensor QCM pada 40 – 90 %RH	27
6	Data luas area *sensing layer* yang terbentuk untuk setiap volume droplet	29
7	Waktu respons dan pemulihan sensor	31

DAFTAR GAMBAR

1	Struktur sensor QCM	3
2	Ilustrasi penurunan frekuensi akibat deposisi *sensing layer* dan selama pengukuran (dimodifikasi dari Fauzi *et al.* (2021) Sensors Actuators, A Phys. 330:112837)	5
3	Struktur GO (dimodifikasi dari Yao *et al.* (2014) Sensors Actuators, B Chem. 191:779–783)	6
4	Skema pengindraan kelembapan pada lapisan GO (dimodifikasi dari Bi *et al.* (2013) *Sci Rep*. 3:1–7)	7
5	Struktur *reduced graphene oxide* (dimodifikasi dari Ali *et al.* (2019) *Environ Int*. 127:160–180)	7
6	Diagram skematik dari mekanisme rGO dalam mendeteksi kelembapan (dimodifikasi dari Jiang *et al.* (2022) Micro Nano Lett. 17(6):134–138)	8
7	Struktur (a) SWCNT dan (b) MWCNT (dimodifikasi dari Devi dan Gill (2021) *Microsyst Technol*. 27(8):3225–3233)	9
8	Proses *drop-casting*	9
9	Blok diagram dasar sebuah rangkaian osilator	10
10	Skema pengujian sensor QCM dalam mendeteksi kelembapan	15
11	Pergeseran frekuensi terhadap kelembapan relatif (dimodifikasi dari Yao *et al.* (2011) Appl Surf Sci. 257(17):7778–7782)	15
12	Difraktogram hasil XRD material (a) grafit, (b) GO yang disintesis, dan (c) GO literatur (Dimodifikasi dari Amir Faiz *et al.* (2020) *Results in Physics.* 16(2020):102954)	17
13	Spektrum FTIR dari grafit, GO dan CNT	19
14	*Sensing layer* (a) GO, (b) rGO, dan (c) CNT diatas permukaan QCM yang dideposisikan menggunakan teknik *drop casting*	20
15	Larutan (d) GO, (e) rGO, dan (f) CNT didalam pelarut air	21
16	Morfologi *sensing layer* (a) GO, (b) rGO, dan (c) CNT pada perbesaran 30000x, inset memperlihatkan ukuran diameter CNT	21

IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

17 Hubungan pergeseran frekuensi sensor (a) GO-1, (b) GO-2, dan (c) GO-3 terhadap kenaikan (garis merah) dan penurunan (garis merah) %RH 23
18 Hubungan pergeseran frekuensi sensor (a) CNT-1, (b) CNT-2, dan (c) CNT-3 terhadap kenaikan (garis hitam) dan penurunan (garis merah) %RH 24
19 Hubungan pergeseran frekuensi sensor (a) rGO-1, (b) rGO-2, dan (c) rGO-3 terhadap kenaikan (garis hitam) dan penurunan (garis merah) %RH 25
20 Respons sensor QCM dengan *sensing layer* (a) GO dan (b) CNT terhadap berbagai %RH 26
21 Hubungan logaritmik dari log Δf terhadap %RH pada sensor dengan *sensing layer* (a) GO; (b) CNT 27
22 Respon sensor QCM dengan *sensing layer* (a) GO dan (b) CNT terhadap berbagai %RH berdasarkan tiga kali pengukuran 27
23 Permukaan sensor QCM yang telah dilapisi *sensing layer* pada perbesaran 38x 29
24 (a) Respon sensor QCM dengan *sensing layer* rGO terhadap berbagai %RH (b) hubungan logaritmik dari log Δf terhadap %RH pada sensor dengan *sensing layer* rGO 30
25 Waktu respons dan pemulihan sensor (a) GO-2 dan (b) CNT-2 31

DAFTAR LAMPIRAN

1 Diagram alir pelaksanaan penelitian 41
2 Perhitungan $d_{spacing}$ dengan persamaan Bragg's 42
3 Perhitungan perubahan massa yang terdeposisi pada permukaan QCM 42
4 Perhitungan sensitivitas sensor 43
5 Perhitungan waktu respons dan pemulihan sensor 43
6 Dokumentasi penelitian 45

IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University