

**ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI DOPING TEMBAGA
(Cu²⁺) TERHADAP KARAKTERISTIK FISIS MnO₂ SEBAGAI
MATERIAL PENYIMPAN ENERGI**

SKRIPSI

Oleh:
IKA YULIANA
NIM. 15640067



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK
IBRAHIM
MALANG
2019**

**ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI DOPING TEMBAGA (Cu^{2+})
TERHADAP KARAKTERISTIK FISIS MnO_2 SEBAGAI MATERIAL
PENYIMPAN ENERGI**

SKRIPSI

**Diajukan kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Oleh:
IKA YULIANA
NIM. 15640067**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2019**

HALAMAN PERSETUJUAN

ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI DOPING TEMBAGA (Cu^{2+})
TERHADAP KARAKTERISTIK FISIS MnO_2 SEBAGAI MATERIAL
PENYIMPAN ENERGI

SKRIPSI

Oleh:
Ika Yuliana
NIM. 15640067

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada tanggal, 05 November 2019

Pembimbing I

Pembimbing II

Erna Hastuti, M.Si.
NIP. 19811119 200801 2 009

Utiya Hikmah, M.Si.
NIDT. 19880605 20180201 2 242

Mengetahui
Ketua Jurusan Fisika

Drs. Abdul Basid, M.Si.
NIP. 19650504 199003 1 003

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI DOPING TEMBAGA (Cu^{2+}) TERHADAP KARAKTERISTIK FISIS MnO_2 SEBAGAI MATERIAL PENYIMPAN ENERGI

SKRIPSI

Oleh:
Ika Yuliana
NIM. 15640067

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji
dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal 15 November 2019

Penguji Utama :	<u>Dr.H.M.Tirono, M.Si</u> NIP. 19641211 199111 1 001	
Ketua Penguji :	<u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji :	<u>Erna Hastuti, M.Si</u> NIP. 19811119 200801 2 009	
Anggota Penguji :	<u>Utuya Hikmah, M.Si</u> NIDT. 19880605 20180201 2 242	

Mengesahkan,
Ketua Jurusan Fisika

Drs. Abdul Basid, M.Si
NIP. 19650504 199003 1 003

HALAMAN PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ika Yuliana

NIM : 15640067

Jurusan : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul Penelitian : Analisis Pengaruh Konsentrasi Doping Tembaga (Cu^{2+}) terhadap Karakteristik Fisis MnO_2 sebagai Material Penyimpan Energi

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 31 Oktober 2019
Yang Membuat Pernyataan

Ika Yuliana
NIM. 15640067

MOTTO

Berangkat dengan penuh keyakinan, berjalan penuh keikhlasan, istiqomah dalam menghadapi cobaan, serta doa penuh pengharapan. Ku olah kata, kubaca makna, kuikat dalam alinea, kubingkai dalam bab sejumlah lima, jadilah mahakarya, gelar sarjana kuterima. Orangtua dan keluargapun turut bahagia.

“Dan bahwasanya seorang manusia tiada memperoleh selain apa yang telah diusahakannya” (An Najm : 39)



HALAMAN PERSEMBAHAN

Allah SWT

Sujud syukurku kussembahkan kepadaMu ya Allah, Tuhan Yang Maha Agung dan Maha Tinggi. Atas takdirmu saya bisa menjadi pribadi yang berfikir, berilmu, beriman, dan bersabar. Semoga keberhasilan ini menjadi satu langkah awal untuk masa depanku dalam meraih cita-cita.

Dengan ini saya persembahkan karya ini kepada

Ayah dan ibu (Bapak Rustamadji (Alm) dan Ibu Samini)

Terimakasih atas kasih sayang yang berlimpah, limpahan doa, serta hal yang telah Ibu lakukan, semua yang terbaik. Lembaran-lembaran ini, bagian kecil bakti kasihku untukmu. Otentik ini pancaran kehebatan dari cahaya kasih sayangmu.

Ayah sambungku (Bapak Jasidin)

Terimakasih atas semua kebutuhan yang Ayah penuhi. Nama Ayah mungkin takkan ada di akta lahirku. Atau bahkan semua dokumen kelulusanku. Tapi harap Ayah selalu tertuju pada pendidikan terbaik disemua jenjang sekolahku.

Adik-adikku (Nova, Indah, Ilham, Diki, dan Alm. Fadhil)
yang menjadi suntikan terbesar untuk meraih cita-cita.

Bapak Ibu dosen-dosen

Terimakasih tiada terhingga khususnya Ibu Erna Hastuti, M.Si dan Ibu Utiga Hikmah, M.Si yang telah bersedia menjadi orang tua kedua selama di Kampus. Terimakasih atas bantuan, nasihat dan ilmunya yang telah dilimpahkan kepada saya dengan tulus dan ikhlas. Sosok lain yang sangat menginspirasi Bapak Dr.H. M. Tirono, M.Si, Ibu Erika Rani, M.Si, dll yang tidak bisa saya sebutkan. Semoga selalu diberikan keberkahan hidup oleh Allah SWT.

Seluruh teman-teman Fisika Angkatan 15 (Pascal)

Terimakasih untuk memori yang kita rajut setiap harinya, atas tawa yang kita miliki, dan atas solidaritas yang tiada terkira sehingga masa kuliah 4 tahun menjadi lebih berarti. Semoga masa-masa indah itu akan selalu terkenang dilubuk hati.

Untuk semua pihak yang belum saya sebutkan

terimakasih atas semuanya. Semoga Allah senantiasa membalas kebaikan kalian. Serta kehidupan kalian semua dimudahkan dan diberkahi oleh Allah SWT.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan nikmatnya berupa kesehatan, kesempatan, kekuatan, keinginan, serta kesabaran, sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal skripsi ini dengan baik. Proposal skripsi yang telah penulis susun ini berjudul “Analisis Pengaruh Konsentrasi Doping Tembaga (Cu^{2+}) terhadap Karakteristik Fisis MnO_2 sebagai Material Penyimpan Energi. Sholawat serta salam penulis panjatkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, yang telah menuntun manusia dari zaman jahiliyah menuju zaman yang terang benderang dan penuh dengan ilmu pengetahuan yang luar biasa saat ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini tidak akan tersusun dengan baik tanpa adanya bantuan dari pihak-pihak yang terkait. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan penulisan proposal skripsi ini.

Selanjutnya kami ucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Abdul Haris, M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
2. Dr. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
3. Drs. Abdul Basid, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
4. Erna Hastuti, M.Si selaku Dosen Pembimbing Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
5. Segenap Dosen Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah bersedia mengamalkan ilmunya, membimbing, dan memberikan pengarahan selama perkuliahan.
6. Bapak, Ibu, adik dan keluarga yang selalu mendoakan serta memberi dukungan yang berharga disetiap langkah penulis.
7. Segenap anggota teman-teman Material Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah membantu penyusunan skripsi ini.

8. Sahabat-sahabat fisika 2015 dan semua pihak yang telah membantu penyusunan skripsi ini yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Malang, 05 Agustus 2019

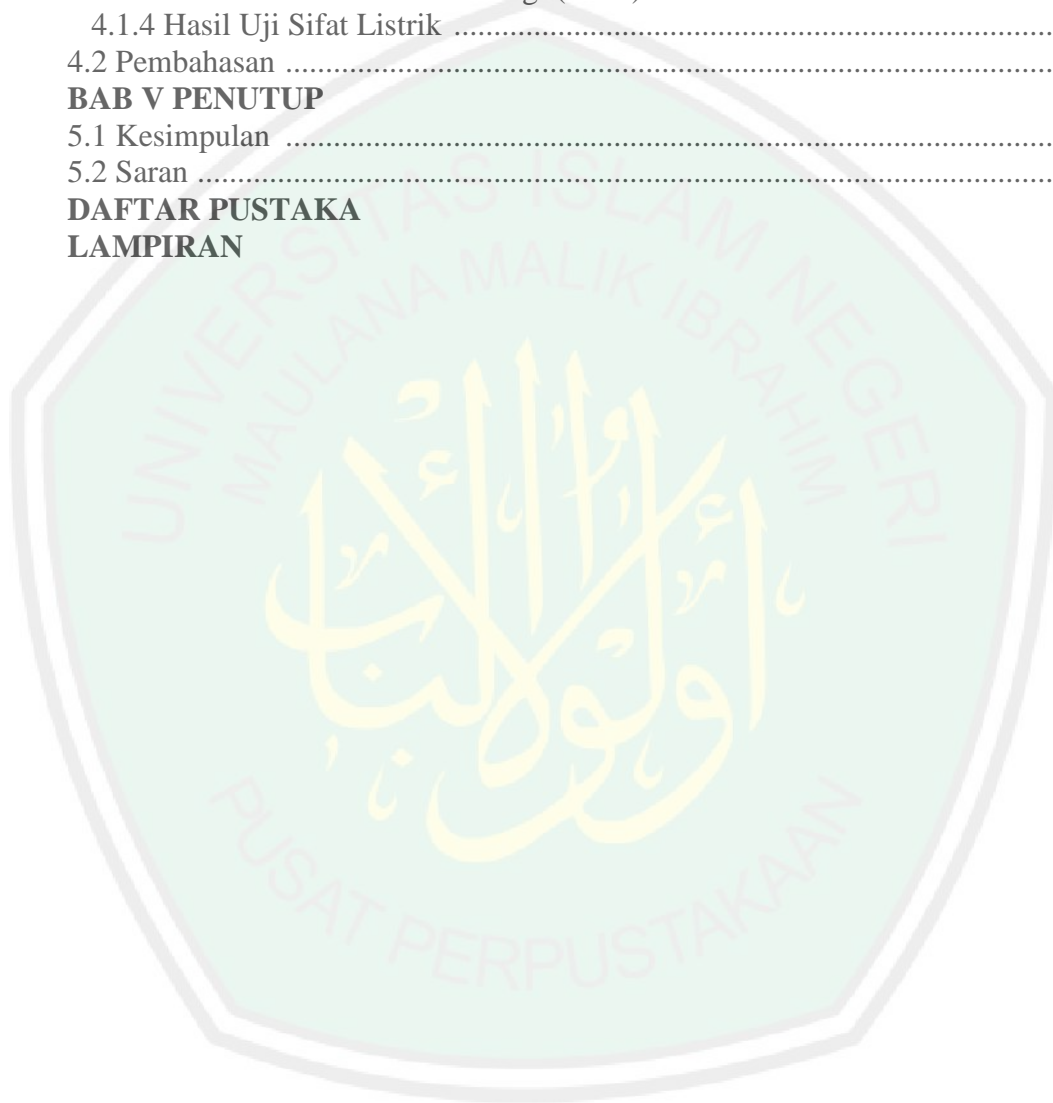
Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Mangan Dioksida (MnO ₂)	7
2.1.1 β-MnO ₂ (<i>Pyrolusite, Polianite</i>)	7
2.1.2 α-MnO ₂ (<i>Hollandite</i>)	8
2.1.3 R-MnO ₂ (<i>Ramsdellite</i>)	9
2.2 Kapasitor	10
2.2.1 Medan Listrik Kapasitor	11
2.2.2 Kapasitansi	12
2.2.3 Bahan Dielektrik	13
2.2.4 Konstanta Dielektrik	14
2.3 Doping MnO ₂ Menggunakan Cu ²⁺	18
2.4 Metode Sol-Gel	20
2.4.1 Proses Sol-Gel	21
2.4.2 Reaksi Sol-Gel	22
2.4.3 Parameter Sol-Gel	23
2.5 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	23
2.6 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	26
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Jenis Penelitian	29
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	29
3.3 Alat dan Bahan penelitian	29
3.3.1 Alat Penelitian	29
3.3.2 Bahan Penelitian	30
3.4 Variabel Penelitian	30
3.5 Prosedur Penelitian	31
3.5.1 Sintesis MnO ₂ tanpa Doping Cu ²⁺	32
3.5.2 Sintesis MnO ₂ dengan Penambahan Doping Cu ²⁺	33

3.5.3 Pembuatan Lembaran Cu <i>Doped</i> MnO ₂	34
3.5.4 Karakterisasi Material	34
3.6 Teknik Pengumpulan Data	34
3.4 Analisis Data	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Data Hasil Penelitian	37
4.1.1 Pembuatan Lembaran Cu <i>Doped</i> MnO ₂	38
4.1.2 Hasil Karakterisasi Struktur Kristal (XRD)	39
4.1.3 Hasil Karakterisasi Morfologi (SEM)	45
4.1.4 Hasil Uji Sifat Listrik	47
4.2 Pembahasan	60
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur β -MnO ₂ <i>pyrolusite</i>	8
Gambar 2.2	Struktur kristal α -MnO ₂ <i>hollandite</i>	9
Gambar 2.3	Struktur <i>R</i> -MnO ₂ <i>ramsdellite</i>	9
Gambar 2.4	Prinsip dasar kapasitor.....	11
Gambar 2.5	Arah medan listrik kapasitor keping sejajar	12
Gambar 2.6	Efek dielektrik terhadap molekuler	14
Gambar 2.7	Mekanisme polarisasi elektronik	15
Gambar 2.8	Mekanisme polarisasi ionik	16
Gambar 2.9	Mekanisme polarisasi orientasi	16
Gambar 2.10	Mekanisme polarisasi muatan ruang	16
Gambar 2.11	Plot sampel K _x MnO ₂ murni dan <i>M-doped</i>	20
Gambar 2.12	Skema umum pembuatan sol-gel.....	22
Gambar 2.13	Interferensi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	25
Gambar 2.14	Puncak XRD yang terbentuk	26
Gambar 2.15	Skema dasar SEM.....	27
Gambar 2.16	SEM sampel <i>Cu-doped Mn₂O₃ hollow microsphere</i>	28
Gambar 3.1	Diagram alir pembuatan serbuk material aktif	31
Gambar 3.2	Diagram alir pembuatan lembaran <i>Cu doped MnO₂</i>	32
Gambar 4.1	Hasil sintesis MnO ₂	38
Gambar 4.2	Pola XRD pada serbuk 0, 5, 10, dan 15 (% mol) Cu-MnO ₂	40
Gambar 4.3	Pola pergeseran 2 θ puncak utama α -MnO ₂	41
Gambar 4.4	Grafik perubahan parameter kisi hasil analisis <i>rietveld</i>	43
Gambar 4.5	Struktur tetragonal (I4/m); MnO ₆ octahedral ditampilkan bersama dengan sumbu a dan c	44
Gambar 4.6	Nilai ukuran kristal MnO ₂ dan Cu-MnO ₂	45
Gambar 4.7	Hasil SEM MnO ₂ (a) MnO ₂ perbesaran 1000x (b) 10% Cu-MnO ₂ perbesaran 1000x (c) MnO ₂ perbesaran 100000x (d) 10% Cu-MnO ₂ perbesaran 100000x	46
Gambar 4.8	Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai impedansi riil	48
Gambar 4.9	Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai impedansi imajiner	49
Gambar 4.10	Plot hasil perhitungan impedansi riil (Z') sampel	50
Gambar 4.11	Plot hasil perhitungan impedansi imajiner (Z'') sampel	49
Gambar 4.12	Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai permitivitas riil	52
Gambar 4.13	Pengaruh frekuensi terhadap permitivitas riil	53
Gambar 4.14	Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai permitivitas imajiner.....	54
Gambar 4.15	Pengaruh frekuensi terhadap nilai permitivitas imajiner	55
Gambar 4.16	Pengaruh ukuran kristal terhadap sifat dielektrik	55
Gambar 4.17	Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai konduktivitas	57
Gambar 4.18	Grafik hubungan konduktivitas terhadap fungsi frekuensi	58
Gambar 4.19	Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai kapasitansi.....	59
Gambar 4.20	Grafik hubungan kapasitansi terhadap fungsi frekuensi.....	60

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat-sifat fisik mangan dioksida.....	10
Tabel 2.2	Parameter sintesis metode sol-gel	23
Tabel 3.1	Data keluaran uji RCL Meter material MnO ₂	35
Tabel 4.1	Nilai parameter kisi Cu <i>doped</i> MnO ₂	42
Tabel 4.2	Ukuran kristal MnO ₂ , 5%, 10%, dan 15% Cu- MnO ₂	44
Tabel 4.3	Variasi konsentrasi <i>dopant</i> terhadap impedansi riil pada frekuensi rendah dan tinggi	48
Tabel 4.4	Variasi konsentrasi <i>dopant</i> terhadap impedansi imajiner pada frekuensi rendah dan tinggi	49
Tabel 4.5	Variasi konsentrasi <i>dopant</i> terhadap permitivitas riil pada frekuensi rendah dan tinggi	51
Tabel 4.6	Variasi konsentrasi <i>dopant</i> terhadap permitivitas imajiner pada frekuensi rendah dan tinggi	53
Tabel 4.7	Konstanta dielektrik sampel pada frekuensi 10 kHz, 50kHz, dan 100kHz	55
Tabel 4.8	Variasi konsentrasi <i>dopant</i> terhadap konduktivitas pada frekuensi rendah dan tinggi	57
Tabel 4.9	Variasi konsentrasi <i>dopant</i> terhadap kapasitansi area pada frekuensi rendah dan tinggi	59

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Gambar penelitian
- Lampiran 2 Perhitungan stoikiometri
- Lampiran 3 Perhitungan ukuran kristal dan data hasil XRD
- Lampiran 4 Analysis *rietica result*
- Lampiran 5 Data RCL Meter
- Lampiran 6 Perhitungan konduktivitas sampel
- Lampiran 7 Perhitungan permitivitas rill dan imajiner
- Lampiran 8 Perhitungan kapasitansi sampel



ABSTRAK

Yuliana, Ika. 2019. **Analisis Pengaruh Konsentrasi Doping Tembaga (Cu^{2+}) terhadap Karakteristik Fisis MnO_2 sebagai Material Penyimpan Energi..** Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Erna Hastuti, M.Si (II) Utiya Hikmah, M.Si

Kata Kunci: MnO_2 , doping, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, *energy storage*, sol-gel.

Mangan dioksida (MnO_2) merupakan salah satu material logam oksida yang berpotensi sebagai aplikasi penyimpanan energi. Peningkatan kapasitansi dan konduktivitas dapat dilakukan dengan menambahkan ion dopan pada MnO_2 . Pada penelitian ini, metode sol-gel digunakan untuk menyiapkan molekul alfa- MnO_2 dengan modifikasi $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sebagai sumber dopan. Asam fumarid ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$) direaksikan ke dalam larutan Kalium Permanganat (KMnO_4) dengan rasio molar dopan sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Sampel alfa MnO_2 murni dan didoping Cu telah dikarakterisasi menggunakan berbagai percobaan teknik. XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal dari mangan dioksida, kristalinitas, dan ukuran kristal, sedangkan sifat listrik diuji menggunakan LCR Meter. Mikrografi SEM dari MnO_2 dan Cu- MnO_2 mengungkapkan morfologi agregasi yang sama. Efek dari penambahan variasi ion dopan menunjukkan adanya pergeseran 2θ . Hal ini berkaitan dengan adanya proses substitusi Cu^{2+} ke Mn^{4+} . Proses pendopingan pada MnO_2 juga berpengaruh terhadap sifat listrik sampel, yaitu kapasitansi dan konduktivitas lebih baik daripada MnO_2 yang tidak didoping.

ABSTRACT

Yuliana, Ika. 2019. **The Analysis of Effect Copper (Cu²⁺) Doping Concentration on Physical Characteristics as an Energy Storage Material**. Thesis. Physics Department, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University, Malang. Advisor: (I) Erna Hastuti, M.Si (II) Utiya Hikmah, M.Si

Keywords: MnO₂, doping, CuCl₂.2H₂O, *energy storage*, sol-gel.

Manganese dioxide (MnO₂) is a metal oxide material that has the potential as an energy storage application. Increased capacitance and conductivity can be done by adding dopant ions to MnO₂. In this study, the sol-gel method was used to prepare alpha-MnO₂ molecules with modification of CuCl₂.2H₂O as dopant source. Fumarid acid (C₄H₄O₄) is reacted into a potassium permanganate (KMnO₄) solution with dopant molar ratios of 0%, 5%, 10%, and 15%. Samples of pure MnO₂ alpha and Cu doped have been characterized using various technical experiments. XRD is used to identify the crystalline phase of manganese dioxide, crystallinity, and crystal size, while the electrical properties are tested using an LCR Meter. SEM micrography of MnO₂ and Cu-MnO₂ express the same morphology of aggregation. The effect of adding dopant ion variations shows a 2θ shift. This relates to the substitution process of Cu²⁺ to Mn⁴⁺. The supporting process of MnO₂ also affects the electrical properties of the sample, that is, capacitance and conductivity is better than MnO₂ which is not doped.

الملخص

يوليانا إيكّا. 2019. تحليل أثر تركيز المنشطات النحاس (Cu^{2+}) لخصائص الفيسس (Fisis MnO_2) حسبما مادة متجر الطاقة. البحث العلمي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف: 1) إيرنا هاستوتي الماجستير 2) أعطي حكمة الماجستير. الكلمات المفتاحيات: (MnO_2)، تخدير، ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، (energy storage)، (sol-gel).

ثاني أكسيد المنغنيز هو واحد من مواد أكسيد المعادن التي تحتمل تطبيق متجر الطاقة، إرتفاع المواسعة، والموصلية تستطيع ان تفعل بزيادة (ion dopan) ل (MnO_2). في هذا البحث، تستخدم الطريقة (sol-gel) لاستعداد الجزئ ($\alpha\text{-MnO}_2$) بتعديل ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) حسبما المصدر (dopan). يستجيب حمض الفورميد ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$) إلى محلول برمجنات البوتاسيوم (KMnO_4) بنسبة المولى (dopan) 0 %، 5 %، 10 %، و 15 %. نموذج ($\alpha\text{ MnO}_2$) نقي ويخدر (Cu) يصف ان يستخدم التحريات التقنيات. يستخدم (XRD) لتحديد المرحلة البلورية من ثاني أكسيد المنغنيز، التبلور، ومعيار البلور. أما الخواص الكهربائية يختبر ان يستخدم (LCR) متر. فحص مجهري (SEM) من (MnO_2) (dan Cu-MnO_2) يعتبر مورفولوجيا التجميع الذي متساويا. الأثر من زيادة تنوع (ion dopan) يدلّ موجود الإحتكاك (2θ). يرتبط هذا الحال بوجود طريقة الإستبدال (Cu^{2+}) إلى (Mn^{4+}). طريقة التخدير في (MnO_2) تآثر إلى الخواص الكهربائية للعينة أيضا، هي المواسعة والموصلية أحسن من (MnO_2) الذي لا يخدر.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi dan informasi menjadikan energi listrik sebagai kebutuhan dalam kehidupan manusia. Salah satu masalah utama yang dihadapi energi terbarukan yaitu berkaitan dengan penyimpanan. Suplai energi listrik tidak akan stabil tanpa adanya penyimpanan, oleh sebab itu dibutuhkan perangkat penyimpan energi yang dapat memuat daya yang besar, aman, dan tahan lama (Zhang et al, 2009).

Salah satu perangkat teknologi penyimpan energi listrik secara umum yaitu baterai, mampu menyimpan energi di dalam perangkat yang relatif ringan atau kecil dan menyediakan berbagai level energi (Burke, 2000). Namun, ada beberapa kelemahan pada baterai termasuk lamanya proses charging, kadar racun, dan rapat daya yang kecil. Hal ini mendorong para ilmuwan untuk mengembangkan superkapasitor, sebuah perangkat yang juga melibatkan reaksi elektrokimia, namun memiliki kapasitas muatan yang besar.

Perintah untuk mengkaji energi dan bahan penyimpan energi sudah tertulis dalam firman Allah SWT pada surat Yasin(36): 80.

الَّذِي جَعَلَ لَكُم مِّنَ الشَّجَرِ الْأَخْضَرِ نَارًا فَإِذَا أَنتُم مِّنْهُ تُوقِدُونَ ﴿٨٠﴾

Yaitu Tuhan yang menjadikan untukmu api dari kayu yang hijau, Maka tiba-tiba kamu nyalakan (api) dari kayu itu".

Ayat Al-Qur'an di atas mengandung makna yang menjadikan api dari kayu yang hijau. Menurut Zaghlul (2008) maksud dari "api" tersebut dapat diartikan sebagai sumber energi, dan "kayu" merupakan bagian tumbuhan yang terdapat di alam. Sisa-sisa tumbuhan yang mengendap didalam tanah selama jutaan tahun

akan terbentuk mineral sebagai akibat dari adanya proses kimia maupun fisika. Begitupula dengan penelitian ini menggunakan mineral mangan sebagai bahan penyimpan energi. Perangkat penyimpan energi yang banyak dikembangkan saat ini seperti, baterai, *fuel cell*, dan kapasitor (Riyanto, 2013).

Kapasitor elektrokimia memanfaatkan luas permukaan yang besar dari material elektroda untuk menjangkau rapat energi yang tinggi. Disisi lain, akses ion dalam mengisi pori-pori internal dapat mempengaruhi nilai kapasitansi yang dihasilkan (Conway, 1999). Mekanisme penyimpanan muatan dalam kapasitor dapat terjadi secara *Faradaic* ataupun *non-Faradic*. Penyimpanan muatan secara *non-Faradaic* atau listrik statis terjadi karena tidak ada transfer muatan antara elektroda dan elektrolit. Sedangkan penyimpanan muatan secara *Faradaic* terjadi karena pemindahan muatan atau pertukaran ion antara elektroda dan elektrolit muatan melalui penyerapan reaksi reduksi-oksidasi (redoks) elektron (Song et al, 2012). Pengukuran pada elektroda secara *Faradaic* akan menghasilkan reaksi sistem secara reversibel, irreversibel, ataupun kuasi-reversibel yang berhubungan dengan siklus hidup kapasitor (Zhou et al, 2010).

Material elektroda yang biasa digunakan untuk penyimpanan energi diantaranya karbon aerogel, *nanofoam*, *nanotube*, karbon aktif, logam oksida, dan polimer konduktif (Sim et al, 2015). Dari berbagai logam oksida, RuO_2 dan IrO_2 menghasilkan reversibilitas maupun kapasitansi yang tinggi. Namun RuO_2 dan IrO_2 bersifat toksis terhadap lingkungan, biaya tinggi dalam pembuatan, dan faktor kelangkaan sehingga menjadi pertimbangan bagi peneliti dalam pengaplikasiannya. Sedangkan untuk polimer konduktif seperti polipirol dan polianilin menunjukkan plastisitas tinggi dan siklus hidupnya (*life time*) maupun

stabilitas termal masih perlu ditingkatkan. Oleh sebab itu, dibutuhkan keterbaruan pembuatan material penyimpanan energi yang dapat menghasilkan bahan murah dan performa listrik yang baik. Logam transisi telah dipertimbangkan sebagai bahan yang menjanjikan dalam pembuatan elektroda (Pan et al, 2016).

MnO₂ telah menarik perhatian peneliti untuk perannya sebagai bahan elektroda yang aplikatif. Penelitian pada MnO₂ relatif kompleks karena ada beberapa bentuk kristalografi yang menentukan tipe dari MnO₂ itu sendiri. Beberapa oksida mangan yang paling banyak dipelajari adalah *birnessites*, *cryptomelane*, dan *spinels* (Feng and Kanoh, 1999). MnO₂ adalah bahan elektroda yang memiliki sifat *structural stability* relatif rendah, kinerja elektrokimia yang sangat baik, ramah lingkungan dibandingkan dengan logam transisi lainnya (Zhang and Pan, 2015). MnO₂ telah diakui sebagai material yang menarik karena memiliki berbagai struktur kristal dan kaya Mn valensi (Mn²⁺, Mn³⁺, Mn⁴⁺) (Genuino et al, 2012). Selain itu, MnO₂ memiliki kapasitas penyimpanan yang tinggi, yaitu 615 mAh/g (Wang et al, 2002).

Pembentukan partikel MnO₂ yaitu dengan cara mereduksi larutan KMnO₄ menjadi MnO₂. Proses reduksi ini dapat dilakukan dengan cara kimiawi maupun elektrokimia. Sintesis MnO₂ dapat dilakukan dengan beberapa metode, antara lain metode hidrotermal (Cheng et al, 2005), *thermal decomposition* (Wang et al, 2003), dan *sol-gel* (Bach et al, 1990). Namun, sintesis menggunakan metode hidrotermal membutuhkan suhu tinggi dan waktu reaksi yang lama, sementara metode *thermal decomposition* membutuhkan biaya yang tidak murah. Dari kelemahan kedua metode tersebut, maka metode sol-gel lebih banyak dipilih karena menggunakan biaya yang relatif murah, teknik yang sederhana, dapat

homogenitas ukuran yang tinggi, distribusi ukuran yang merata dan morfologi yang terkontrol melalui reaksi parameter (Ching et al, 2002). Peningkatan kapasitas spesifik oksida logam dan penstabilan struktur MnO₂ yaitu dengan cara menggabungkan satu atau dua ion logam ke dalamnya untuk membentuk senyawa multilogam seperti Mn-Ni oksida (Hao et al, 2016), Mn-Co (Poonguzhali et al, 2015), Mn-Fe (Zeng et al, 2017), dan Al-Mn oksida (Hu et al, 2015).

Penelitian sebelumnya telah dilakukan beberapa pendopingan MnO₂ dengan ion logam. Doping kationik dapat meningkatkan kualitas oksida logam dan konduktivitas listrik. Zhang et al (2012) telah mensintesis *Copper-Doped* MnO₂ dengan metode hidrotermal. Hasil uji elektrokimia menunjukkan bahwa kapasitansi 0.25 mmol Cu²⁺ *doped* MnO₂ adalah 636.3 F/g pada 1 A/g *current density* dan kapasitansi sebesar 105.01%. Hu et al (2015) menunjukkan bahwa *Al-doped* MnO₂ disiapkan dengan metode sol-gel menggunakan Al₂(SO₄)₃.18H₂O sebagai *dopan reagent* yang bermanfaat untuk aplikasi elektroda semu dengan kapasitansi spesifik 213 F/g. *Zn-doped* MnO₂ nanopartikel mempunyai luas permukaan tinggi sekitar 46 m²/g yang disiapkan dari KMnO₄ dan logam asetat dengan perlakuan panas dari endapan 400°C selama 3 jam (Poonghuzali et al, 2015). Chen et al (2016) telah melakukan penelitian transformasi fasa pada *Cr³⁺ doped* MnO₂. Hasil yang diperoleh Cr³⁺ ion doping menginduksi fasa transisi MnO₂ dari beta ke alfa polimorf. Ukuran nanorod MnO₂ meningkat dari 20 hingga 70 nm seiring dengan meningkatnya konsentrasi dopan. Kapasitansi spesifik tinggi sebesar 583 F/g pada kerapatan arus 10 A/g diperoleh dengan *Cu doped* MnO₂ menggunakan *wet chemical redox* KMnO₄ dan tembaga asetat (Hashem et al, 2011).

Berdasarkan uraian di atas, maka pada penelitian ini akan dilakukan sintesis Cu *doped* MnO₂ menggunakan metode *sol-gel*. Penelitian ini juga mengamati bagaimana konsentrasi doping mempengaruhi morfologi permukaan, struktur kristal, dan sifat elektrokimia dari MnO₂. Selanjutnya sintesis dan karakterisasi ini diharapkan menghasilkan elektroda *energi storage* yang memiliki rapat daya besar.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi Cu terhadap struktur dan morfologi MnO₂ dengan menggunakan metode sol-gel ?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi Cu terhadap sifat listrik MnO₂ dengan menggunakan metode sol-gel ?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

1. Untuk menganalisis pengaruh konsentrasi Cu terhadap struktur dan morfologi MnO₂ dengan menggunakan metode sol-gel.
2. Untuk menganalisis pengaruh konsentrasi Cu terhadap sifat listrik MnO₂ dengan menggunakan metode sol-gel.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa :

1. Memberikan informasi tentang karakteristik fisis yang dihasilkan dengan sintesis MnO₂ yang didoping dengan Cu sehingga dapat diaplikasikan dalam penyimpanan energi.

2. Mengetahui sifat listrik yang dihasilkan dengan sintesis MnO_2 yang didoping dengan Cu sehingga dapat diaplikasikan dalam penyimpanan energi.
3. Dapat memberikan literatur pengetahuan kepada para pembaca maupun peneliti sehingga bermanfaat untuk kehidupan dimasa mendatang.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bahan yang digunakan yaitu KMnO_4 , asam fumarat, dan CuCl_2 .
2. Penentuan ukuran kristal dengan persamaan *Debye Scherrer*.
3. Karakterisasi yang dilakukan yaitu uji sifat fisis yang meliputi, uji morfologi pada permukaan sampel MnO_2 terdoping Cu menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), uji fase Kristal dan struktur nanopartikel menggunakan Difraktometer sinar-X (*X-Ray Diffraction*), dan uji sifat listrik menggunakan RCL Meter.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mangan Dioksida (MnO₂)

Di antara logam transisi yang umum, mangan merupakan salah satu logam yang memiliki struktur kristal oksida, oksid-hidroksida dan hidroksida yang berbeda dalam jumlah terbesar. Untuk menjelaskan struktur mangan yang kompleks ini, melibatkan dua faktor utama yaitu terkait struktur elektronik ion Mn⁺ (efek Jahn-Teller) dan terkait dengan banyaknya reaksi redoks yang terlibat dalam sistem Mn-O-H₂O (Bricker 1965). Dalam sistem periodik unsur, mangan berada dalam bilangan oksidasi +2, +3, +4 +6 dan +7 dimana oksidasi yang paling stabil adalah antara 2 dan 4 (Li et al, 2016).

MnO₂ telah diketahui memiliki beberapa bentuk polimorf. Disamping itu, MnO₂ diakui sebagai senyawa yang sangat menarik karena memiliki banyak bentuk struktur kristal dan kaya Mn valensi. Pada umumnya, mangan dioksida adalah material yang kompleks dan merupakan oksida non-stoikiometrik, dimana kation asing maupun molekul air dapat masuk ke dalam struktur tersebut. Struktur berbagai oksida MnO₂ didasarkan pada satu unit struktural dasar, yaitu MnO₆ oktahedron. Karakteristik struktural dari mangan dioksida diantaranya yaitu (Khopkar, 1990):

2.1.1 β-MnO₂ (*Pyrolusite, Polianite*)

β-MnO₂ adalah bentuk MnO₂ terpadat dan paling stabil. β-MnO₂ mengkristal dalam bentuk tetragonal ($a = 4,3983 \text{ \AA}$ dan $c = 2,873 \text{ \AA}$) dengan $Z = 2$ (Khopkar, 1990). Struktur kristal β-MnO₂ bertipe rutil. MnO₆ oktahedral tepi membentuk rantai tunggal yang tak terhingga dan sejajar dengan sumbu c .

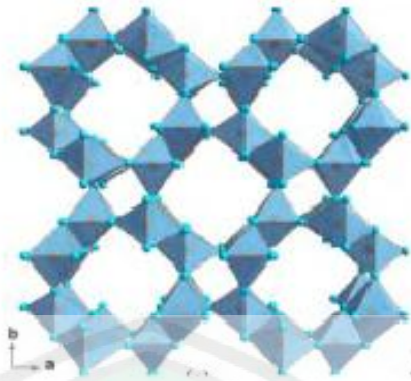
Masing-masing saluran ini terhubung dengan empat rantai oktahedral sekelilingnya untuk membentuk *channel* 1x1. Struktur ini dapat dijelaskan oleh susunan heksagonal oksigen yang rapat menjadi oktahedral dimana sedikit terdistorsi satu dari dua yang ditempati oleh Mn^{4+} . Struktur kristal β - MnO_2 ditunjukkan pada gambar 2.1 (Greenwood and Earnshaw, 1984).



Gambar 2.1 Struktur β - MnO_2 *pyrolusite* (Greenwood and Earnshaw, 1984).

2.1.2 α - MnO_2 (*Hollandite*)

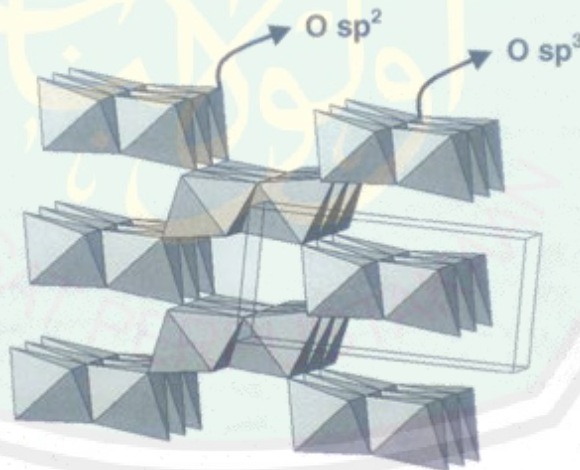
Struktur MnO_2 lain dengan ukuran rongga yang lebih besar adalah α - MnO_2 . Mineral yang dapat ditemukan di alam adalah *hollandite* ($Ba_xMn_8O_{16}$) dan *cryptomelane* ($K_xMn_8O_{16}$). α - MnO_2 memiliki simetri tetragonal dengan parameter sel: $a = 9,8776 \text{ \AA}$ dan $c = 2,8654 \text{ \AA}$. Struktur terdistorsi ketika terjadi penyisipan kation, maka mineral *hollandite* biasanya memiliki simetri monoklinik. Struktur Hollandite terdiri dari rantai ganda MnO_6 oktahedral, membentuk *channel* 2x2 (0,46 nm x 0,46 nm) yang merambat sepanjang sumbu c tetragonal sel satuan (Mohamed, 2015).



Gambar 2.2 Struktur kristal α -MnO₂ *hollandite* (Mohamed, 2015).

2.1.3 R-MnO₂ (*Ramsdellite*)

Struktur ini dijelaskan oleh perakitan rantai ganda oktahedral di mana ketiga ujung oktahedral berikatan dengan oktahedral sekelilingnya. Rantai ganda ini berorientasi di sepanjang sumbu *c* dihubungkan oleh puncak-puncak yang memisahkan *channel* 2x1. Struktur R-MnO₂ ditunjukkan pada gambar berikut (Greenwood and Earnshaw, 1984).



Gambar 2.3. Struktur R-MnO₂ *ramsdellite* (Greenwood and Earnshaw, 1984).

Mangan (Mn) merupakan logam ke-empat yang banyak diaplikasikan selain besi (Fe), aluminium (Al) dan tembaga (Cu). Bijih mangan dapat dibentuk melalui beberapa proses, diantaranya proses hidrotermal, metamorfik, sedimenter

dan residu. Ada beberapa mineral-mineral bijih mangan yang penting lainnya adalah manganit ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), braunit ($3\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnSiO}_3$), hausmanit (Mn_3O_4), rodokrosit (MnCO_3), rodonit (MnSiO_3) dan ($2\text{MnSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) Adapun sifat-sifat fisik dari mangan dioksida ini dapat dilihat pada tabel 2.1 (Khopkar, 2003).

Tabel 2.1 Sifat-sifat fisik mangan dioksida (Khopkar, 2003)

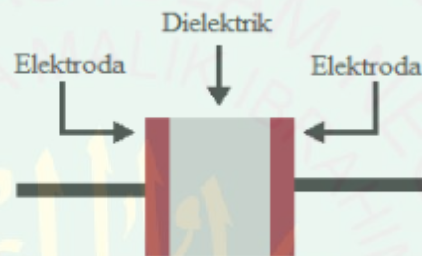
Ciri-ciri Fisik	
Fase	Padat
Warna	Hitam-Kecoklatan
Massa jenis cair pada titik lebur	5,95 g/cm ³
Titik Lebur	1519°C
Titik Didih	2061°C
Kapasitas Kalor (Suhu Ruang)	26,32 J/(mol°K)
Massa Jenis (Sekitar suhu kamar)	7,21 g/cm ³
Spesific Gravity	5,026 (Air=1)

Aplikasi dari MnO_2 berukuran nano ini adalah sebagai material elektroda karena harganya yang relatif murah, ramah lingkungan dan memiliki kapasitas yang tinggi. Aplikasi lain dari MnO_2 adalah sebagai katalis berbagai reaksi. Dalam hal ini, digunakan untuk dekomposisi ozon, proses reduksi, nitrogen oksida, dan oksidasi karbon monoksida. MnO_2 mudah teroksidasi dan memiliki stabilitas yang bagus pada kondisi asam. (Mohamed, 2015).

2.2 Kapasitor

Kapasitor merupakan komponen elektronika dari dua konduktor yang terisolasi satu sama lain serta membawa muatan yang sama besar dan berlawanan. Kapasitor mempunyai sifat diantaranya dapat menyimpan dan mengosongkan muatan listrik. Pada umumnya kapasitor yang digunakan adalah dua keping konduktor sejajar (Halliday dan Resnick, 1996).

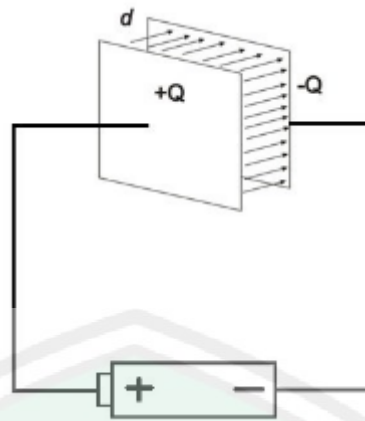
Salah satu struktur sebuah kapasitor adalah dua plat penghantar yang ditempatkan berdekatan tetapi tidak bersentuhan. Jika kedua tegangan diberi tegangan listrik, maka muatan positif akan terkumpul pada salah satu penghantar dan muatan negatif pada penghantar lainnya. Muatan positif tidak dapat mengalir menuju plat bermuatan negatif sebaliknya karena terpisah oleh bahan dielektrik yang non konduktif. Muatan ini tersimpan selama tidak ada konduksi pada ujung-ujung kakinya (Sulastri, 2006).



Gambar 2.4 Prinsip dasar kapasitor

2.2.1 Medan Listrik Kapasitor

Benda yang bermuatan listrik di setiap titiknya terdapat kuat medan listrik. Apabila muatannya diperbesar, maka kuat medan listrik di sekitar benda bermuatan listrik tersebut menjadi lebih besar dan sebaliknya. Kehadiran medan listrik disekitar bahan mengakibatkan atom-atom pada bahan membentuk momen-momen *dipole* listrik. Banyaknya momen-momen *dipole* listrik persatuan volume bahan disebut polarisasi. Untuk menghasilkan medan listrik E yang kuat dari suatu kapasitor yang terpisah dengan jarak d , maka jarak d harus lebih kecil dibandingkan dengan panjang dan lebar keping. (Tipler, 1991).



Gambar 2.5 Arah medan listrik kapasitor keping sejajar

Gambar 2.5 menunjukkan kapasitor keping sejajar yang diberi muatan $+Q$ dan muatan $-Q$ pada masing-masing keping. Garis-garis medan listrik antara keping-keping kapasitor yang terpisah menunjukkan bahwa medan listrik bersifat seragam. Sehingga beda potensial antara bidang-bidang kapasitor sama dengan medan listrik (E), yang ditunjukkan pada persamaan 2.2.

$$V = E \cdot d \quad (2.1)$$

dengan E = medan listrik (Newton/Coulomb) dan d = jarak pemisah plat (m).

2.2.2 Kapasitansi

Kapasitansi adalah besaran yang menyatakan kemampuan dari suatu kapasitor untuk dapat menampung muatan listrik (Tipler, 1996). Kapasitansi bergantung pada ukuran dan bentuk konduktor dan akan bertambah bila ada sebuah material pengisolasi atau dielektrik (Young dan Freedman, 2003). Untuk tinjauan kapasitor keping sejajar, sifat bahan dielektriknya ditentukan oleh nilai konstanta dielektrik bahannya (Sulastri, 2006).

Kapasitansi diukur berdasarkan besar muatan yang dapat disimpan pada suatu kenaikan tegangan dan dinyatakan pada persamaan 2.3 (Woollard, 1988).

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.3)$$

Dimana C = kapasitansi (Farad), Q = muatan elektron dalam (Coulomb), dan V = tegangan (volt). Dalam pembuatan kapasitor, secara matematis kapasitansi dapat dihitung dengan persamaan 2.4.

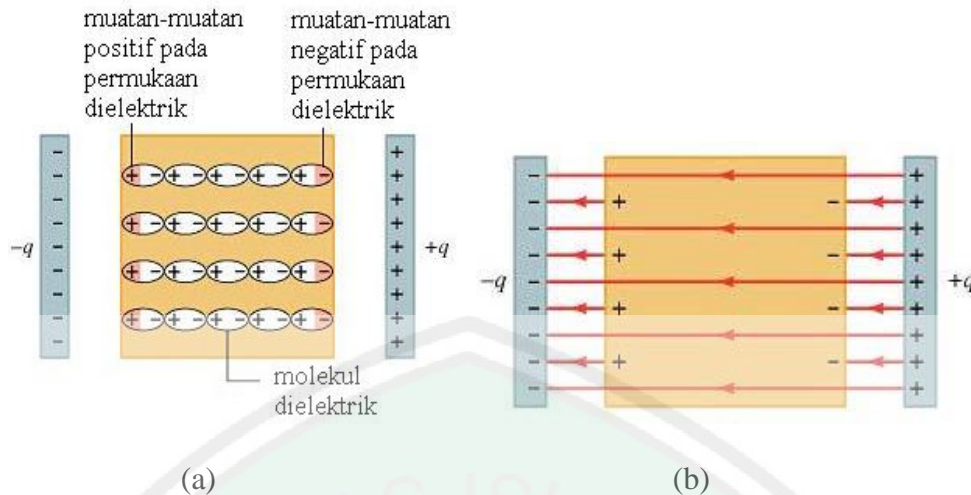
$$C = (8.85 \times 10^{-12}) \left(k \frac{A}{d} \right) \quad (2.4)$$

dengan A = luas area plat metal (m^2), d = tebal bahan dielektrik (m), dan k = konstanta dielektrik.

2.2.3 Bahan Dielektrik

Ruang antara konduktor pada kapasitor biasanya diisi dengan bahan isolator yang dinamakan dielektrik, misalnya kaca, kertas, mika, dan lain-lain. Eksperimen yang dilakukan Faraday menunjukkan bahwa adanya dielektrik menyebabkan kapasitansi bertambah. Penambahan kapasitansi ini disebabkan karena adanya dielektrik yang mengakibatkan medan listrik di antara kapasitor berkurang (Giancoli, 2001).

Karakteristik yang dimiliki oleh semua bahan dielektrik, baik yang berupa cairan, padatan atau gas, berbentuk kristal atau bukan, ialah kemampuan untuk menyimpan energy listrik. Penyimpanan ini terjadi dengan pergeseran relatif kedudukan muatan terhadap gaya atomik dan molekul (Hayt, 1986).



Gambar 2.6 Efek dielektrik terhadap molekuler

Pada Gambar 2.6 (a) ditunjukkan kapasitor diisolasi sehingga muatan tidak bisa mengalir ke pelat-pelat. Sedangkan Gambar 2.6 (b) menunjukkan dielektrik di sisipkan di antara kedua pelat. Meskipun molekul-molekul tersebut netral, elektron-elektronnya mungkin tidak terdistribusi merata, sehingga satu bagian dari molekul akan positif dan bagian lainnya negatif. Bahkan jika molekul-molekul itu bukan polar, medan listrik di antara pelat akan menginduksi beberapa pemisahan muatan pada molekul. Beberapa garis medan listrik sebenarnya tidak menembus dielektrik, tetapi berakhir pada muatan muatan yang diinduksi pada permukaan dielektrik (Giancoli, 2001).

2.2.4 Konstanta Dielektrik

Konstanta dielektrik (permitivitas) merupakan kemampuan suatu material untuk menyimpan muatan (Vlanck, 2004) :

$$K = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon A/d}{\epsilon_0 A/d} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

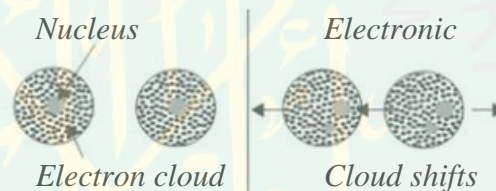
dengan A adalah luas permukaan (m^2) dan d adalah jarak antar pelat (m). Jika suatu bahan disisipkan diantara plat sejajar, nilai kapasitansi akan

bertambah. Suatu bahan dielektrik akan mengalami polarisasi apabila dipengaruhi oleh medan listrik. Besarnya polarisasi bergantung pada jumlah momen *dipole* tiap satuan volume.

Sumber Polarisasi dapat berasal dari polarisasi elektronik, polarisasi ionik, orientasi dan muatan ruang (*space charge*) (Vlack, 1964).

1. Polarisasi Elektronik

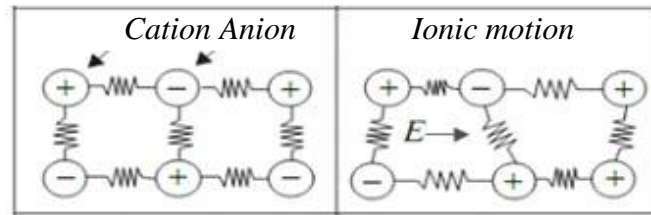
Polarisasi ini terjadi pada semua jenis dielektrik yang disebabkan adanya pergeseran awan elektron pada atom atau molekul karena adanya medan listrik. Pusat muatan listrik positif dan negatif yang semula berhimpit menjadi terpisah sehingga terbentuk dipol. Dipol yang terbentuk merupakan dipol tidak permanen artinya dipol terbentuk selama ada pengaruh medan listrik saja.



Gambar 2.7 Mekanisme polarisasi elektronik (Vlack, 1964).

2. Polarisasi Ionik

Polarisasi ini hanya akan teramati pada material yang mempunyai ikatan ion. Adanya pengaruh medan listrik terhadap pergeseran ion-ion yang berlawanan dapat menyebabkan polarisasi ionik. Polarisasi ionik terjadi lebih lambat dari polarisasi elektronik. Untuk mencapai keadaan seimbang, waktu yang lama dan medan searah. Demikian pula jika medan dihilangkan posisi ion akan kembali pada posisi semula dalam waktu lebih lama dari polarisasi elektronik.



Gambar 2.8 Mekanisme polarisasi ionik (Vlanck, 2004).

3. Polarisasi Orientasi

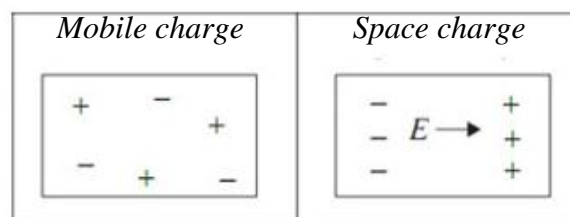
Polarisasi yang terjadi pada material dengan molekul asimetris yang membentuk momen *dipole* permanen. *Dipole-dipole* permanen ini akan cenderung mengarahkan diri sejajar dengan medan listrik; namun tidak semua dipole akan sejajar dengan arah medan.



Gambar 2.9 Mekanisme polarisasi orientasi (Vlanck, 2004).

4. Polarisasi Muatan Ruang

Polarisasi yang disebabkan karena pemisahan muatan-muatan ruang. Dengan proses ini terjadi pengumpulan muatan sejenis di dua sisi dielektrik. Polarisasi ini berlangsung lebih lambat lagi dan pada waktu medan listrik dihilangkan muatan ruang dapat menempati posisi yang baru, tetapi tidak seluruhnya kembali pada posisi awal.



Gambar 2.10 Mekanisme polarisasi muatan ruang (Vlanck, 2004)

Ditinjau dari frekuensi pengukurannya, pada mekanisme ini nilai dielektrisitas bagian real maupun imajiner menurun secara eksponensial seiring dengan bertambahnya frekuensi pengukuran, yaitu pada rentang 1kHz-200 kHz. Pada frekuensi rendah, maka elektron dapat beresilasi mengikuti medan aplikasi dan mekanisme polarisasi dapat mengikuti medan aplikasi. Namun pada frekuensi tinggi, osilasi elektron tidak dapat mengikuti fluktuasi medan aplikasi dan menyebabkan mekanisme polarisasi tidak dapat mengikuti medan aplikasi. Pada frekuensi tinggi juga, dielektrisitas dihasilkan dari butir (grain) yang memiliki nilai dielektrisitas yang kecil (Mansour, 2005).

Menurut Debye hubungan antara frekuensi dan konstanta dielektrik dinyatakan sebagai berikut (O'Dwyer, 1952):

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} \times \frac{1 - i\omega\tau}{1 - i\omega\tau} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) i\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (2.9)$$

Dimana ε^* = permitifitas kompleks, ε_0 = konstanta dielektrik pada frekuensi rendah, ε_{∞} = konstanta dielektrik pada frekuensi tinggi, ω = frekuensi anguler, τ = waktu relaksasi, ε' = permitivitas bagian real, ε'' = permitivitas bagian imajiner. Persamaan permitifitas kompleks tersebut jika dipisahkan bagian real dan imajineranya maka menjadi (Vikram, 2009) :

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2} i\omega\tau \quad (2.11)$$

Nilai maksimum dari ε' dan ε'' adalah

$$\varepsilon' = \frac{(\varepsilon_0 + \varepsilon_\infty)}{2} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)}{2} \cdot i\omega\tau \quad (2.13)$$

Persamaan yang menyatakan hubungan konstanta dielektrik dengan frekuensi diatas, hanya tepat jika diasumsikan memiliki satu macam mekanisme relaksasi (efek Maxwell Wagner).

2.3 Doping MnO₂ Menggunakan Cu²⁺

Doping adalah penambahan zat pengotor ke dalam senyawa kimia untuk meningkatkan aktivitas senyawa tersebut. Salah satu syarat doping adalah unsur yang dimasukkan ke dalam senyawa memiliki jari-jari atom relatif sama. Doping permukaan dengan cara tersubstitusi maupun terinterstisi dapat mempengaruhi karakteristik struktur, morfologi, dan sifat listrik MnO₂ (Wang et al, 2012).

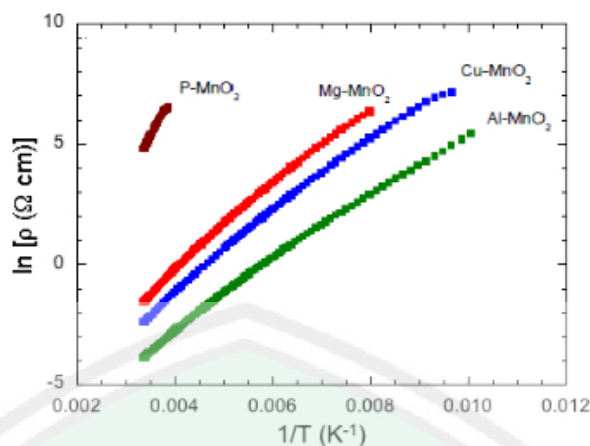
Copper (Cu) merupakan unsur transisi dengan nomor atom 29 dan memiliki konfigurasi elektron : 1s² 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁶ 4s² 3d⁹. Sifat fisik Cu diantaranya mempunyai titik lebur 1083°C, titik didih 2567°C, jari-jari atom 1,173 Å dan jari-jari ion Cu²⁺ 0,96 Å. Selain itu, logam transisi golongan IB ini banyak ditemukan berwarna merah dan *orange*. Hal ini sesuai dengan karakteristik unsur transisi yaitu: senyawa-senyawanya umumnya berwarna, memiliki sifat paramagnetik, dapat bertindak sebagai katalis dan memiliki titik lebur yang lebih tinggi dibandingkan unsur-unsur utama (Dzhafarov et al, 2005).

Kinerja *electricity* dari bahan dapat lebih ditingkatkan dengan meningkatkan konduktivitas listrik melalui doping kisi menggunakan beberapa ion logam transisi lainnya. Khususnya, doping kationik telah diidentifikasi menjadi metode yang efektif untuk meningkatkan konduktivitas listrik dan kemampuan transfer

muatan bahan anoda. Terkait dengan hal ini, berbagai kation logam (seperti asimoni, niobium¹⁹, tantalum²⁰, kobalt²¹, dan tembaga²³ telah banyak digunakan untuk meningkatkan kinerja elektrokimia dari bahan anoda oksida logam (Hashem et al, 2018).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa tembaga dengan konduktivitas listrik tinggi dapat digunakan sebagai salah satu unsur untuk doping kationik. Hashem et al (2011), telah menyelidiki pengaruh penambahan dopan Al, Mg, dan Cu terhadap MnO₂ dan didapatkan hasil seperti pada Gambar 2.11. Pengenalan ion dopan seperti Al, Cu, dan Mg menstabilkan struktur MnO₂ karena dapat mengurangi derajat kebebasan MnO₂ murni.

Li dkk (2016) juga mengembangkan sintesis mesokristal mangan oksida menggunakan *manganese carbonate* sebagai templat reaktan. Cu *dopant* terdistribusi secara homogen di antara sampel-sampel mangan oksidemik dan tertanam dalam kisi mangan oksida dengan mensubstitusi Mn³⁺ pada Cu²⁺. Penggabungan Cu kedalam Mn₂O₃ dan Mn₃O₄ menginduksi mikrostruktur yang besar dan berpori. Sampel Mn₂O₃ bola berongga Cu-*doped* menunjukkan kapasitas spesifik lebih tinggi dari 642 mAh g⁻¹ dengan rata kerapatan arus 100 mA g⁻¹ setelah 100 siklus. Hasil penelitian ini telah memverifikasi kemampuan doping Cu untuk meningkatkan kinerja penyimpanan mangan oksida.



Gambar 2.11 Plot sampel K_xMnO_2 murni dan *M-doped* (Hashem et al, 2011)

2.4 Metode Sol-Gel

Sol-gel merupakan salah satu metode yang berhasil dalam preparasi material oksida logam berukuran nano. Sol adalah suspensi koloid yang fasa terdispersinya berbentuk padat dan fasa pendispersinya berbentuk cairan. Suspensi dari partikel padat atau molekul-molekul koloid dalam larutan, dibuat dengan metal alkoxi dan dihidrolisis dengan air sehingga menghasilkan partikel padatan metal hidroksida dalam larutan, dan reaksi yang terbentuk adalah reaksi hidrolisis (Paveena et al, 2010).

Gel (*gelation*) adalah jaringan partikel atau molekul dimana polimer yang terjadi di dalam larutan digunakan sebagai tempat pertumbuhan zat anorganik. Secara fisik, Gel berupa padatan maupun cairan. Pertumbuhan anorganik terjadi di *gel point*, dimana energi ikat lebih rendah. Reaksinya yang terbentuk adalah reaksi kondensasi, baik alkohol atau air yang akan menghasilkan *oxygen bridge* (jembatan oksigen) untuk mendapatkan metal oksida (Paveena et al, 2010).

Ada beberapa faktor yang memengaruhi struktur dan sifat fisik *gel*, diantaranya (Ayyad, 2011) :

1. Pemilihan bahan baku material
2. Laju hidrolisis dan kondensasi
3. Modifikasi kimiawi dari sistem sol-gel.

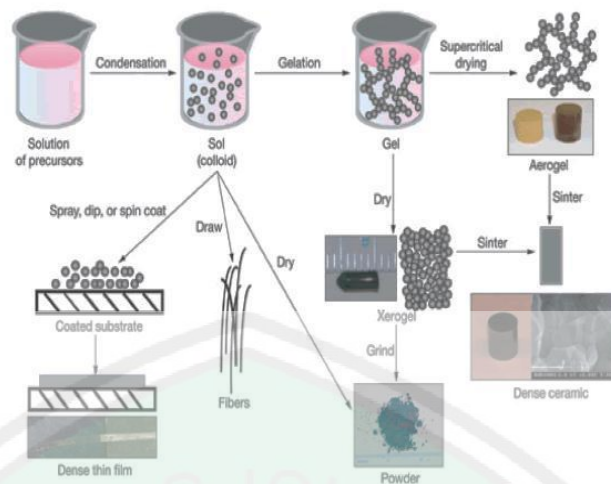
Metode sintesis menggunakan sol-gel untuk material berbasis oksida berbeda-beda bergantung prekursor dan bentuk produk akhir, baik itu berupa powder, film, aerogel, atau serat.

Metode sol-gel dikenal sebagai salah satu metode sintesis nanopartikel yang cukup sederhana dan mudah. Metode ini merupakan salah satu “*wet method*” atau karena pada prosesnya melibatkan larutan sebagai medianya. Metode ini cocok untuk preparasi thin film dan material berbentuk serbuk. Tujuannya agar suatu material dapat memiliki fungsional khusus (elektrik, optik, magnetik, dll). Metode sol gel memiliki keuntungan antara lain (Abdullah et al, 2008) :

1. Mudah dalam kontrol komposisi (kehomogenan komposisi kimia baik)
2. Temperatur proses rendah
3. Biaya murah.

2.4.1 Proses Sol-Gel

Prekursor yang digunakan dalam sintesis sampel adalah alkoksida logam dan klorida logam, yang mengalami reaksi hidrolisis dan reaksi polikondensasi untuk membentuk koloid. Prekursor dapat disimpan pada substrat agar terbentuk film (seperti melalui *dip-coating* atau *spin-coating*). Untuk menghasilkan *fiber*, membran, aerogel, serta bubuk butiran mikro atau nano precursor dimasukkan kedalam suatu *container* (Paveena et al, 2010).



Gambar 2.12 Skema umum pembuatan sol-gel

2.4.2 Reaksi Sol-Gel

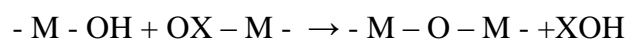
Terdapat dua tahapan reaksi dalam pembuatan metaloksida melalui proses sol-gel, yaitu hidrolisis dan polikondensasi seperti tertera pada persamaan 2.14 dan 2.15.

1. Hidrolisis metal alkoksida



(2.14)

2. Kondensasi



(2.15)

2.4.3 Parameter Sol-Gel

Menurut Abdullah (2008), polimerisasi sol-gel terjadi dalam tiga tahap:

1. Polimersasi monomer-monomer membentuk partikel
2. Penumbuhan partikel
3. Pengikatan partikel membentuk rantai kemudian mengental menjadi suatu gel.

Tabel 2.2 Parameter sintesis metode sol-gel

No.	Tahapan Proses	Tujuan Proses	Parameter Proses
1.	Larutan Kimia	Membentuk gel	Tipe prekursor, tipe pelarut, temperatur, dan pH
2.	<i>Aging</i>	Mendiamkan gel untuk mengubah sifat	Waktu, komposisi cairan, suhu, dan lingkungan
3.	Pengeringan	Menghilangkan air dari gel	Metode pengeringan, suhu, dan waktu
4.	Kalsinasi	Mengubah sifat-sifat fisik/kimia padatan, sering menghasilkan kristalisasi dan densifikasi	Temperatur, waktu, dan gas (<i>inert</i> atau reaktif)

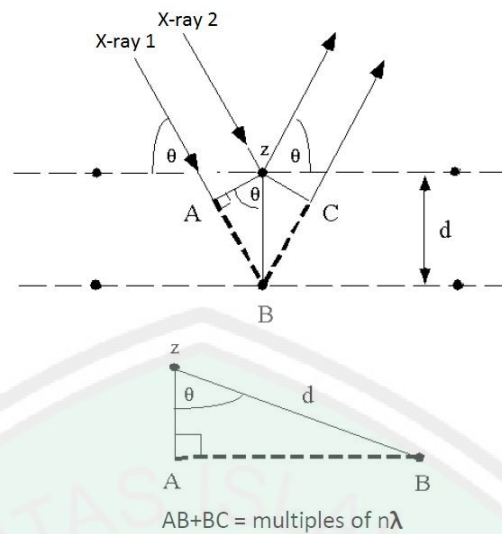
2.5 X-Ray Diffraction (XRD)

Difraksi sinar-X merupakan metode untuk menerangkan parameter kisi, jenis struktur, susunan atom yang berbeda pada kristal, adanya ketidaksempurnaan pada kristal, orientasi butir-butir dan ukuran butir sinar-X (Smallman and Bishop, 1991). Hamburan sinar-X dihasilkan jika suatu elektroda logam ditembakkan dengan elektron-elektron dengan kecepatan tinggi dalam tabung vakum. Suatu kristal dapat digunakan untuk mendifraksi berkas sinar-X dikarenakan orde dari panjang gelombang sinar-X hampir sama atau lebih kecil dengan orde jarak antar atom dalam suatu kristal (Waseda et al, 2011).

Sinar datang yang menumbuk pada titik bidang pertama dan dihamburkan oleh atom z. sinar datang yang kedua menumbuk bidang berikutnya dan dihamburkan oleh atom B. sinar ini menempuh jarak $AB + BC$ apabila kedua sinar tersebut parallel dan satu fasa (saling menguatkan). Jarak ini merupakan kelipatan (n) panjang gelombang sehingga persamaan menjadi (B.D. Cullity, 1978):

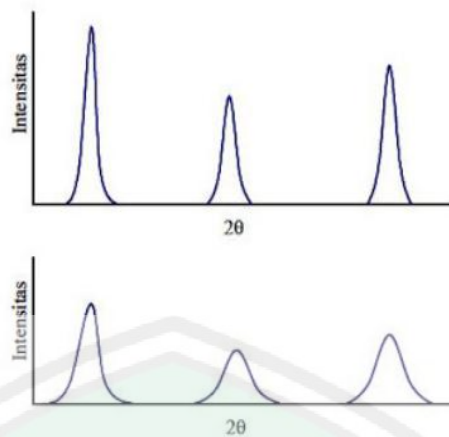
$$\begin{aligned}
 n\lambda &= AB + BC \\
 AB &= BC \\
 n\lambda &= 2AB \\
 \sin \theta &= \frac{AB}{d} \\
 AB &= d \sin \theta \\
 n\lambda &= 2d \sin \theta \\
 n\lambda &= 2d_{hkl} \sin \theta \qquad (2.16)
 \end{aligned}$$

Persamaan diatas dikenal juga dengan Hukum Bragg, dimana berdasarkan persamaan diatas maka dapat diketahui panjang gelombang sinar X (λ) dan sudut datang pada bidang kisi (θ) sehingga jarak antara dua bidang planar kristal (d_{hkl}) dapat diestimasi. Dari metode difraksi dapat diketahui secara langsung mengenai jarak rata-rata antar bidang atom dan dapat ditentukan orientasi dari kristal tunggal. Hamburan sinar X yang terbentuk dapat dijelaskan pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Interferensi *x-ray diffraction* (XRD) (B.D. Cullity, 1978)

Metode yang sering digunakan untuk menganalisis struktur kristal adalah metode *Scherrer*. Ukuran kristalin ditentukan berdasarkan pelebaran puncak difraksi sinar-X yang muncul. Untuk partikel berukuran nanometer, biasanya satu partikel hanya mengandung satu kristalitas. Berdasarkan metode ini, makin kecil ukuran kristalitas maka makin lebar puncak difraksi yang dihasilkan seperti diilustrasikan pada gambar 2.14. Kristal yang berukuran besar dengan satu orientasi menghasilkan puncak difraksi yang mendekati sebuah garis vertikal. Kristalitas yang sangat kecil menghasilkan puncak difraksi yang sangat lebar (Fultz dan Howe, 2013).



Gambar 2.14 Puncak XRD yang terbentuk (Fultz dan Howe, 2013)

Hubungan antara ukuran kristalinitas dengan lebar puncak dapat diaproksimasi dengan persamaan *Debye Schereer* (Waseda et al, 2011) :

$$D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \quad (2.17)$$

Dalam hal ini D adalah ukuran kristal (\AA), λ adalah panjang gelombang yang digunakan dalam uji XRD yaitu 1.54056 \AA , B adalah lebar setengah puncak (FWHM) dalam radian, θ adalah posisi sudut terbentuknya puncak. Untuk memperoleh hasil estimasi ukuran kristal lebih akurat, maka nilai dikoreksi oleh *Instrumental Line Broadening* berdasarkan persamaan berikut :

$$B = \sqrt{FWHM_s - FWHM_{std}} \quad (2.18)$$

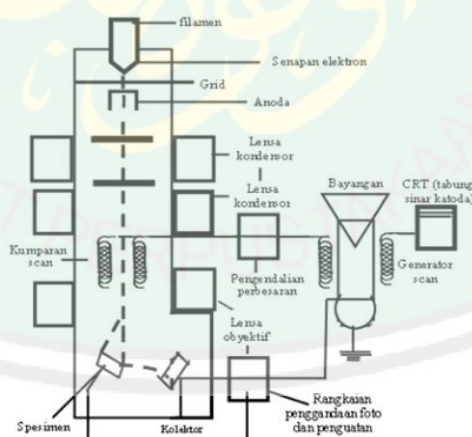
dimana $FWHM_{sample}$ adalah lebar puncak difraksi pada setengah puncak maksimum dari sampel benda uji dan $FWHM_{standard}$ adalah lebar puncak difraksi material standart yang sangat besar puncaknya berada disekitar lokasi puncak sampel yang akan dihitung.

2.6 Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan suatu bahan diantaranya dimanfaatkan untuk melihat struktur topografi permukaan, ukuran

butir, cacat struktural, dan komposisi pencemaran suatu bahan. Hasil yang diperoleh berupa gambar bentuk tiga dimensi *scanning electron macrograph*. Ada beberapa sinyal penting yang dihasilkan oleh SEM. Dari pantulan inelastis didapatkan sinyal elektron sekunder dan karakteristik sinar-X sedangkan dari pantulan elastis didapatkan sinyal *backscattered electron* (Goldstein et al, 2007).

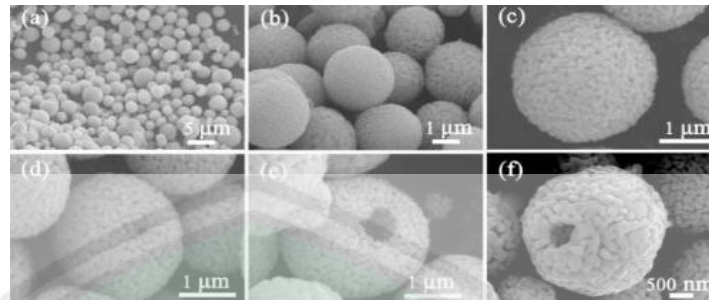
Prinsip kerja SEM adalah berkas elektron dipancarkan oleh sumber elektron dari filamen yang terbuat dari tungsten. Jika elektron tersebut berinteraksi dengan bahan (spesimen) maka akan dihasilkan elektron sekunder dan sinar-X karakteristik. Scanning pada permukaan bahan dapat dilakukan dengan mengatur *scanning generator* dan *scanning coils*. Elektron sekunder hasil interaksi antara elektron dengan permukaan spesimen ditangkap oleh detektor SE (*Secondary Electron*) yang selanjutnya diperkuat oleh amplifier dan divisualisasikan dalam monitor sinar katoda (CRT). Skema dasar SEM disajikan pada Gambar 2.11 (Smallman and Bishop, 1999):



Gambar 2.15 Skema dasar SEM. (Smallman and Bishop, 1999)

Morfologi sampel yang teramati berbeda dibandingkan dengan sampel Mn_2O_3 murni (Gambar 2.15). Mikrosfer Cu-doped lebih seragam dalam distribusi ukuran

dengan perbesaran tertinggi daripada sampel murni. Berikut disajikan skema yang dapat diamati dari karakterisasi SEM (Hashem et al, 2018) :



Gambar 2.16 SEM sampel Cu-doped Mn_2O_3 hollow microsphere (Hashem et al, 2018)



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk jenis eksperimen untuk membuat material elektroda baterai menggunakan mangan dioksida (MnO_2) dengan material pendoping tembaga (Cu), yang divariasikan konsentrasi doping tersebut. Selanjutnya, dilakukan karakterisasi dengan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Spectroscopy Electron Microscopy* (SEM), dan uji sifat listrik (RCL Meter).

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan mulai bulan Maret 2019 di Laboratorium Kimia dan Laboratorium Riset Material Jurusan Fisika Universitas Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Penelitian ini dilakukan mulai dari preparasi sampel sampai dengan karakterisasinya.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. *Beaker glass*
2. Gelas ukur
3. Neraca digital
4. Spatula
5. *Magnetic stirrer*
6. *Oven*
7. Pipet tetes

8. Tabung reaksi
9. Vial
10. Cawan petri
11. Mortal dan alu
12. Saringan keramik
13. *Hot plate*

3.3.2 Bahan Penelitian

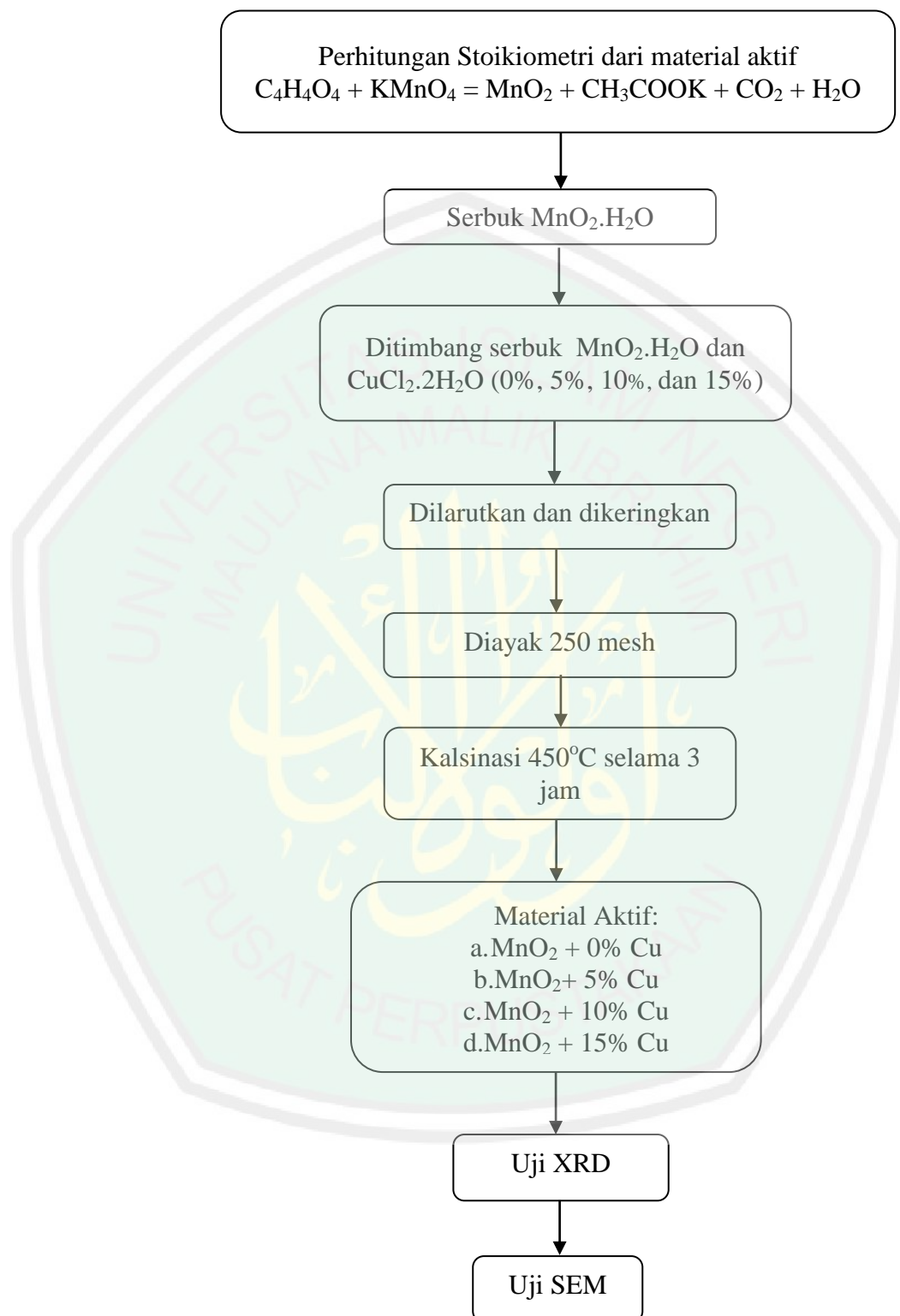
Bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Nanopartikel Tembaga Klorida (CuCl_2) *Pure Analysis* dari Merck Chemical.
2. Kalium Permanganate (KMnO_4) *Pure Analysis* dari Merck Chemical.
3. Fumaric Acid ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$) Merck Chemical.
4. Bahan pendukung lain yaitu aquades. *Spectroscopy* (EIS).

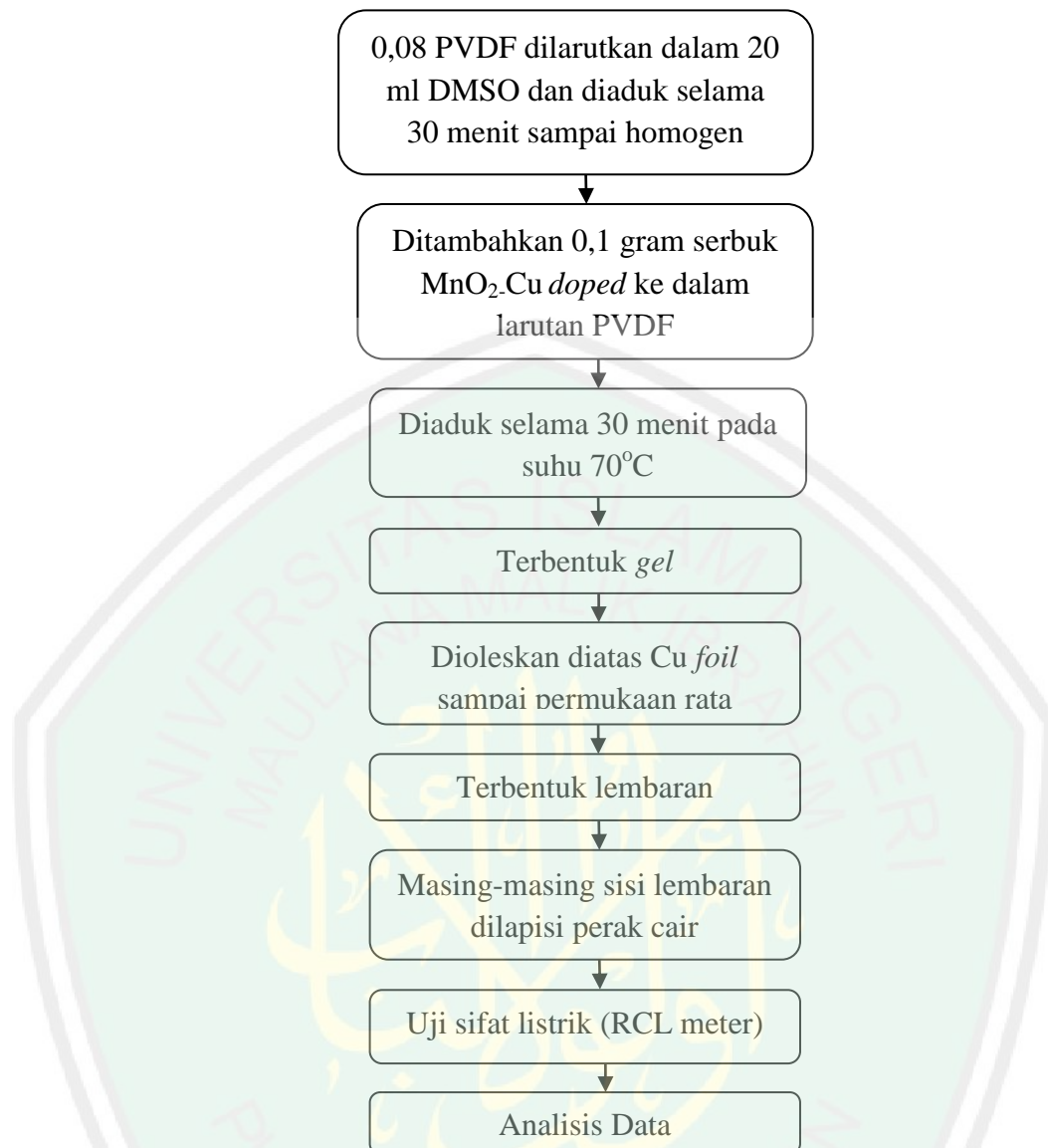
3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian dalam pembuatan elektroda Cu *doped* MnO_2 ini adalah variasi konsentrasi *dopant* Cu sebanyak 0%, 5%, 10%, dan 15% dengan suhu kalsinasi $450\text{ }^\circ\text{C}$ selama 3 jam. Komposisi pembuatan *slurry* menggunakan persentase 80% material aktif, dan 20% PVDF.

3.5 Prosedur Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan serbuk material aktif



Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan lembaran Cu doped MnO₂

3.5.1 Sintesis MnO₂ Tanpa Doping Cu²⁺

1. 3.16 gram kalium permanganate (KMnO₄) dilarutkan ke dalam 200ml aquades selama 15 menit dan diaduk dengan kecepatan 250 rpm.
2. 0.78 gram asam fumarat (C₄H₄O₄) dimasukkan ke dalam larutan KMnO₄. Kemudian diaduk selama 30 menit pada suhu ruang.
3. Larutan kalium permanganat (KMnO₄) dan asam fumarat (C₄H₄O₄) diendapkan selama 1 jam.

4. Setelah itu disaring dan dicuci berulang kali menggunakan aquades 400 ml sebanyak 4 kali selama 1 jam.
5. Sampel dioven sampai sampai kering pada suhu 100°C .
6. Kemudian sampel dikalsinasi pada suhu 450°C selama 3 jam.
7. Setelah sampel dikalsinasi kemudian digerus menggunakan mortar dan alu.
8. Masing-masing ampel dibilas dengan HCl 60 ml.
9. Sampel dioven sampai kering pada suhu 100°C .

3.5.2 Sintesis MnO_2 dengan Penambahan Doping Cu^{2+}

1. 3.002 gram KMnO_4 (untuk konsentrasi 5% mol CuCl_2) dilarutkan ke dalam 200 ml aquades selama 15 menit dan diaduk dengan kecepatan 250 rpm.
2. 0.2762 gram CuCl_2 ditambahkan ke dalam larutan KMnO_4 selama 15 menit.
3. 0.78 gram asam fumarid ditambahkan ke dalam larutan KMnO_4 dan CuCl_2 selama 30 menit.
4. Kemudian larutan tersebut diendapkan selama 1 jam.
5. Setelah itu disaring dan dicuci dengan aquades 400 ml sebanyak 4 kali.
6. Sampel dioven sampai kering pada suhu 100°C .
7. Kemudian sampel dikalsinasi pada suhu 450°C selama 3 jam.
8. Setelah sampel dikalsinasi kemudian digerus menggunakan mortar dan alu.
9. Masing-masing sampel dibilas dengan HCl 60 ml.
10. Sampel dioven sampai kering pada suhu 100°C .

3.5.3 Pembuatan Lembaran Cu *doped* MnO₂

1. 0.08 gram *Polyvinylidene chloride* (PVDF) dilarutkan kedalam larutan Dimetil sulfoksida (DMSO).
2. Kemudian campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit hingga butiran *Polyvinylidene chloride* (PVDF) larut.
3. Selanjutnya, ditambahkan sedikit demi sedikit serbuk MnO₂-Cu *doped* kedalam larutan agar tidak terjadi penggumpalan.
4. Setelah 30 menit pengadukan, gel yang terbentuk dioleskan keatas lempengan Cu *foil* hingga permukaannya rata.
5. Sisi lembaran yang sudah terbentuk diolesi dengan perak cair kemudian dikeringkan.

3.5.4 Karakterisasi Material

1. Sampel yang dibuat diuji material dengan X-Ray Diffraction (XRD, Rigaku) untuk diidentifikasi struktur kristal MnO₂.
2. Hasil sintesis MnO₂ yang dibuat diuji menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk diamati morfologi dan ukuran butir dari bahan.
3. Uji Sifat Listrik menggunakan alat LCR Meter untuk mendapatkan nilai kapasitansi, konduktansi, dan permitivitas dari sampel dan dikeringkan.

3.6 Teknik Pengumpulan Data

Data yang dihasilkan pada uji sifat listrik disajikan dalam tabel 3.1. Pengujian dilakukan pengulangan 2x dengan masing-masing variasi konsentrasi dopan 2 sampel untuk mendapatkan plot grafik yang baik.

Tabel 3.1 Data keluaran uji RCL Meter material MnO₂

Konsentrasi Cu ²⁺	F (Hz)	Cp (F)	Rp (ohm)	D	θ
0% Cu					
5% Cu					
10% Cu					
15% Cu					

Selanjutnya dari data yang diperoleh dilakukan perhitungan nilai konduktansi, kapasitansi, dan nilai permitivitas masing-masing sampel.

3.7 Analisis Data

Analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif dianalisis menggunakan identifikasi morfologi sampel yang dihasilkan. Sementara data kuantitatif dianalisis dengan menggunakan beberapa perangkat lunak seperti Microsoft Excel untuk perhitungan dielektrisitas, Microsoft Origin untuk penampilan semua grafik hasil analisis data dan perhitungan ukuran butir, *Software Match* dan *Rietica* untuk mengidentifikasi struktur kristal yang terbentuk pada masing-masing sampel uji. Selain itu, data kuantitatif juga dianalisis menggunakan beberapa persamaan matematis seperti *Debye Schereer* ($D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta}$) untuk mengetahui ukuran kristal setiap sampel.

Setelah dilakukan uji karakterisasi XRD, maka material *metal oxide* yang dibuat dapat diketahui pola difraksinya. Pada pola difraksi XRD, fase yang terbentuk merupakan gabungan antara fase MnO₂ dan pendoping (Cu). Sehingga akan terlihat puncak-puncak tertinggi pada pola difraksi *metal oxide*. Sedangkan untuk mengetahui struktur morfologi dari sampel material *metal oxide* tersebut, dapat menggunakan uji karakterisasi SEM. Pada masing-masing sampel dengan variasi komposisi dilakukan pengamatan ukuran diameternya sehingga dapat

dilihat bagaimana kaitannya variasi komposisi dengan pengecilan/perbesaran ukuran diameter sampel. Diharapkan pengecilan diameter pada tiap partikel akan berpengaruh pada luas permukaan yang semakin besar dan kinerja *electricity*.

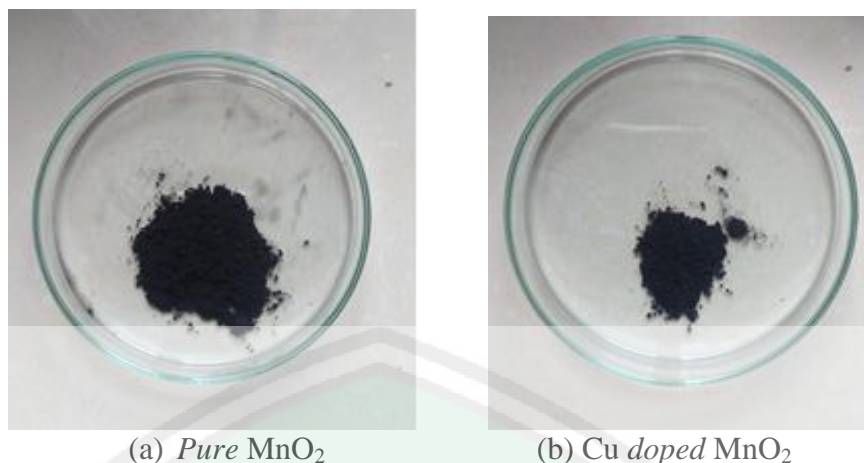


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Sintesis MnO_2 menggunakan material KMnO_4 , $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$, dan $\text{CuCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Metode yang digunakan yaitu sol-gel dengan variasi konsentrasi doping sebesar 5%, 10%, dan 15% mol. Tahap pertama yang dilakukan yaitu KMnO_4 dicampur dengan aquades menggunakan alat *magnetic stirrer*. Perbandingan mol antara KMnO_4 yang dilarutkan dalam 200 ml aquades dan $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$ sebesar 3:1. Pada proses pendopingan ditambahkan sedikit demi sedikit $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$ ke dalam larutan dan diaduk selama 15 menit. Selanjutnya, ditambahkan 0.2762 gram CuCl_2 (5% mol) ke dalam larutan. Tahapan ini diulangi untuk *dopant* dengan konsentrasi 10% dan 15% mol. Tahap kedua yaitu pengendapan campuran larutan selama 1 jam. Kemudian serbuk dicuci berulang kali menggunakan aquades 400 mL dan dikeringkan.

Proses pengeringan dilakukan untuk menghilangkan air yang tersisa setelah pencucian pada temperatur 100°C . Setelah pengeringan, dilakukan proses kalsinasi pada suhu 450°C selama 3 jam untuk mengeliminasi gugus (H) yang masih terkandung dalam MnO_2 dan meningkatkan kristalinitasnya. Menurut Bulushev dkk (2000), reaksi antara mangan dan tembaga terjadi pada suhu optimum 450°C . Suhu diatas 500°C dapat mengakibatkan perubahan dari fase alfa ke *amorf*, disebabkan penggabungan kation-kation tembaga ke dalam struktur kristal mangan. Hasil sintesis Cu- MnO_2 ditunjukkan pada gambar 4.1



Gambar 4.1 Hasil sintesis MnO₂

Berdasarkan pengamatan fisis ketiga sampel memiliki bentuk serbuk dan berwarna hitam kecoklatan. Hal ini sesuai dengan MSDS (*Material Safety Data Sheet*) MnO₂ yaitu memiliki warna hitam kecoklatan. Setelah proses kalsinasi, dilakukan uji XRD (*X-ray Diffraction*) untuk mengetahui fasa yang terbentuk maupun struktur kristal dan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) untuk mengetahui morfologi dari material MnO₂.

4.1.1. Pembuatan lembaran *Cu doped MnO₂*

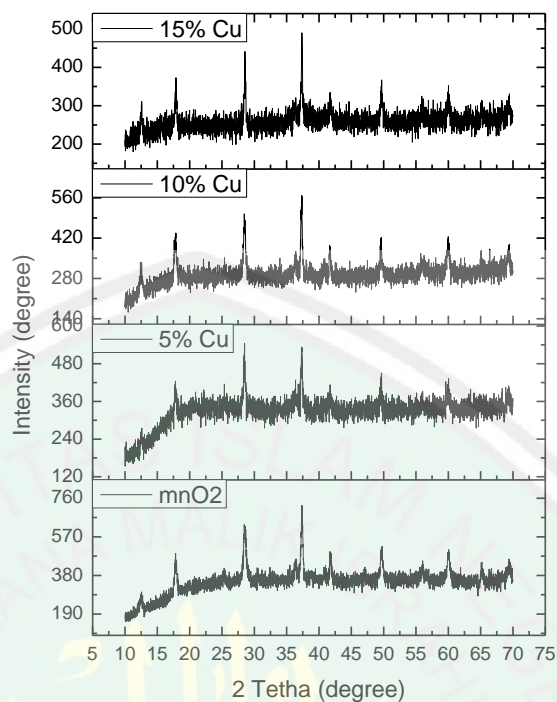
Pembuatan *slurry* terdiri dari material aktif, dan PVDF dengan pelarut DMSO. Persentase bahan yang digunakan adalah 80% material aktif dan 20% PVDF dari berat total 1 gram material aktif. Pembuatan *slurry* dimulai dengan menuangkan larutan DMSO sebanyak 2 ml ke dalam *beaker glass*, kemudian dipanaskan menggunakan hot plate dengan suhu 70 °C/250 rpm. Setelah 15 menit, PVDF ditambahkan ke dalam beaker glass sedikit demi sedikit hingga habis. Perlakuan ini bertujuan agar PVDF larut terlebih dahulu dengan DMSO. Setelah 30 menit, *slurry* tampak mengental sehingga perlu ditambahkan 1 ml DMSO. Lalu material aktif ditambahkan sedikit demi sedikit agar *slurry* yang dihasilkan dapat homogen. Setelah itu ditunggu selama 1,5 jam hingga *slurry*

homogen. Proses selanjutnya yaitu pelapisan *slurry* dengan ketebalan basah pada lembaran Cu-foil. Kemudian lembaran anoda dikeringkan pada suhu ruang. Lembaran anoda yang telah kering, diolesi dengan perak cair dan dipotong (*cutting*) untuk dilakukan pengujian sifat listrik.

4.1.2 Hasil Karakterisasi Struktur Kristal (XRD)

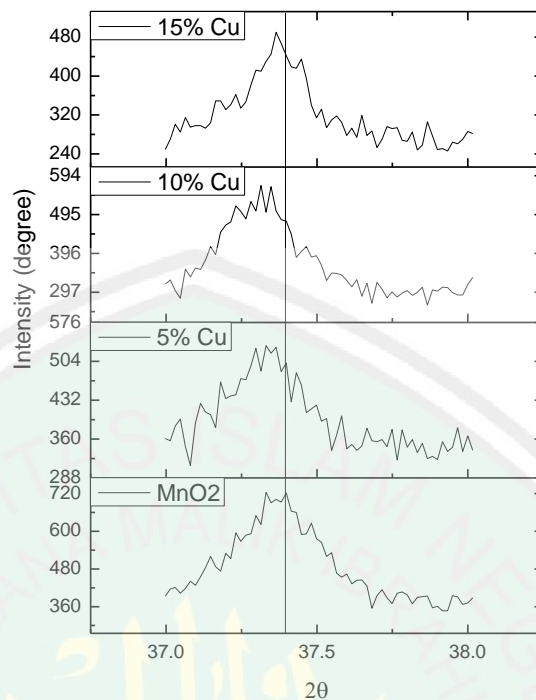
Karakterisasi struktur kristal dan fasa yang terbentuk dilakukan dengan menggunakan instrument Difraktometer Sinar-X (XRD, Rigaku) di Laboratorium Teknik Material, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya. Sinar yang digunakan bersumber dari Cu-K α 1.54060 Å dengan *range* sudut $2\theta = 5^\circ$ - 60° . Sudut difraksi yang terukur diplot dalam sumbu x dan intensitas puncak dalam sumbu y.

Hasil XRD dilakukan dengan menggunakan *software Match* untuk mencocokkan difaktogram MnO₂ dengan (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*) JCPDS:29-1020. Perbandingan MnO₂ dengan difaktogram JCPDS ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pola XRD pada serbuk 0, 5, 10, dan 15 (% mol) Cu-MnO₂.

Pola difraksi pada gambar 4.2 menunjukkan puncak difraksi pada 2θ sekitar 12° , 17° , 28° , 37° , 41° , 49° , 55° , dan 59° . Dari beberapa puncak yang diperoleh, terdapat 3 puncak utama pada sudut 2θ sekitar 17° , 28° , dan 37° . Sampel Cu²⁺ doped MnO₂ dari konsentrasi dopan 0 mol persen hingga 15 mol persen telah sesuai dengan *database* JCPDS: 29-1020 sebagai acuan dalam sintesis α -MnO₂. Struktur kristal yang terbentuk yaitu tetragonal dengan space group P1/4M. Jika ditinjau dari pergeseran puncak difraksi, penambahan dopan tembaga (Cu²⁺) mengakibatkan posisi *peak* pada sudut 2θ berubah. Secara umum, pergeseran posisi *peak* MnO₂ memiliki pola yang sama, yaitu bergeser ke arah kiri (penurunan sudut 2θ). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pola pergeseran 2θ puncak utama α - MnO_2

Gambar 4.3 menunjukkan pola pergeseran 2θ sekitar 37° pada MnO_2 . Pergeseran 2θ pada sampel tidak terlalu besar, akan tetapi intensitas yang terbentuk mengalami penurunan pada berbagai variasi penambahan dopan. Adanya pergeseran puncak-puncak α - MnO_2 mengindikasikan bahwa telah terjadi perubahan pada parameter kisi sampel. Untuk dapat mengetahui dan melakukan diskusi lebih lanjut mengenai parameter kisi dari semua sampel variasi konsentrasi dopan, dilakukan analisa dengan metode analisis *Rietveld* menggunakan *software* Rietica.

Analisis *rietveld* adalah suatu metode pencocokan antara kurva teoritis dengan kurva eksperimen sampai terdapat kesesuaian antara kedua kurva secara keseluruhan. Pada sampel MnO_2 ini, urutan penghalusannya dimulai dari parameter kisi, faktor skala, dan *background*. Ketiga parameter ini berpengaruh

pada proses penghalusan. Ketika *codework* parameter dicentang pada proses penghalusan, maka terjadi penurunan yang besar pada nilai GOF dan indikator R. Penghalusan dilanjutkan pada *illumination*, koefisien puncak FWHM (u,v,w), dan *preferred orientation* untuk mendapatkan hasil yang maksimal.

Dari penghalusan yang telah dilakukan, didapatkan nilai parameter kisi dan nilai realibilitas sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.1.

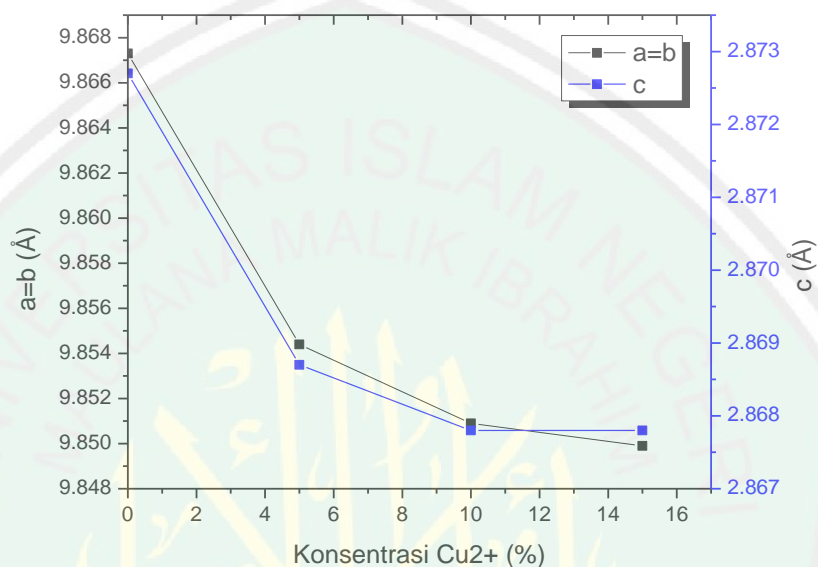
Tabel 4.1 Nilai Parameter Kisi Cu *doped* MnO₂

Sampel	Parameter Kisi (Å)				Nilai Realibilitas				
	a=b	c	c/a	Volum Sel (Å ³)	R _p (Profile)	R _{wp} (Weight Profile)	R _b (Bragg)	R _{exp} (expected profile)	GoF (Good of Fit)
JCPDS	9.8766	2.8753	0.29112	-	-	-	-	-	-
MnO ₂	9.8673	2.8727	0.29113	279.25	6.08	8.00	6.62	5.54	2.24
5%Cu	9.8544	2.8687	0.29111	278.58	5.47	7.07	5.75	5.50	1.64
10%Cu	9.8509	2.8678	0.29112	278.30	5.93	7.63	6.19	5.82	1.71
15%Cu	9.8499	2.8669	0.29106	278.24	5.69	7.26	2.97	6.20	1.37

Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan parameter kristal MnO₂ untuk setiap sampel. Parameter kisi merupakan jarak antara sel unit dalam segala arah yang ada pada sampel. Pada MnO₂ memiliki ukuran a dan b lebih besar dibandingkan spesimen lainnya. Hal ini berarti terjadi sedikit pelebaran ukuran dari a ke b. Nilai tetragonalitas (c/a) untuk kristal tetragonal bernilai kurang dari 1 karena c < a.

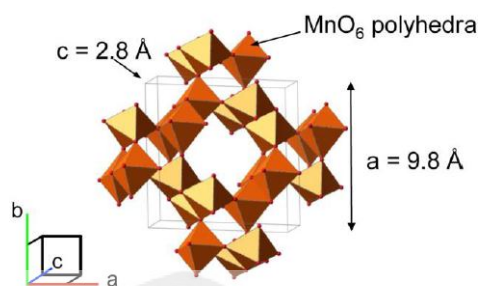
Sistem kristal yang terbentuk pada masing-masing sampel adalah tetragonal dengan parameter kisi $\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$, sedangkan nilai a, b, dan c pada masing-masing sampel mengalami penurunan. Dapat dilihat pada tabel 4.1 dan gambar 4.5 fasa setiap sampel berbentuk alfa MnO₂ dengan konstanta kisi $a = b = 9.8 \text{ \AA}$ dan $c = 2.8 \text{ \AA}$.

Pengaruh konsentrasi atom *dopant* terhadap parameter kisi yang terbentuk pada sampel Cu *doped* MnO₂ ditunjukkan oleh gambar 4.4. Pada tabel tersebut, dapat diketahui baik panjang kisi a maupun c menurun secara linear seiring bertambahnya konsentrasi atom *dopant*.



Gambar 4.4 Grafik perubahan parameter kisi hasil analisis *rietveld*.

Berdasarkan gambar 4.4 dapat dilihat bahwa sampel α -MnO₂ tanpa *dopant* memiliki panjang kisi a (9.8673 Å) yang lebih besar daripada panjang kisi sampel dengan penambahan berbagai variasi atom *dopant*. Panjang kisi c α -MnO₂ juga lebih besar (2.8727 Å) dibandingkan panjang kisi c sampel lainnya. Selain kedua panjang kisi dari struktur tetragonal tersebut, bertambahnya konsentrasi *dopant* juga menyebabkan penurunan volume unit sel dari masing-masing sampel.



Gambar 4.5 Struktur tetragonal ($I4/m$); MnO_6 octahedral ditampilkan bersama dengan sumbu a dan c.

Selain beberapa pembahasan di atas, untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi doping terhadap ukuran kristal, dilakukan perhitungan menggunakan persamaan *Debye Schreer* sesuai dengan persamaan 4.1

$$D = \frac{0,9\lambda}{B \cos \theta} \quad (4.1)$$

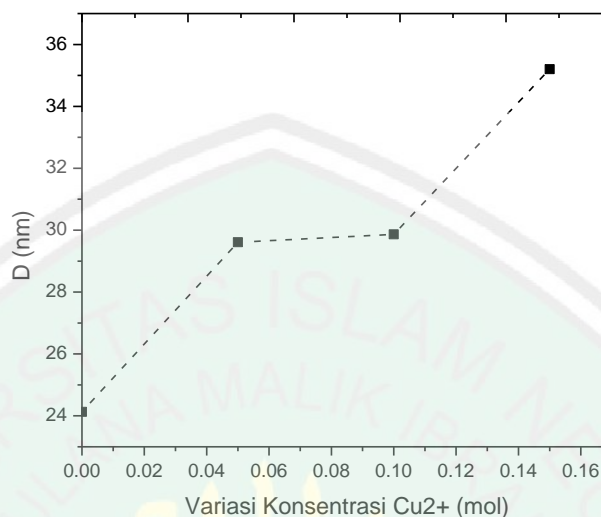
dimana D adalah ukuran kristal (\AA), λ adalah panjang gelombang yang digunakan dalam uji XRD yaitu 1.54056 \AA , B adalah lebar setengah puncak (FWHM) dalam radian, θ adalah posisi sudut terbentuknya puncak. Untuk perhitungan mengambil puncak tertinggi dan hasil perhitungan ukuran kristal ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.2 Ukuran kristal MnO_2 dan 5%, 10%, dan 15% Cu- MnO_2

Sampel	θ ($^\circ$)	FWHM ($^\circ$)	0.9λ	B (rad)	$\cos \theta$	D (nm)
MnO_2	37.3986	0.34467	1.386504	0.0060156	0.95518	24.12998
5% Cu	37.3604	0.28446	1.386504	0.0049648	0.94318	29.60907
10% Cu	37.3328	0.28489	1.386504	0.0049723	0.93365	29.86618
15% Cu	37.3676	0.23867	1.386504	0.0041656	0.94555	35.20133

Berdasarkan tabel 4.2 nilai ukuran kristal berbanding terbalik dengan *FWHM* (*Full Width at Half Maximum*) yang terdapat pada puncak-puncak difraksi. Semakin lebar *FWHM* yang dihasilkan maka semakin kecil ukuran

kristal yang didapat. Nilai ukuran kristal yang diperoleh kemudian dibuat grafik perbandingan yang dapat dilihat pada gambar 4.3.



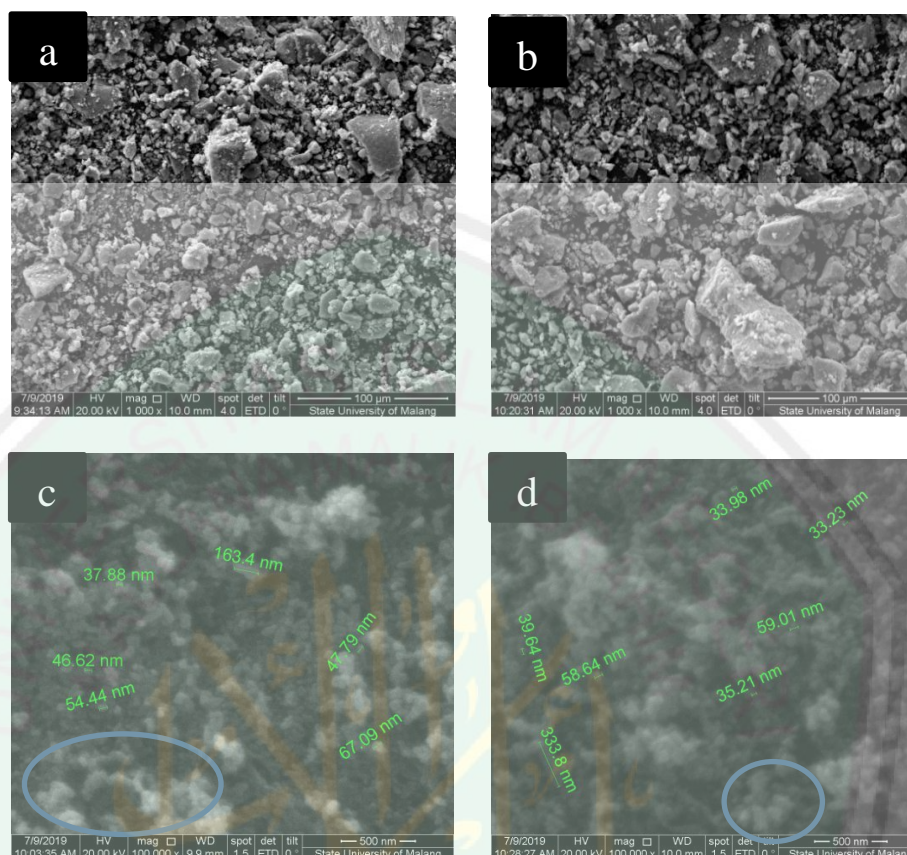
Gambar 4.6 Nilai ukuran kristal MnO₂ dan Cu-MnO₂

Gambar 4.6 menunjukkan hasil perhitungan ukuran kristal. Nilai ukuran kristal berkisar antara 24-35 nm pada masing-masing sampel. Pola dari ukuran kristal yang didapatkan pada penelitian ini sama dengan pola yang didapatkan oleh Awaluddin et al (2018), yaitu semakin besar konsentrasi *dopant* Cu maka ukuran kristal yang dihasilkan juga semakin besar.

4.1.3 Hasil Karakterisasi Morfologi (SEM)

Karakterisasi ini dilakukan menggunakan alat *Scanning Electron Microscopy* (SEM, FEI type: *inspect-850*) di Universitas Negeri Malang. Sampel yang dipilih untuk diuji adalah sampel MnO₂ dan 0.10 mol Cu-MnO₂ dikarenakan pada sampel 0.10 mol Cu-MnO₂ memiliki puncak yang paling tinggi (keteraturan atom-atomnya lebih baik) diantara sampel-sampel doping lainnya. Hasil SEM memberikan informasi perbedaan morfologi MnO₂ dan 0.10

mol Cu-MnO₂. Masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.5 (a,b) dan gambar 4.5 (c,d).



Gambar 4.7 Hasil SEM MnO₂ (a) MnO₂ perbesaran 1000x (b) 10% Cu-MnO₂ perbesaran 1000x (c) MnO₂ perbesaran 100000x (d) 10% Cu-MnO₂ perbesaran 100000x.

Hasil karakterisasi SEM pada 4.5 (a,b) menunjukkan bahwa kristal MnO₂ dan Cu-MnO₂ sudah terbentuk. Kristal yang terbentuk ditandai dengan munculnya butiran-butiran (*grain*) berbentuk bongkahan kecil. Sampel MnO₂ masih mengalami aglomerasi, namun aglomerasi semakin berkurang ketika diberi penambahan *dopant* sebesar 10% (Gambar 4.5 (c,d)). Rentang rata-rata ukuran butir yang dihasilkan oleh sampel adalah 30-50 nm.

4.1.4 Hasil Uji Sifat Listrik

Karakterisasi sifat listrik dilakukan menggunakan HIOKI 3532-50 LCR *Hitester*. Pengujian RCL Meter dilakukan untuk mengetahui perilaku permitivitas pada sampel. Output hasil pengukuran ini berupa Resistansi (R), Disipasi (D), dan Kapasitansi (C) dengan pengaruh frekuensi dari rentang 500Hz-5MHz pada tegangan 1.5 Volt.

Impedansi (Z) merupakan rasio dari tegangan yang melintasi elemen terhadap arus yang mengalir pada rangkaian. Pada keping kapasitor impedansi berperan sebagai perintang suatu medan listrik yang diberikan oleh keping. Impedansi pada rangkaian AC (bolak-balik) dipengaruhi oleh frekuensi dan resistansi (Kusnadi, 2007). Pada frekuensi yang sangat rendah reaktansi kapasitif menjadi lebih besar jadi impedansinya akan besar. Sama halnya dengan permitivitas, impedansi juga mempunyai dua bagian yaitu bagian riil dan imajiner.

Impedansi listrik dapat dihitung dengan memasukkan nilai resistansi (R_p) dan kapasitansi (C_p) kedalam persamaan:

$$Z_{riil} = \frac{R}{1+(R \omega C)^2} \quad (4.2)$$

Dan $Z_{imj} = \frac{R^2 \omega}{1+(R^2 \omega^2 C^2)}$ (4.3)

dengan, Z_{riil} : Impedansi riil

Z_{imj} : Impedansi imajiner

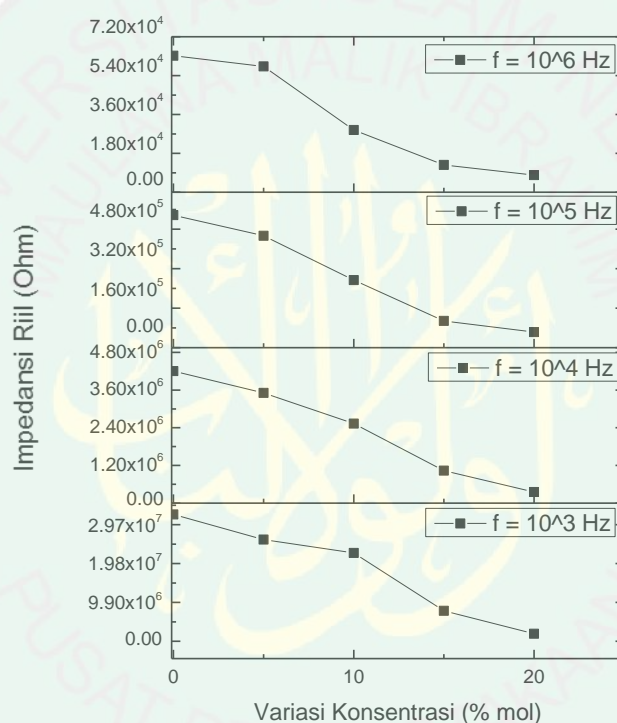
ω : Frekuensi sudut ($2 \pi f$)

Data perhitungan pengaruh konsentrasi *dopant* terhadap nilai impedansi riil dan imajiner ditunjukkan pada tabel 4.3 dan 4.4.

Tabel 4.3 Variasi konsentrasi dopant terhadap impedansi riil pada frekuensi rendah dan tinggi

Variasi Konsentrasi (%)	Frekuensi (Hz)			
	10^3	10^4	10^5	10^6
0	32.2966E6	4.20466E6	0.53684E6	0.06323E6
5	25.9198E6	3.50922E6	0.45364E6	0.05826E6
10	22.5156E6	2.53167E6	0.27374E6	0.02879E6
15	7.76933E6	1.03330E6	0.10850E6	0.01265E6
20	1.92120E6	0.35423E6	0.06276E6	0.00792E6

Dari tabel 4.3 kemudian dibuat plot grafik antara variasi konsentrasi *dopant* terhadap Z' difrekuensi rendah dan tinggi yang ditunjukkan pada gambar 4.8.



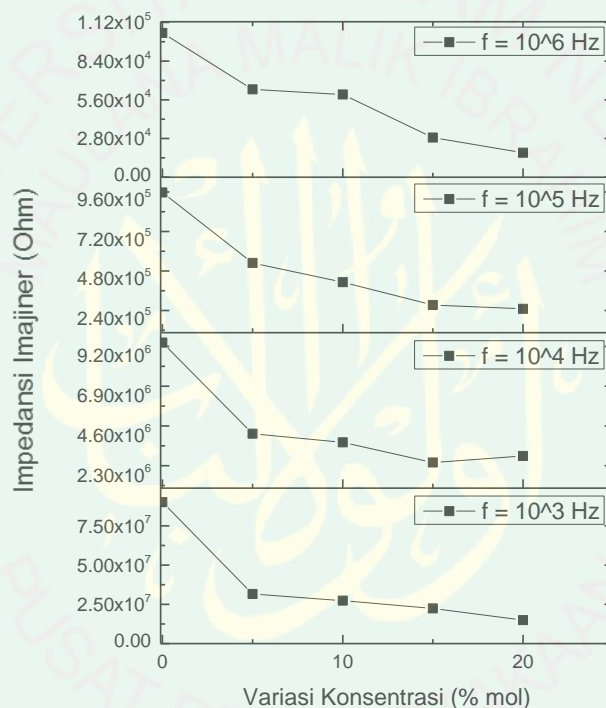
Gambar 4.8 Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai impedansi rill

Gambar 4.8 menunjukkan sampel dengan penambahan variasi konsentrasi *dopant* terjadi penurunan nilai impedansi riil. Sampel MnO_2 memiliki nilai impedansi riil paling tinggi yaitu sebesar 3.2296×10^7 Ohm.

Tabel 4.4 Variasi konsentrasi dopant terhadap impedansi imajiner pada frekuensi rendah dan tinggi

Variasi Konsentrasi (%)	Frekuensi (Hz)			
	10^3	10^4	10^5	10^6
0	90.0933E6	9.42343E6	0.95722E6	0.10434E6
5	31.5325E6	4.15040E6	0.52841E6	0.06355E6
10	27.3197E6	3.64858E6	0.41177E6	0.05984E6
15	22.4333E6	2.48148E6	0.27307E6	0.02865E6
20	14.9177E6	2.86002E6	0.24996E6	0.01768E6

Dari tabel 4.4 kemudian dibuat plot grafik antara variasi konsentrasi *dopant* terhadap Z'' difrekuensi rendah dan tinggi yang ditunjukkan pada gambar 4.9.

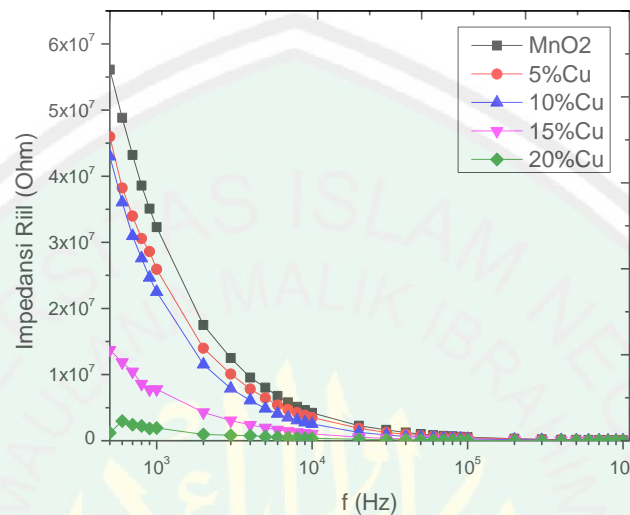


Gambar 4.9 Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai impedansi imajiner

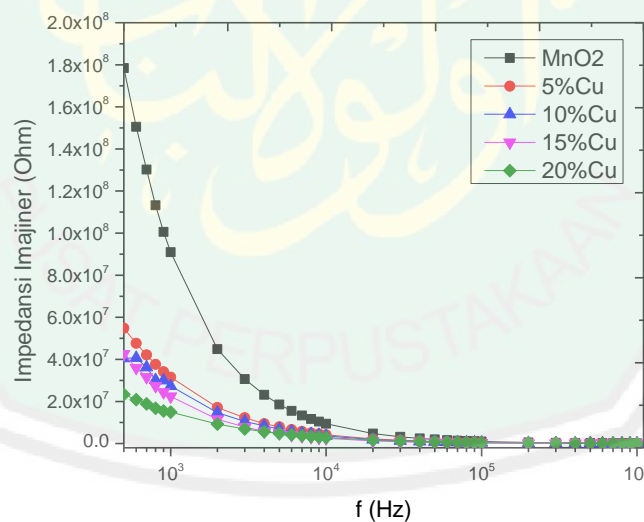
Gambar 4.9 menunjukkan sampel dengan penambahan variasi konsentrasi *dopant* terjadi penurunan nilai impedansi imajiner. Sampel MnO_2 memiliki nilai impedansi imajiner paling tinggi yaitu sebesar 9.0096×10^7 Ohm.

Sifat impedansi material terhadap fungsi frekuensi (*bode plot*) merupakan hal yang penting untuk diidentifikasi, karena sifat listrik biasanya digunakan

sebagai filter frekuensi rendah pada *ac hardware circuit*. Hasil perhitungan Z_{riil} dan Z_{imj} disajikan dalam bentuk plot grafik, masing-masing dapat dilihat pada gambar 4.10 dan 4.11.



Gambar 4.10 Plot Hasil Perhitungan Impedansi Riil (Z') Sampel



Gambar 4.11 Plot Hasil Perhitungan Impedansi Imajiner (Z'') Sampel

Nilai impedansi berbanding terbalik dengan nilai konduktivitas listrik bahan, semakin kecil nilai impedansi maka konduktivitas listrik bahan semakin besar. Gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan bahwa sampel dengan *dopant* 0.20

mol Cu memiliki Z_{riil} maupun Z_{imj} paling rendah dan sampel tanpa *dopant* memiliki Z_{riil} maupun Z_{imj} paling tinggi.

Konstanta dielektrik adalah rapatnya fluks elektrostatik dalam suatu bahan bila diberi potensial listrik. Sifat dielektrik material meliputi permitivitas riil (ϵ') dan permitivitas imajiner (ϵ''). Sifat ini dapat diketahui dengan pemberian medan listrik luar pada frekuensi tertentu sehingga menimbulkan adanya polarisasi.

Konstanta dielektrik dapat dihitung menggunakan persamaan 4.4:

$$\epsilon_r = \frac{C d}{\epsilon_0 A} \quad (4.4)$$

dengan C, d, A, ϵ_0 berturut-turut kapasitansi (F), tebal sampel (m), luas sampel (m^2), dan permitivitas ruang vakum (8.85×10^{-12} F/m). Permitivitas riil dapat dihitung menggunakan persamaan 4.5:

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_0 A} \quad (4.5)$$

Sedangkan nilai permitivitas imajiner dihitung menggunakan persamaan:

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot D \quad (4.6)$$

dengan D menyatakan besarnya daya yang hilang di dalam kapasitor (faktor disipasi).

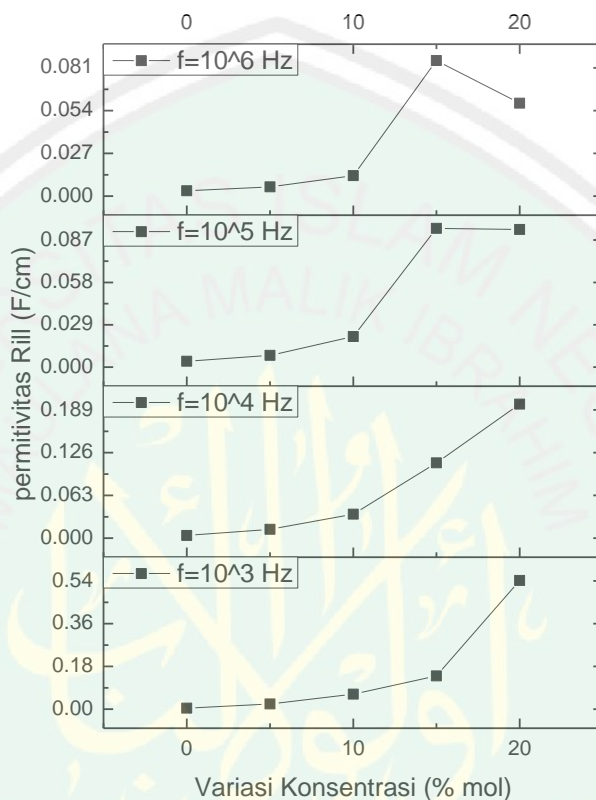
Permitivitas riil (ϵ') menunjukkan kemampuan bahan untuk menyimpan energi listrik. Data perhitungan nilai permitivitas riil ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Variasi konsentrasi dopant terhadap permitivitas riil pada frekuensi rendah dan tinggi

Variasi Konsentrasi (%)	Frekuensi (Hz)			
	10^3	10^4	10^5	10^6
0	0.00439	0.00412	0.00403	0.00339
5	0.02194	0.01311	0.00806	0.00585
10	0.06329	0.03538	0.02120	0.01296

15	0.14021	0.11103	0.09502	0.08566
20	0.54175	0.19762	0.09419	0.05875

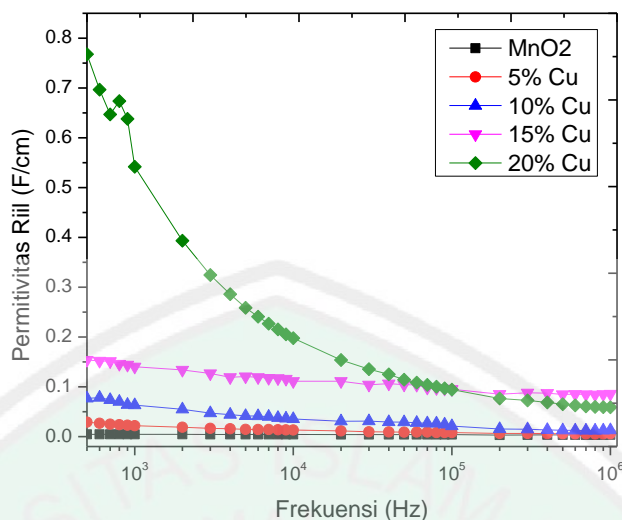
Dari tabel 4.5 kemudian dibuat plot grafik antara variasi konsentrasi *dopant* terhadap ϵ' difrekuensi rendah dan tinggi yang ditunjukkan pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai permitivitas rill

Berdasarkan gambar 4.12 dapat diketahui variasi konsentrasi *dopant* menyebabkan penurunan nilai permitivitas rill sampel. Pada frekuensi rendah, nilai optimum permitivitas rill sebesar 0.02386, sedangkan nilai optimum permitivitas rill pada frekuensi tinggi sebesar 0.00381.

Selain dipengaruhi oleh konsentrasi *dopant*, nilai permitivitas rill juga dipengaruhi oleh frekuensi. Plot grafik antara ϵ' terhadap frekuensi dapat mengidentifikasi polarisabilitas suatu bahan yang ditunjukkan pada gambar 4.13.



Gambar 4.13 Pengaruh frekuensi terhadap permitivitas riil

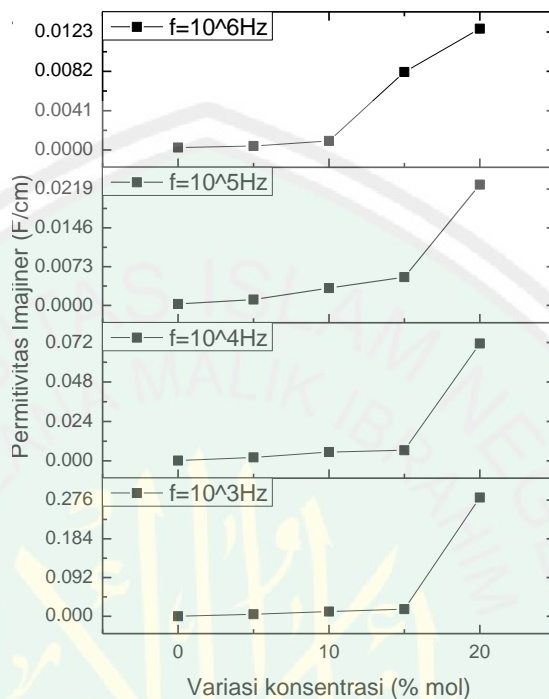
Gambar 4.13 menunjukkan penambahan variasi *dopant* meningkatkan nilai permitivitas riil sampel. Pada sampel MnO_2 maupun Cu-MnO_2 memiliki nilai permitivitas riil besar pada fekuensi rendah dan nilai permitivitas riil kecil pada frekuensi tinggi. Akan tetapi nilai permitivitas riil sampel dengan penambahan *dopant* 0.2 mol Cu menurun pada frekuensi tinggi.

Permittivitas imajiner ϵ'' menyatakan kemampuan bahan dielektrik untuk menghamburkan atau melepaskan energi. Nilai permitivitas imajiner selalu positif dan besarnya lebih kecil dari permitivitas riil. Data perhitungan nilai permitivitas imajiner ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Variasi konsentrasi *dopant* terhadap permitivitas imajiner pada frekuensi rendah dan tinggi

Variasi Konsentrasi (%)	Frekuensi (Hz)			
	10^3	10^4	10^5	10^6
0	0.00931	0.00154	0.00028	0.00025
5	0.00492	0.00212	0.00111	0.00048
10	0.01697	0.00540	0.00328	0.00095
15	0.01129	0.00646	0.00533	0.00814
20	0.28205	0.07137	0.02274	0.01265

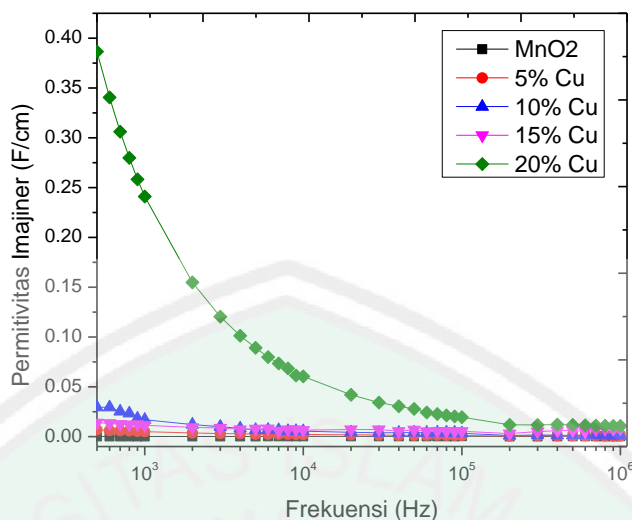
Dari tabel 4.4 kemudian dibuat plot grafik antara variasi konsentrasi *dopant* terhadap ϵ'' difrekuensi rendah dan tinggi yang ditunjukkan pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai permitivitas imajiner

Berdasarkan gambar 4.14 dapat diketahui variasi konsentrasi *dopant* menyebabkan penurunan nilai permitivitas imajiner sampel. Pada frekuensi rendah, nilai optimum permitivitas imajiner sebesar 0.01141, sedangkan nilai optimum permitivitas imajiner pada frekuensi tinggi sebesar 6.50081×10^{-4} .

Selain dipengaruhi oleh konsentrasi *dopant*, nilai permitivitas imajiner juga dipengaruhi oleh frekuensi. Plot grafik permitivitas imajiner terhadap fungsi fekuensi ditunjukkan pada gambar 4.15.



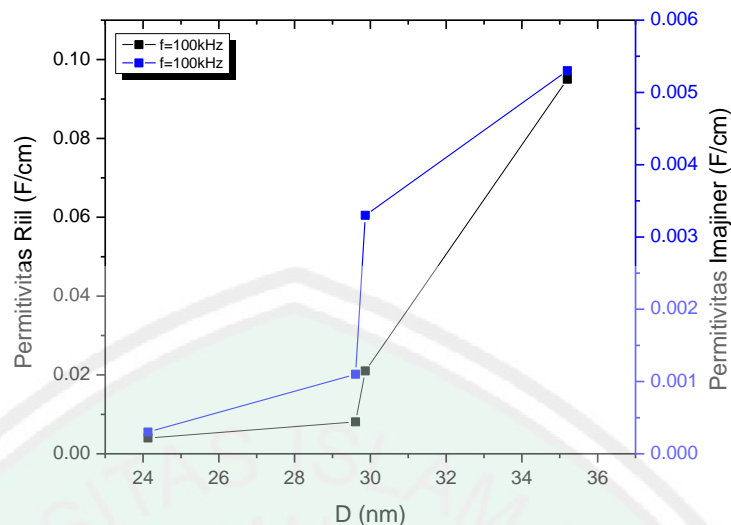
Gambar 4.15 Pengaruh frekuensi terhadap permitivitas imajiner

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa kenaikan frekuensi menyebabkan penurunan nilai permitivitas imajiner sampel. Pada sampel MnO₂ maupun Cu-MnO₂ memiliki nilai permitivitas imajiner besar pada frekuensi rendah dan nilai permitivitas imajiner kecil pada frekuensi tinggi. Permitivitas imajiner paling besar dimiliki oleh sampel MnO₂ dengan penambahan *dopant* sebesar 0.2 mol.

Pengaruh ukuran kristal terhadap sifat dielektrik dapat dijelaskan berdasarkan data pada Tabel 4.7 dan plot grafik 4.16. Semakin besar ukuran kristal maka nilai dielektriknya semakin besar.

Tabel 4.7 Konstanta dielektrik sampel pada frekuensi 10 kHz, 50 kHz dan 100 kHz.

Sampel	D (nm)	ϵ'			ϵ''		
		10 kHz	50kHz	100kHz	10 kHz	50kHz	100kHz
0%Cu	24.12998	0.0041	0.0039	0.0040	0.0002	0.0002	0.0003
5%Cu	29.60907	0.0131	0.0089	0.0081	0.0021	0.0014	0.0011
10%Cu	29.86618	0.0354	0.0291	0.0210	0.0054	0.0040	0.0033
15%Cu	35.20133	0.1110	0.1043	0.0950	0.0065	0.0069	0.0053



Gambar 4.16 Pengaruh ukuran kristal terhadap sifat dielektrik

Tabel 4.7 dan grafik 4.16 menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi *dopant* yang ditambahkan ukuran kristal semakin besar sehingga energi yang diterima oleh atom-atom untuk berdifusi semakin besar juga. Semakin besar ukuran kristal menyebabkan dominan-dominan kristal semakin banyak. Hal ini mengakibatkan muatan semakin besar. Muatan yang besar menyebabkan kapasitansi bernilai besar. Konstanta dielektrik menjadi lebih besar seiring dengan besarnya kapasitansi.

Konduktivitas listrik pada sampel dapat dihitung menggunakan data konduktansi yang diperoleh dari uji LCR Meter. Nilai konduktivitas berbanding terbalik dengan nilai impedansi riil dan imajiner pada sampel. Dari data nilai konduktivitas ini dapat diketahui bahan tersebut bahan isolator, konduktor, atau semikonduktor. Dengan menggunakan persamaan Lee dkk (1991) maka nilai konduktivitas listrik bahan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

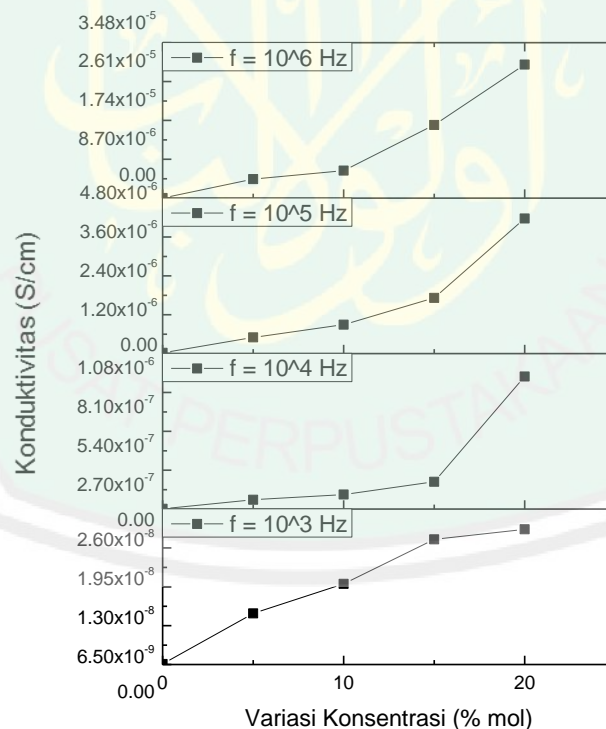
$$\sigma = G(\omega) \left(\frac{1}{A} \right) \quad (4.7)$$

dimana, σ , $G(\omega)$, l , dan A masing-masing adalah konduktivitas (S/cm), konduktansi fungsi ω (Siemens), tebal bahan (cm), dan luas penampang bahan (cm^2). Hasil perhitungan seluruh sampel dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Variasi konsentrasi *dopant* terhadap konduktivitas pada frekuensi rendah dan tinggi

Variasi Konsentrasi (%)	σ (S/cm)			
	10^3	10^4	10^5	10^6
0	0.00774E-8	0.13279E-8	2.27376E-8	2.41264E-8
5	0.85356E-8	6.48623E-8	50.0944E-8	423.646E-8
10	1.34977E-8	10.1130E-8	89.2575E-8	616.838E-8
15	2.09212E-8	18.9098E-8	171.873E-8	1637.92E-8
20	2.26217E-8	92.0412E-8	417.186E-8	2987.99E-8

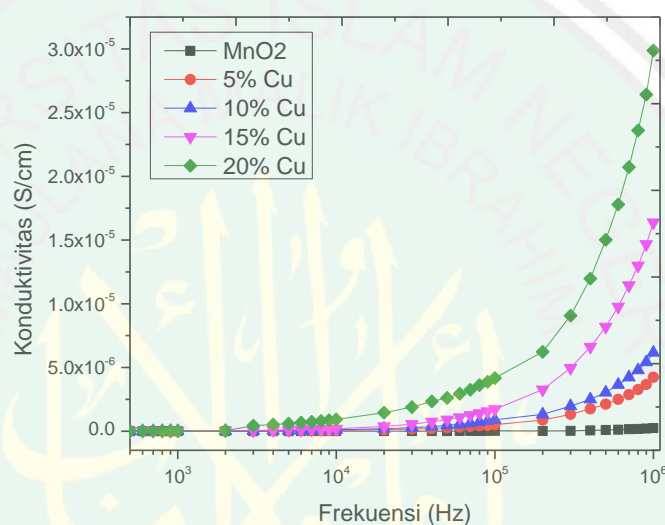
Dari tabel 4.8 kemudian dibuat plot grafik antara variasi konsentrasi *dopant* terhadap σ difrekuensi rendah dan tinggi yang ditunjukkan pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai konduktivitas

Berdasarkan gambar 4.17 dapat diketahui variasi konsentrasi *dopant* menyebabkan peningkatan nilai konduktivitas sampel. Pada frekuensi rendah, nilai optimum konduktivitas sampel sebesar 1.149×10^{-9} S/cm, sedangkan nilai optimum konduktivitas sampel pada frekuensi tinggi sebesar 1.4281×10^{-6} S/cm.

Besarnya nilai konduktivitas juga dipengaruhi oleh frekuensi. Plot grafik permitivitas imajiner terhadap fungsi fekuensi ditunjukkan pada gambar 4.18.



Gambar 4.18 Grafik hubungan konduktivitas terhadap fungsi frekuensi

Berdasarkan gambar 4.18 dapat diperoleh informasi bahwa penambahan *dopant* dapat meningkatkan konduktivitas sampel. Hal ini disebabkan oleh sifat logam Cu yang mempunyai mobilitas elektron tinggi sehingga mudah menghantarkan arus. Konduktivitas listrik masing-masing sampel secara umum juga mengalami peningkatan seiring kenaikan frekuensi. Konduktivitas listrik tertinggi dimiliki sampel dengan penambahan konsentrasi *dopant* sebesar 0.2 mol.

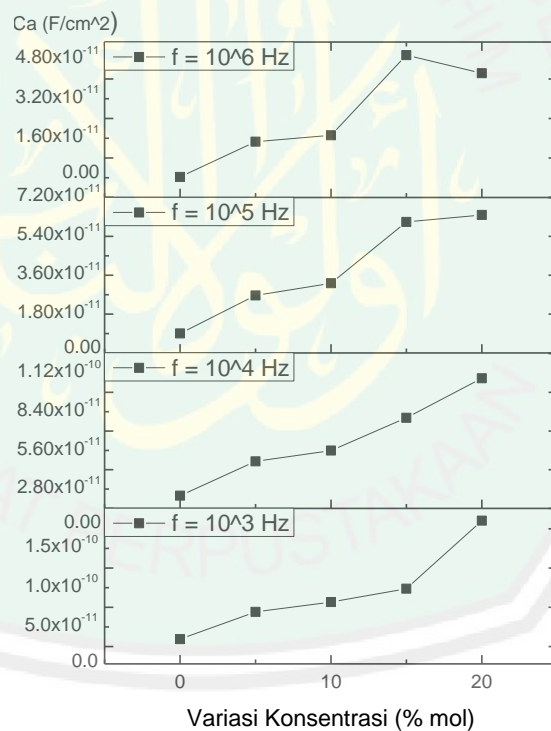
Kemampuan sebuah kapasitor untuk menyimpan energi listrik disebut kapasitansi. Ketika kapasitor berada diantara dua keping konduktor yang

memiliki beda potensial, maka muatan pada kapasitor mengalami polarisasi. Data kapasitansi hasil pengukuran ditunjukkan pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Variasi konsentrasi dopant terhadap kapasitansi area pada frekuensi rendah dan tinggi

Variasi Konsentrasi (%)	Frekuensi (Hz)			
	10^3	10^4	10^5	10^6
0	0.95660E-11	0.92220E-11	0.90526E-11	0.82924E-11
5	4.42340E-11	3.39837E-11	2.66158E-11	2.25998E-11
10	5.66347E-11	4.18578E-11	3.22532E-11	2.52206E-11
15	7.37610E-11	6.55872E-11	6.06696E-11	5.76909E-11
20	16.0475E-11	9.41212E-11	6.39171E-11	5.03383E-11

Dari tabel 4.9 kemudian dibuat plot grafik antara variasi konsentrasi *dopant* terhadap C_A difrekuensi rendah dan tinggi yang ditunjukkan pada gambar 4.19.

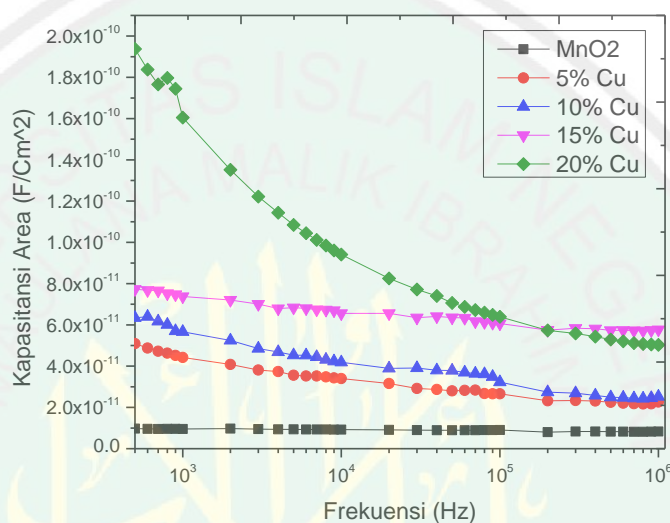


Gambar 4.19 Pengaruh variasi konsentrasi terhadap nilai kapasitansi

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa pengaruh variasi konsentrasi *dopant* meningkatkan nilai kapasitansi sampel. Akan tetapi sampel 0.2 mol Cu-MnO₂ kembali mengalami penurunan pada frekuensi tinggi. Pada frekuensi rendah,

nilai optimum kapasitansi sampel sebesar 6.626×10^{-12} F/cm², sedangkan nilai optimum kapasitansi sampel pada frekuensi tinggi sebesar 2.283×10^{-12} S/cm.

Besarnya nilai kapasitansi suatu bahan juga dipengaruhi oleh frekuensi. Plot grafik permitivitas imajiner terhadap fungsi fekuensi ditunjukkan pada gambar 4.20.



Gambar 4.20 Grafik hubungan kapasitansi terhadap fungsi frekuensi

Gambar 4.20 memberikan informasi bahwa penambahan atom *dopant* meningkatkan nilai kapasitansi semua sampel. Semakin tinggi konsentrasi *dopant* yang diberikan, semakin besar kapasitansi yang didapatkan. Nilai kapasitansi tertinggi dimiliki sampel dengan penambahan dopan sebesar 20%.

4.2 Pembahasan

Pembuatan elektroda Cu *doped* MnO₂ dilakukan menggunakan menggunakan metode Sol-gel. Variasi penambahan Cu²⁺ dengan konsentrasi 0, 5, 10, dan 15 (% mol). Tujuannya untuk mengetahui pengaruh terhadap fasa, struktur morfologi, dan sifat listrik dari sampel.

Hasil karakterisasi XRD Cu *doped* MnO₂ dari semua puncak yang terekam pada sudut 5°-60° memperlihatkan bahwa sampel memiliki pola difraksi yang sesuai dengan data standar JCPDS 29-1020. Fasa yang terbentuk berdasarkan data XRD adalah alfa MnO₂ dengan struktur tetragonal. Selain itu, tidak ada puncak tambahan yang berhubungan dengan fasa kristal kedua, baik itu fase logam tembaga, klorida tembaga, maupun mangan klorida. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi MnO₂.H₂O tersebar merata dan MnO₂ bereaksi dengan baik. Penambahan konsentrasi *dopant* juga mengakibatkan penurunan intensitas pada sampel MnO₂ yang disebabkan karena adanya proses substitusi Cu²⁺ ke Mn⁴⁺ pada bidang kristalografi.

Secara umum, penambahan konsentrasi *dopant* Cu²⁺ menyebabkan pergeseran puncak-puncak difraksi. Pergeseran puncak ini juga dapat terjadi akibat adanya cacat (*vacancy*) pada unit sel ketika ion *dopant* bergabung pada kisi periodik MnO₂. Adanya pergeseran puncak membuktikan bahwa telah terjadi perubahan pada nilai parameter kisi. Nilai ini dipengaruhi oleh jarak ionik atom Cu²⁺ sebagai *dopant* dan jarak ionik atom Mn⁴⁺. Ketika jari-jari ionik dari ion Cu²⁺ (0.73Å) dengan bilangan koordinasi=6 lebih besar dari jari-jari ionik Mn²⁺ (0.66Å) dengan BK=6, maka Cu²⁺ akan mensubstitusi posisi Mn²⁺ pada bidang kristalografi. Reaksi antara MnO₂ dan CuCl₂ merupakan reaksi substitusi larutan padat. Reaksi ini dapat terjadi ketika perbedaan jari-jari atom tidak lebih dari 15% (Effendy, 2010).

Dari *refinement* yang dilakukan, diperoleh data *Figure of Merit* (FoM) dan ketercapaian penghalusan (nilai *Goodnes of Fit* (GoF)) pada masing-masing variasi sampel yang ditunjukkan pada tabel 4.1. Pada tabel tersebut dapat

diketahui bahwa panjang kisi a maupun c menurun secara linear seiring bertambahnya nilai konsentrasi *dopant*. Perubahan nilai konstanta kisi pada sampel yang semakin menurun dengan variasi konsentrasi mengindikasikan bahwa semakin banyak dopan yang masuk ke dalam kisi Mn.

Pada tabel 4.1 juga dapat diketahui bahwa nilai tingkat kesuksesan hasil *refinement* (R_{wp} , R_p , R_{exp} , R_b , dan GoF atau χ^2) masing-masing sampel berkisar dibawah 10%. Hasil yang berbeda untuk semua sampel ini diyakini akibat pengaruh faktor skala (*scale factor*) sehingga mengakibatkan perbedaan antara intensitas pengamatan dan perhitungan. Sementara *background*, posisi atom, dan parameter kisi sesuai dengan model perhitungan. Hasil *refinement* Rietveld dapat diterima menurut kriteria yang disyaratkan yaitu GoF <4% dan indikator R <20% (Kisi dan Howard, 2012). Dengan demikian, parameter-parameter hasil penghalusan dapat dianalisis lebih lanjut.

Pengaruh penambahan konsentrasi *dopant* juga menyebabkan perubahan nilai FWHM. Semakin kecil nilai FWHM semakin baik kualitas kristal, sehingga semakin kecil *strain* yang terjadi pada sampel (Rietveld, 1969). Pada spektrum XRD ini, diketahui bahwa variasi konsentrasi *dopant* yang semakin tinggi meningkatkan nilai FWHM sampel dan ion Cu^{2+} yang menggantikan ion Mn^{4+} semakin banyak. Adanya pelebaran FWHM juga mengindikasikan terjadinya cacat kristal akibat terbentuknya vakansi oksigen ketika proses substitusi Cu^{2+} ke Mn^{4+} pada kisi kristal MnO_2 . Nilai FWHM ini digunakan untuk mengidentifikasi ukuran kristal suatu sampel.

Ukuran kristal pada puncak tertinggi masing-masing sampel tidak memiliki selisih yang besar. Nilai ukuran kristal yang diperoleh berkisar 24-35 nm. Hal ini

dikarenakan seluruh sampel diberikan perlakuan yang sama, yakni pemanasan pada suhu kalsinasi 450°C selama 3 jam. Perlakuan ini menyebabkan mekanisme pertumbuhan butir dari sampel yang terjadi pada suhu tersebut hampir sama. Penambahan konsentrasi *dopant* yang semakin besar menyebabkan ukuran kristal yang semakin besar. Hal ini disebabkan karena dopant Cu sebagian mengaktifasi pertumbuhan butir dan sisanya tersegregasi dibatas butir (Iqbal et al, 2011).

Sampel MnO₂ dan 10% Cu-MnO₂ memiliki morfologi yang hampir mirip pada perbesaran 1000x. Bentuk butirannya berupa bongkahan (*bulk*). Sedangkan pada perbesaran 100000x baik MnO₂ maupun 10% Cu terlihat bahwa antara butiran satu dengan yang lain mengalami aglomerasi. Namun penambahan konsentrasi *dopant* mengurangi adanya aglomerasi. Aglomerasi ini terjadi akibat penggumpalan saat sampel mengendap ketika didinginkan pada temperatur ruang. Berkurangnya aglomerasi menyebabkan peningkatan luas permukaan sampel dan bertambahnya nilai kapasitansi. Rata-rata ukuran butiran yang hampir mirip sekitar 30-50 nm.

Pengaruh pendopingan ion Cu²⁺ juga dapat diketahui dari hasil uji sifat listrik. Penambahan atom *dopant* menyebabkan jangkauan gerakan dipol listrik pendek karena elektron-elektron valensi lebih sulit berpindah, ikatan inti terhadap elektron terluar akan semakin kuat dan elektron terluar semakin sulit lepas, serta momen dipol semakin besar. Selain itu, meningkatnya dielektrisitas juga dipengaruhi adanya polarisasi pada struktur tetragonal MnO₂. Pada tetragonal ini, polarisasi memiliki nilai tertentu walaupun sampel belum diberi medan listrik. Sampel yang ditambah dengan konsentrasi *dopant* paling besar memiliki nilai permitivitas rill dan kapasitansi paling besar. Namun pada konsentrasi *dopant*

sebesar 20% mol nilai tersebut mengalami penurunan. Hal ini berkaitan dengan semakin tinggi frekuensi yang diberikan mengakibatkan lebih banyak gelombang yang ditransmisikan, sehingga muatan pada kapasitor tidak dapat terpenuhi karena arah arus sudah berbalik.

Besarnya konstanta dielektrik juga dipengaruhi oleh pertukaran elektron antara Cu^{2+} dan Mn^{4+} . Hal ini mengakibatkan pergeseran dari elektron yang mengakibatkan polarisasi. Hasil uji juga menunjukkan bahwa pola kapasitansi sama dengan konstanta dielektrik, karena konstanta dielektrik dihitung berdasarkan nilai kapasitansi dan memiliki hubungan searah. Secara mikroskopik penurunan konstanta dielektrik seiring dengan kenaikan frekuensi pengukuran dikarenakan elektron akan berosilasi dengan frekuensi yang sama dengan medan aplikasi dan semua mekanisme polarisasi dapat mengikuti medan aplikasi. Ketika frekuensi yang diaplikasikan sangat tinggi maka osilasi elektron tidak mampu mengikuti fluktuasi medan aplikasi (Rahmat, 2000). Hal inilah yang menyebabkan nilai konstanta dielektrik turun seiring dengan bertambahnya frekuensi.

Pada keping kapasitor impedansi sebagai perintang suatu medan listrik yang diberikan oleh keping. Sampel MnO_2 memiliki impedansi lebih tinggi daripada sampel yang didoping menggunakan Cu^{2+} . Situasi ini terjadi karena gerak molekul-molekul bersifat acak, cenderung menghambat proses penyearahan sehingga impedansi semakin besar.

Z' dan Z'' berkurang dengan meningkatnya frekuensi karena terjadinya polarisasi muatan ruang. Pada frekuensi rendah, nilai impedansi lebih tinggi menunjukkan bahwa polarisasi terjadi lebih besar dan pada frekuensi tinggi

polarisasi menurun (Kazmi dkk, 2016). Pada frekuensi rendah terbentuk polarisasi *space charge* (muatan ruang). Polarisasi *space charge* merupakan peristiwa pemisahan muatan-muatan bebas dalam ruang dielektrik, Dengan proses ini terjadi pengumpulan muatan sejenis di dua sisi dielektrik.

Penyisipan serbuk Cu pada MnO_2 juga menyebabkan kenaikan nilai konduktivitas. Hal ini disebabkan oleh sifat logam dari Cu yang mempunyai mobilitas elektron yang tinggi sehingga mudah menghantarkan arus. Berdasarkan penelitian yang lain, secara keseluruhan konduktivitas MnO_2 yang mengalami proses pendopingan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu konsentrasi dopan yang ditambahkan, homogenitas dopan dalam MnO_2 , derajat kristalinitas, dan morfologi MnO_2 serta reaksi kimia yang terjadi antara dopan dengan MnO_2 itu sendiri (Bhullar, 2009).

Kenaikan konduktivitas juga disebabkan oleh kenaikan frekuensi, dimana atom-atom yang menyusun sampel tersebut bervibrasi. Getaran yang terjadi pada atom-atom tersebut menimbulkan jarak antar atom yang semakin besar, sehingga atom tidak mudah mengikat elektron dan mengakibatkan elektron mudah bergerak bebas. Gerakan elektron bebas ini akan meningkatkan konduktivitas listrik dari sampel tersebut (Parno, 2006).

Hasil penelitian pengaruh perubahan konsentrasi *dopant* terhadap struktur Cu^{2+} doped MnO_2 nanopartikel sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Awaluddin et al (2018). Pada pola XRD $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ teramati bahwa puncak-puncak difraksi semakin lebar dengan kenaikan x dan penurunan ukuran kristal. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Hao et al (2016) dan Chen et al (2016), setelah penambahan berbagai logam transisi (Fe, Co, Ni, dan Cu) ke dalam MnO_2 murni

menunjukkan bahwa intensitas relatif puncak difraksi oksida mangan menjadi lebih lemah (turun).

Allah menciptakan segala sesuatu di muka bumi dengan ukuran-ukuran yang teliti dan cermat, dengan perhitungan-perhitungan yang tepat, dan dengan rumus-rumus yang seimbang (Abdusysyagir, 2007). Antara satu sama lain saling melengkapi sebagaimana termaktub pada Q.S Al Hijr (15): 21:

وَإِن مِّن شَيْءٍ إِلَّا عِندَنَا خَزَائِنُهُ وَمَا نُنزِّلُهُ إِلَّا بِقَدَرٍ مَّعْلُومٍ ﴿٢١﴾

Dan tidak ada sesuatupun melainkan pada sisi Kami-lah khazanahnya; dan Kami tidak menurunkannya melainkan dengan ukuran yang tertentu.

Ayat ini mengibaratkan kekuasaan Allah SWT dalam menciptakan dan mengatur segala sesuatu. Kata (شَيْءٍ) menunjukkan kata yang mencakup segala sesuatu. Kata ini juga dapat dipahami dalam arti unsur-unsur yang berbeda-beda dari proses perpaduan/penciptaannya (Shihab, 2002). Begitu pula dengan penelitian ini, hasil karakterisasi yang didapatkan merupakan ketentuan Allah SWT. Namun manusia diberikan akal dan pikiran untuk belajar dan menghitung ukuran kristal melalui metode yang sudah ditemukan.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan, hasil uji XRD dari sintesis MnO_2 dengan variasi konsentrasi *dopant* Cu^{2+} menunjukkan bahwa sampel memiliki fasa yang terbentuk alfa MnO_2 dengan struktur tetragonal dan ukuran rata-rata butir sekitar 30-50 nm.

Penambahan konsentrasi ion *dopant* dapat meningkatkan permitivitas, konduktivitas, dan kapasitansi sampel. Dari hasil pengujian sifat listrik, sampel dengan variasi konsentrasi dopan 0.2 mol memiliki kapasitansi dan konduktivitas paling besar yaitu masing-masing sebesar 1.60475×10^{-10} F/cm² dan 2.26217×10^{-8} S/cm. Akan tetapi nilai kapasitansi mengalami penurunan pada frekuensi tinggi. Hal ini berkaitan dengan gelombang yang ditransmisikan lebih banyak sehingga muatan pada kapasitor tidak dapat terpenuhi.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya dalam pembuatan lembaran Cu-MnO_2 diharapkan menggunakan metode seperti *doctor blade* untuk memudahkan pembuatannya dan karakterisasi lebih lanjut seperti Uv-Vis dan CV untuk mengetahui sifat listrik lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Yudistira, V, Nirmin dan Khairurrijal. 2008. Sintesis Nanomaterial. *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi*. Vol. 1, Pp. 33-57.
- Abdussyakir. 2007. *Ketika Kiai Mengejar Matematika*. Malang: UIN Malang Press.
- Al-Qur'an dan Terjemah. 2009. Departemen Agama RI. Bandung : Jabar.
- Awaludin, Amir; Lia Astuti; Amilia Linggarwati; et al. Manganese Oxide Synthesized by sol-gel for the Degradation of Methylene Blue. *AIP Conference Proceedings* 2026, 020075 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5065035>
- Ayyad, O.D. 2011. *Novel Strategies the Synthesis of Metal Nanoparticle and Nanostructure. Thesis*. Universitas de Barcelona. Barcelona. Pp 48-49.
- B.D. Cullity. 1978. *Elements of X-Ray Diffraction*. 2 ed. London: Addison-Wesley.
- Bach, S.; Pereira-Ramos, J.P.; Cachet, C.; Bode, M.; Yu, L.T. Effect of Bi Doping on the Electrochemical Behavior of layered MnO₂ as Lithium Intercalation Compound. *Electrochim. Acta* 1995, 40, 785–789.
- Bhullar, G.K. 2009. Synthesis and Characterization of Conducting Polymer Polyaniline (PANI). *Indian Journal of Chemistry*, Vol. 18.
- Bricker O., (1965), *The American Mineralogist*, pp. 1296.
- Bulushev, D.A., Liubov, K.M. Vladimir I.Z., dan Albert, R. 2000. Formation of Active Site for Selective Toluene Oxidation during catalyst Synthesis via Sol-Gel of V₂O₅ with MnO₂. *Journal of Catalyst* 103, 145-153.
- Burke, A. 2000. Ultracapacitors: Why, How, and Where is the Technology. *Journal of Power Sources*. Vol 91. Pp 37-50.
- Chen, K.; Pan, W.; Xue, D. Phase Transformation of Cr³⁺-doped MnO₂ for Pseudocapacitive Electrode Materials. *J. Phys. Chem. C* 2016, 120, 20077–20081.
- Cheng, F.Y.; Chen, J.; Gou, X.L.; Shen, P.W. High-Power Alkaline Zn–MnO₂ Batteries Using γ -MnO₂ Nanowires/Nanotubes and Electrolytic Zinc Powder. *Adv. Mater.* 2005, 17, 2753–2756.

Ching, S.; Welch, E.J.; Hughes, S.M.; Bahadoor, A.B.F.; Suib, S.L. Nonaqueous Sol-Gel Syntheses of Microporous Manganese Oxides. *Chem. Mater.* 2002, 14, 1292–1299.

Conway, B.E. 1999. *Electrochemical Supercapacitor: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. New York: Kluwer Academic-Plenum Publisher.

Dzhavarof, T.D., S.S. Yesilkaya, N.Y. Canli, & M. Caliskan. 2005. *Diffusion and Influence of Cu on properties of CdTe thin films and CdTe/CdS cells*.

Effendy. 2010. *Logam, Aloi, Semikonduktor, dan Superkonduktor*. Malang: Bayumdhia Publising.

Feng and Kanoh, Manganese Oxide Porous Crystals, *J.Mater. Chem.*, 1999, 9(2), 319–333.

Fultz, Brent, dan James Howe. 2013. "Diffraction and the X-Ray Powder Diffractometer." In *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials*, London: Springer Verlag, 59–115. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29761-8_2.

Genuino, H.C.; Dharmarathna, S.; Njagi, E.C.; Mei, M.C.; Suib, S.L. Gas-Phase Total Oxidation of Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes Using Shape-Selective Manganese Oxide and Copper Manganese Oxide Catalysts. *J. Phys. Chem. C* 2012, 116, 12066–12078.

Giancoli, Douglas C. 2001. *Fisika Jilid 2 Edisi Kelima*. [diterjemahkan Dra. Yuhliza Hanum, M. Eng]. Jakarta: Erlangga.

Goldstein, Joseph., et al. (2007). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis: Third Edition*. USA. Springer.

Greenwood, N.N. dan Earnshaw, A., 1984. *Chemistry on the Elements*. Oxford: Pergamon Press.

Halliday, David dan Robert Resnick. 1996. *Fisika Jilid 2 Edisi Ketiga*. [diterjemahkan Pantur Silaban dan Erwin Sucipta]. Jakarta: Erlangga.

Hao, J.; Liu, Y.; Shen, H.; Li, W.; Li, J.; Li, Y.; Chen, Q. Effect of Nickel-Ion Doping in MnO₂ Nanoneedles Aselectrocatalyst for The Oxygen Reduction Reaction. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2016, 27, 6598–6605.

Hashem, A.M.; Abuzeid, H.M.; Narayanan, N.; Ehrenberg, H.; Julien, C.M. Synthesis, structure, magnetic, electrical and electrochemical properties of Al, Cu and Mg doped MnO₂. *Mater. Chem. Phys.* 2011, 130, 33–38.

- Hashem, A.M.A.; Mohamed, H.A.; Bahloul, A.; Eid, A.E.; Julien, C.M. Thermal Stabilization of Tin- and Cobalt-Doped Manganese Dioxide. *Ionics*. 2018,14, 7–14.
- Hayt, William H. 1986. *Elektromagnetika Teknologi Jilid 1 Edisi Keempat*. [diterjemahkan The Houw Liong, ph.D]. Jakarta: Erlangga.
- Hu, Z.; Xiao, X.; Chen, C.; Li, T.; Huang, L.; Zhang, C.; Su, J.; Miao, L.; Jiang, J.; Zhang, Y.; et al. Al-Doped α -MnO₂ for High Mass-Loading Pseudocapacitor with Excellent Stability. *Nano Energy*. 2015,11, 226–234.
- Iqbal.,N. Yaqub, B.Sepiol., B. Ismail., Astudy of The Influence of Crystallite Size On The Electrical and Magnetic Properties Of CuFe₂O₄, *Material Research Bulletin*, Vol. 46, 2011,pp. 1837-1842
- Kazmi, Safia Akhtar., dkk. 2016. *Investigation of Electrical and Optical Properties of TiO₂-Graphene for Dye-Sensitied Solar Cells*. *Journal of Alloys and Compounds*.
- Khopkar, S. M.2003.*Konsep Dasar Kimia Analitik*. Jakarta: Universitas Indonesia Press.
- Khopkar, S.M. 1990. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. Jakarta : UI Press.
- Kisi, E. H. dan Howard, C. J. (2012). *Application of neutron powder diffraction*. Offord University Press.
- Kusnadi. 2007. *Sifat Listrik Telur Ayam Kampung Selama Penyimpanan*. [Skripsi]. Departemen Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Lee, W. K.,dkk, 1991. *Phys. Rev. Lett.* 67 (12). 1559 – 1561.
- Li, D.; Li, W.; Deng, Y.; Wu, X.; Han, N.; Chen, Y. Effective Ti doping of δ -MnO₂ Via Anion Route for Highly Active Catalytic Combustion of Benzene. *J. Phys. Chem. C*. 2016, 120, 10275–10282.
- Mansour. 2005. Frequency and Composition Dependence on the Dielectric Properties for Mg-Zn Ferrite. *Egypt. J. Solid*. Vol 28 hal 263-273.
- Mohamed, Abdel Megeed Ibrahim. 2015. *Synthesis, Grain Growth and Physical Properties of Nanoparticulate Manganese Oxides*. Department of Chemistry, Philipps University.
- O’Dwyer.1952. The Frequency Dependent of the Dielectric Propeerties of Dipole Substence. *Electrotechnology*. Vol 25. Hal 647-651.

- Pan, Y. Lv, H. Gong, et al. Synthesis of Ag/PANI-MnO₂ Core-Shell Nanowires and Their Capacitance Behavior, *RSC Adv.*, 2016,6(21), 17415–17422.
- Parno, 2006. *Fisika Zat Padat: Struktur Kristal*, Universitas Negeri Malang.
- Paveena, A.Z. Tachan, M. Boutbara. 2010. The Effect of Substrate Temperature on Structural and Physical Properties of Ultrasonically Sprayed Cds Film. *Material Chemistry and Physics*. Vol. 94, Pp. 103-108.
- Poonguzhali, N. Shanmugam, R. Gobi, et al. Influence of Zn Doping on the Electrochemical Capacitor Behavior of MnO₂ Nanocrystals, *RSC Adv.*, 2015,5 (56), 45407–45415.
- Rahmat, Mamat. 2000. *Penentuan Impedansi Membran pada Berbagai Konsentrasi Larutan Eksternal dengan Metode Spektroskopi Impedansi*. [Skripsi]. Jurusan Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Rietveld, H.(1969) “A Profile refinement method for nuclear and magnetic structure “*Journal of applied Crystallography*. International Union of Crystallography, 2(2), hal.65-71.
- Riyanto. 2013. *Elektrokimia dan Aplikasinya*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Shihab, M. Quraish. 2002. *Tafsir Al-Misbah Volume 1 Pesan, Kesan & Keserasian Al Quran*. Ciputat: Lentera Hati.
- Sim, S. Mayavan and S. M. Choi, Scalable Thermal Synthesis of A Highly Crumpled, Highly Exfoliated and N-Doped Graphene/Mn-Oxide Nanoparticle Hybrid for High-Performance Supercapacitors, *RSC Adv.*, 2015,5(53), 42516–42525.
- Smallman, R., & Bishop, R. 1999. *Modern Physics Metallurgy And Materials Engineering*. Butterworth-Heinemann: Oxford.
- Song, S. Cheng, H. Chen, et al. Anomalous Pseudocapacitive behavior of a Nanostructured, Mixed-Valent Manganese Oxide for Electrical Energy Storage, *Nano Lett.*, 2012,12(7), 3483–3490.
- Sulastri, Eneng Jajah. 2006. *Kajian Sifat Listrik Membran dan Fisik Daging Ayam Broiler Giling selama Proses Penyimpanan dan Pemanasan*. [Skripsi]. Departemen Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Tipler, Paul A. 1991. *Fisika Untuk Sains dan Teknik Jilid 2 Edisi Ketiga*. [diterjemahkan Dr. Bambang Soegijono]. Jakarta: Erlangga.
- Vikram, Yadav S. 2009. *The Effect Of Frequency And Temperature On Dielectric Properties Of Pure Poly Vinylidene Fluoride (PVDF) Thin Films*.

- Proceedings of world congress on engineering 2009, london, UK vol 1 hal 400-402.
- Vlack, Van. Lawrence H. 1964. *Element Of Material Science*. Tokyo: Tosho Insatsu Printing Co. Ltd.
- Vlanck, V, Lawrence. 2004. *Elemen-elemen Ilmu dan Rekayasa Material Edisi Ke-6*. Jakarta: Erlangga.
- Wang, H.; Lu, Z.; Qian, D.; Li, Y.; Zhang, W. Single-Crystal α -MnO₂ Nanorods: Synthesis and Electrochemical Properties. *Nanotechnology* 2007,18, 115616.
- Wang, W.; Gao, Z.; Wang, J.; Wang, B.; Liu, Q.; Li, Z.; Mann, T.; Yang, P.; Zhang, M.; Liu, L. Synthesis of Reduced Graphene Nanosheet/Urchin-Like Manganese Dioxide Composite and High Performance Assupercapacitor Electrode. *Electrochim. Acta* 2012,69, 112–119.
- Wang, X.; Li, Y. Selected-Control Hydrothermal Synthesis of α - and β -MnO₂ Single Crystal Nanowires. *J. Am. Chem. Soc.* 2002,124, 2880–2881.
- Wang, X.; Li, Y.D. Synthesis and Formation Mechanism of Manganese Dioxide Nanowires/Nanorods. *Chem. Eur. J.* 2003,9, 300–306.
- Waseda, Yoshio, Eiichiro Matsubara, dan Kozo Shinoda. 2011. *X-Ray Diffraction Crystallography: Introduction, Examples and Solved Problems*. London: Springer.
- Woolard, Barry.(2006). *Elektronika Praktis: Pradnya Paramita*. Jakarta Pusat.
- Young, Hugh dan Roger A Freedman. 2003. *Fisika Universitas Jilid 2 Edisi Kesepuluh*. [diterjemahkan Pantur Silaban]. Jakarta: Erlangga
- Zaghlul, Najjar Tafsir alayat al Kawniyat fi al Qur'an al Karim (Kairo; Maktabah as Syuruq al Dauliyah, 2008) juz 3, h.6.
- Zeng, X. Zhao, H. Wei, et al. Specific Capacitance and Supercapacitive Properties of Polyaniline-Reduced Graphene Oxide Composite, *Acta Phys.-Chim. Sin.*, 2017,33(10), 2035–2041.
- Zhang and Pan, Supercapacitors Performance Evaluation, *Adv. Energy Mater.*, 2015,5(6), 1–19.
- Zhang, C. Sun, P. Lu, et al. Crystallization Design of MnO₂ Towards Better Supercapacitance, *Cryst Eng Comm*, 2012,14(14), 5892–5897.
- Zhang, H. Feng, X. Wu, et al., Progress of Electrochemical Capacitor Electrode Materials: A review, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2009,34(11), 4889–4899.

Zhao, L. Wang, X. He, C. Wan, and C. Jiang, Kinetic Investigation of LiCoO₂ by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). *Journal of Electrochemical Science*, vol. 5 No. 4, pp 478-488, 2010.

Zhou, X. Zhang, J. Wei, et al. Morphology-Controlled Synthesis and Novel Microwave Absorption Properties of Hollow Urchin Like α -MnO₂ Nanostructures, *J. Phys. Chem.C*, 2010,115(5), 1398–1402.

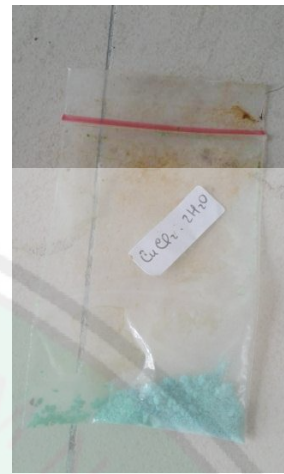


LAMPIRAN



Lampiran 1

Gambar penelitian



Bahan Penelitian



Penimbangan bahan

Pencampuran bahan

Pengendapan sampel



Penyaringan Sampel

Sampel yang dihasilkan

Pengeringan Sampel



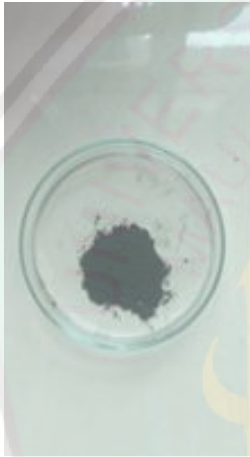
Pencucian dengan HCl



Sampel setelah dikalsinasi



Penghalusan



Sampel setelah dihaluskan



Pembuatan lembaran



Penuangan sampel



Pengeringan lembaran

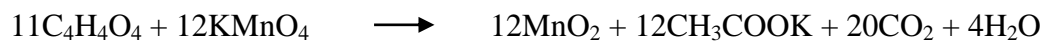


Pengujian menggunakan LCR Meter

Lampiran 2

Perhitungan stoikiometri

A. Stoikiometri Material Aktif



Ar: - C = 12 gr/mol

- Mn = 55 gr/mol

- O = 16 gr/mol

- H = 1.008 gr/mol

- K = 39 gr/mol

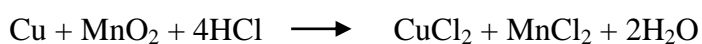
1. Mr setiap bahan

$$\begin{aligned} \text{Mr C}_4\text{H}_4\text{O}_4 &= [4 \times \text{Ar (C)}] + [4 \times \text{Ar (H)}] + [4 \times \text{Ar (O)}] \\ &= (4 \times 12) + (4 \times 1.008) + (4 \times 16) \\ &= 48 + 3.024 + 64 \\ &= 115.024 \text{ gr/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mr MnO}_2 &= \text{Ar (Mn)} + [2 \times \text{Ar (O)}] \\ &= 55 + (2 \times 16) \\ &= 55 + 32 \\ &= 87 \text{ gr/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mr KMnO}_4 &= [\text{Ar (K)}] + [\text{Ar (Mn)}] + [4 \times \text{Ar (O)}] \\ &= (4 \times 39) + (55) + (4 \times 16) \\ &= 156 + 55 + 64 \\ &= 275 \text{ gr/mol} \end{aligned}$$

B. Stoikiometri *Dopant* Material



Ar: - Cu = 63.5 gr/mol

- Cl = 35.5 gr/mol

- O = 16 gr/mol

- H = 1.008 gr/mol

2. Mr Dopant

$$\begin{aligned}
 \text{Mr CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} &= [\text{Ar (Cu)}] + [2 \times \text{Ar (Cl)}] + [4 \times \text{Ar (H)}] + [2 \times \text{Ar (O)}] \\
 &= (63.5) + (71) + (4 \times 1.008) + (2 \times 16) \\
 &= 63.5 + 71 + 4.024 + 32 \\
 &= 170.524 \text{ gr/mol}
 \end{aligned}$$

3. Massa Setiap Bahan

Untuk massa setiap bahan, dihitung menggunakan acuan berat total 20 mmol KMnO_4 . Sehingga, untuk mencari massa setiap bahan, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{mol} &= \frac{\text{gr}}{\text{Mr}} \\
 \frac{\text{gr}}{\text{Mr}} &= \frac{\text{gr}}{\text{Mr}} \\
 \text{Massa KMnO}_4 &= \frac{\text{Massa KMnO}_4}{\text{Mr. KMnO}_4} \\
 \text{Massa KMnO}_4 &= 0.02 \text{ mol} \times 158 \\
 &= 3.160 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

a. Massa $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$

$$\begin{aligned}
 \text{mol} &= \frac{\text{Massa C}_4\text{H}_4\text{O}_4}{\text{Mr. C}_4\text{H}_4\text{O}_4} \\
 \text{Massa C}_4\text{H}_4\text{O}_4 &= 0.0067 \text{ mol} \times 115 \\
 &= 0.78 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

4. Material Dopant

Dopant Cu yang digunakan sebesar 5%, 10% dan 15% dari 20 mmol material aktif KMnO_4 . Sehingga,

- 5% Cu = $\frac{5}{100} \times 20 = 1 \text{ mmol}$, massa = $1 \times 170.5 = 0.1705 \text{ gram}$
- 10% Cu = $\frac{10}{100} \times 20 = 2 \text{ mmol}$, massa = $2 \times 170.5 = 0.341 \text{ gram}$

- $15\% \text{ Cu} = \frac{15}{100} \times 20 = 3 \text{ mmol}$, massa = $3 \times 170.5 = 0.5115 \text{ gram}$
- $20\% \text{ Cu} = \frac{20}{100} \times 20 = 4 \text{ mmol}$, massa = $4 \times 170.5 = 0.682 \text{ gram}$

No	Bahan	Massa (g)
1	MnO ₂	3.16
2	C ₄ H ₄ O ₄	0.78
3	5% Cu	0.1705
4	10% Cu	0.341
5	15% Cu	0.5115
5	20% Cu	0.682

C. Persentase pembuatan *slurry*

Persentase pembuatan *slurry* 80% material aktif dan 20% PVDF. Massa material aktif yang digunakan adalah 0.1 gram.

A. Massa PVDF

$$\frac{\text{Persentase material aktif}}{\text{Persentase PVDF}} = \frac{\text{Massa material aktif}}{\text{Massa PVDF}}$$

$$\frac{80}{20} = \frac{0.1}{x}$$

$$x = \frac{20 \times 0.1}{80}$$

$$x = 0.08 \text{ gram}$$

Sehingga diperoleh:

No	Bahan	Persentase (%)	Massa (gr)
1	Material Aktif	80	1
2	PVDF	20	0.08

Lampiran 3

Perhitungan ukuran kristal dan data hasil XRD

Ukuran kristal pada sampel dapat dihitung menggunakan persamaan Debye scherrer:

$$D = \frac{k \lambda}{B \cos \theta}$$

dimana D adalah ukuran kristalin, k merupakan konstanta 0,90 dan λ bernilai 0.154060 nm. B merupakan nilai FWHM (*Full Widht Half Maximum*) dan θ adalah sudut bragg.

Sampel	2 θ	θ (rad)	cos θ	FWHM (deg)	FWHM (rad)	D (nm)
Cu 0%	17,828	0.155	0.988	0.46008	0.0080299	17.47648
	28.411	0.248	0.969	0.40719	0.0071068	20.13368
	37.398	0.326	0.947	0.34467	0.0060156	24.12998
Cu 5%	17.787	0.155	0.988	0.407	0.0071035	19.75567
	28.496	0.249	0.969	0.39447	0.0068848	20.78289
	37.360	0.326	0.947	0.28446	0.0049648	29.60907
Cu 10%	17.791	0.155	0.988	0.39447	0.0068848	20.38322
	28.603	0.249	0.969	0.3505	0.0061174	23.39001
	37.333	0.326	0.947	0.28489	0.0049723	29.86618
Cu 15%	17.869	0.155	0.988	0.37749	0.0065884	21.30022
	28.576	0.249	0.969	0.34206	0.0059701	23.96711
	37.368	0.326	0.947	0.23867	0.0041656	35.20133

1. MnO₂+ 0% Cu

- Sudut 2 θ (17,828)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0.0080299 \cos 0,155} = \frac{0.138654}{0,007934} = 17.47648 \text{ nm}$$

Sudut 2 θ (28.411)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0071068} = \frac{0.138654}{0.006886} = 20.13368 \text{ nm}$$

Sudut 2 θ (37.398)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0060156 \cos 0,326} = \frac{0.138654}{0.005697} = 24.1299 \text{ nm}$$

2. MnO₂ + 5% Cu

- Sudut 2θ (17.787)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0071035 \cos 0,155} = \frac{0.138654}{0.007018} = 19.75567 \text{ nm}$$

- Sudut 2θ (28.496)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0068848 \cos 0,249} = \frac{0.138654}{0.006671} = 20.78289 \text{ nm}$$

- Sudut 2θ (37.360)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0049648 \cos 0,326} = \frac{0.138654}{0.004702} = 29.60907 \text{ nm}$$

3. MnO₂ + 10% Cu

- Sudut 2θ (17.791)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0068848 \cos 0,155} = \frac{0.138654}{0.006802} = 20.38322 \text{ nm}$$

- Sudut 2θ (28.603)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0061174 \cos 0,249} = \frac{0.138654}{0.005928} = 23.39001 \text{ nm}$$

- Sudut 2θ (37.333)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0049723 \cos 0,326} = \frac{0.138654}{0.004709} = 29.86618 \text{ nm}$$

4. MnO₂ + 15% Cu

- Sudut 2θ (17.869)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0065884 \cos 0,155} = \frac{0.138654}{0.006509} = 24.030 \text{ nm}$$

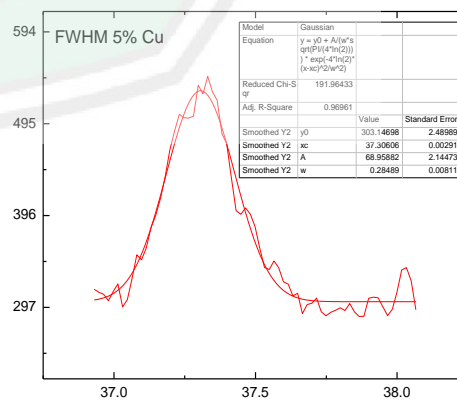
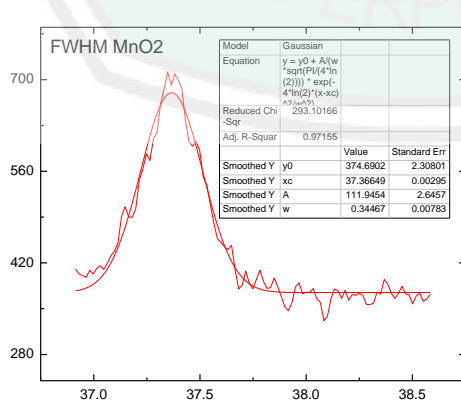
- Sudut 2θ (28.576)

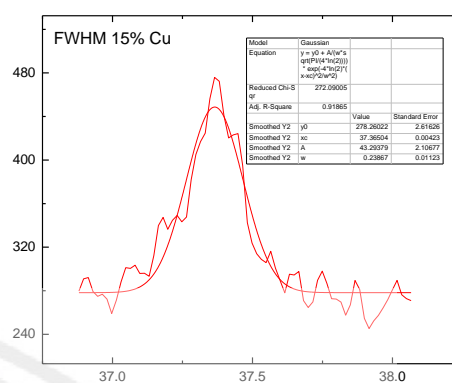
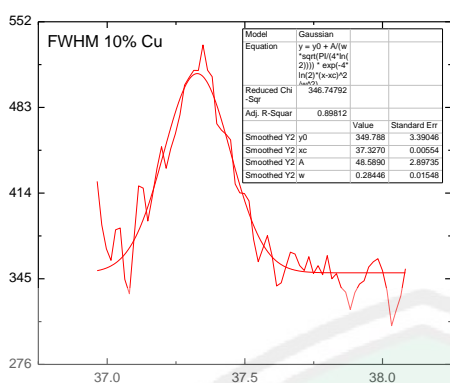
$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0059701 \cos 0,249} = \frac{0.138654}{0.005785} = 21.30022 \text{ nm}$$

- Sudut 2θ (37.368)

$$D = \frac{0,9 \times 0.154060}{0,0041656 \cos 0,326} = \frac{0.138654}{0.003945} = 35.20133 \text{ nm}$$

Fitting nilai FWHM pada puncak tertinggi





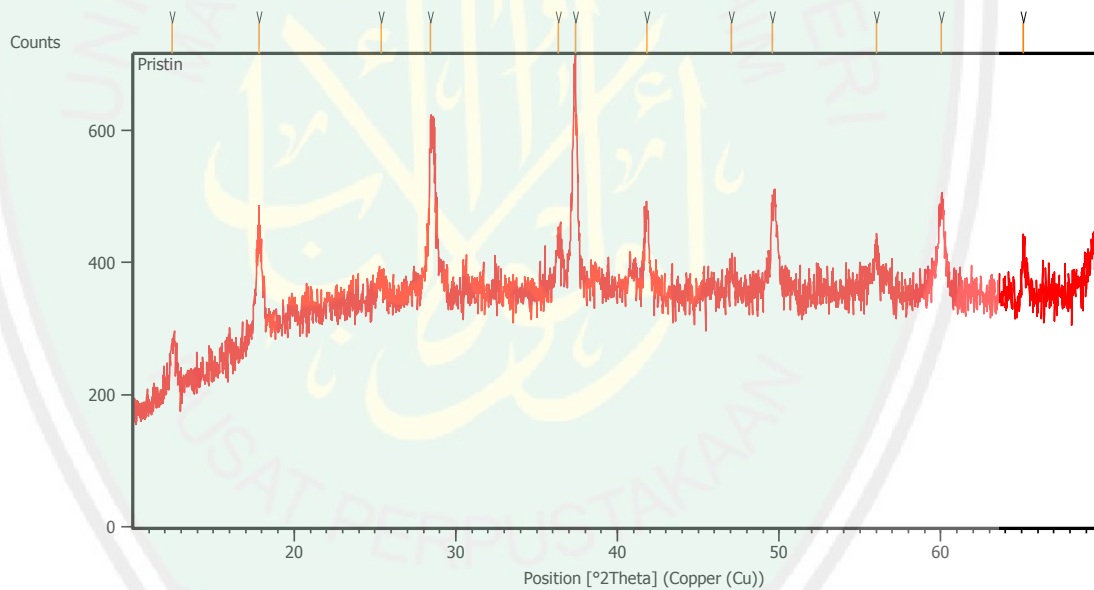
Analysis Result

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	Pristin
Start Position [°2Th.]	10.0084
End Position [°2Th.]	69.9844
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1600
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2Th.]	2.12
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225

K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
 Generator Settings 30 mA, 40 kV
 Diffractometer Type 0000000011119014
 Diffractometer Number 0
 Goniometer Radius [mm] 240.00
 Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 100.00
 Incident Beam Monochromator No
 Spinning No

Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
12.4674	76.84	0.3346	7.09991	21.87
17.8276	163.81	0.2007	4.97544	46.62

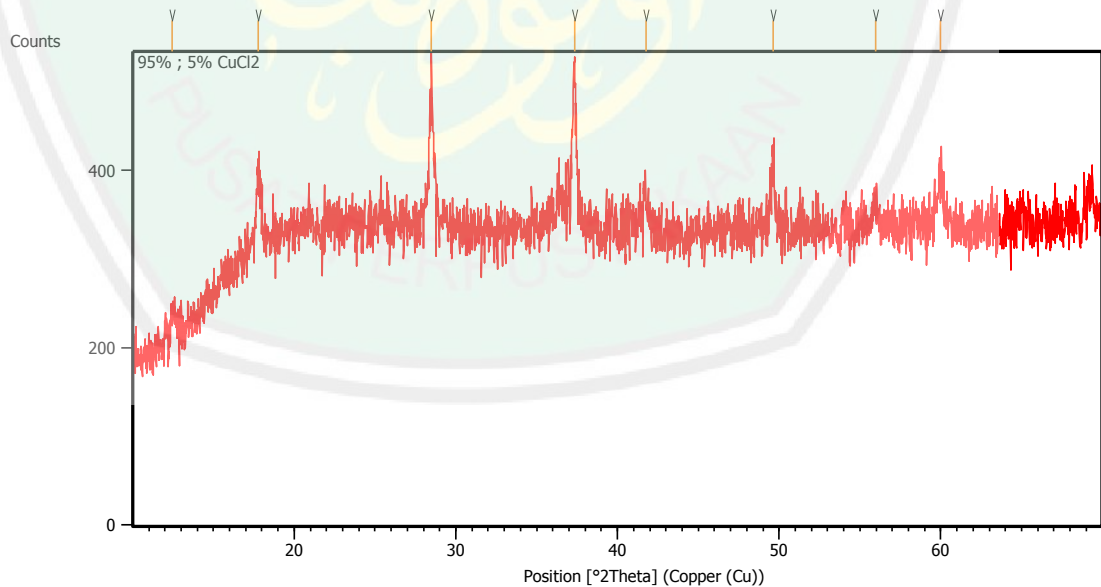
25.3675	29.41	0.4015	3.51113	8.37
28.4114	228.37	0.1673	3.14150	65.00
36.3392	76.49	0.4015	2.47229	21.77
37.3986	351.33	0.1004	2.40466	100.00
41.8399	116.28	0.2342	2.15911	33.10
47.0198	29.67	0.4015	1.93262	8.44
49.5961	147.07	0.1171	1.83810	41.86
56.0423	67.73	0.2007	1.64100	19.28
60.0320	134.88	0.3346	1.54113	38.39
65.1102	66.53	0.2676	1.43267	18.94

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	95% ; 5% CuCl ₂
Start Position [°2Th.]	10.0084
End Position [°2Th.]	69.9844
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1600
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2Th.]	2.12
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00

Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffractometer Type	0000000011119014
Diffractometer Number	0
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	No

Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



Peak List: (Bookmark 3)

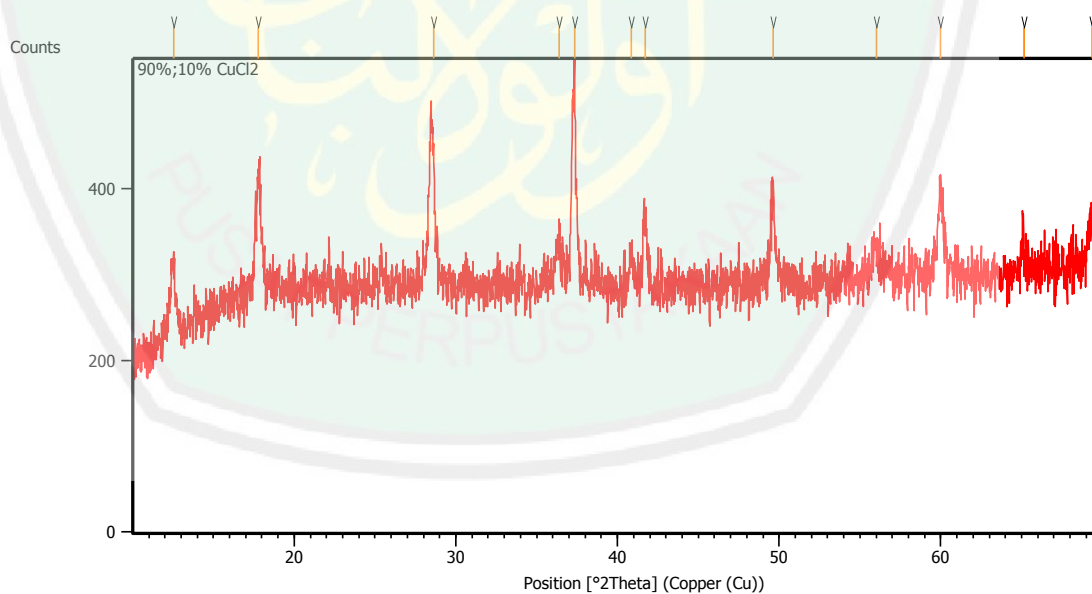
Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
12.4675	28.24	0.3346	7.09986	14.49
17.7876	89.47	0.2007	4.98655	45.92
28.4968	161.65	0.1338	3.13228	82.96
37.3604	194.86	0.1171	2.40703	100.00
41.7555	40.92	0.4015	2.16327	21.00
49.6265	89.88	0.1004	1.83704	46.13
55.9487	33.17	0.4015	1.64352	17.02
59.9834	57.10	0.3346	1.54226	29.30

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	90%;10% CuCl ₂
Start Position [$^{\circ}2\text{Th.}$]	10.0084
End Position [$^{\circ}2\text{Th.}$]	69.9844
Step Size [$^{\circ}2\text{Th.}$]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1600
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [$^{\circ}2\text{Th.}$]	2.12
Offset [$^{\circ}2\text{Th.}$]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [$^{\circ}$]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	25.00
Anode Material	Cu

K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffractometer Type	0000000011119014
Diffractometer Number	0
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	No

Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



Peak List: (Bookmark 3)

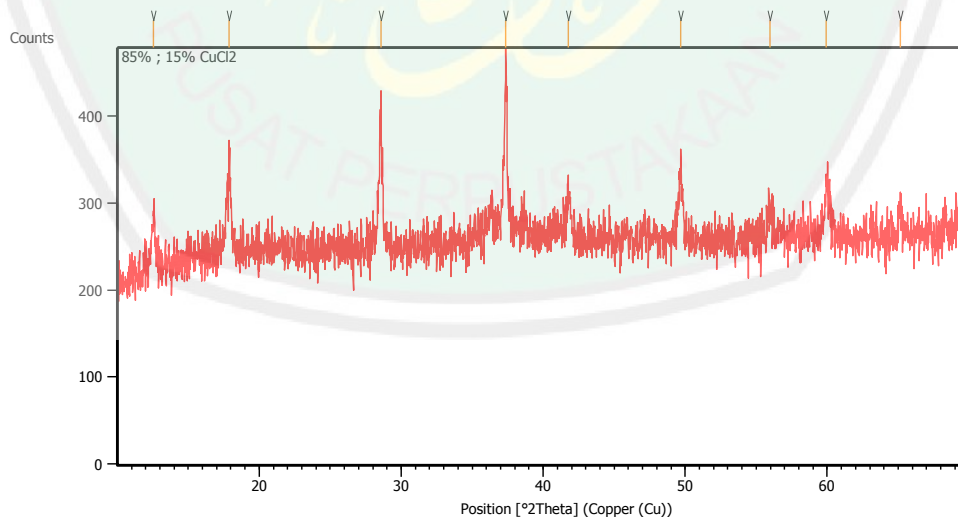
Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
12.5229	84.17	0.1673	7.06856	34.50
17.7910	142.94	0.1338	4.98559	58.59
28.6029	161.31	0.3011	3.12090	66.12
36.3692	45.44	0.4015	2.47032	18.62
37.3328	243.99	0.2342	2.40874	100.00
40.8534	39.10	0.4015	2.20893	16.03
41.6939	85.10	0.2676	2.16633	34.88
49.6311	122.99	0.1338	1.83688	50.41
56.0012	37.65	0.4015	1.64210	15.43
59.9575	100.48	0.4015	1.54286	41.18
65.1325	30.62	0.4015	1.43224	12.55
69.3731	56.50	0.2676	1.35469	23.16

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	85% ; 15% CuCl ₂
Start Position [$^{\circ}2\text{Th.}$]	10.0084
End Position [$^{\circ}2\text{Th.}$]	69.9844
Step Size [$^{\circ}2\text{Th.}$]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [$^{\circ}2\text{Th.}$]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [$^{\circ}$]	0.2500
Specimen Length [mm]	10.00

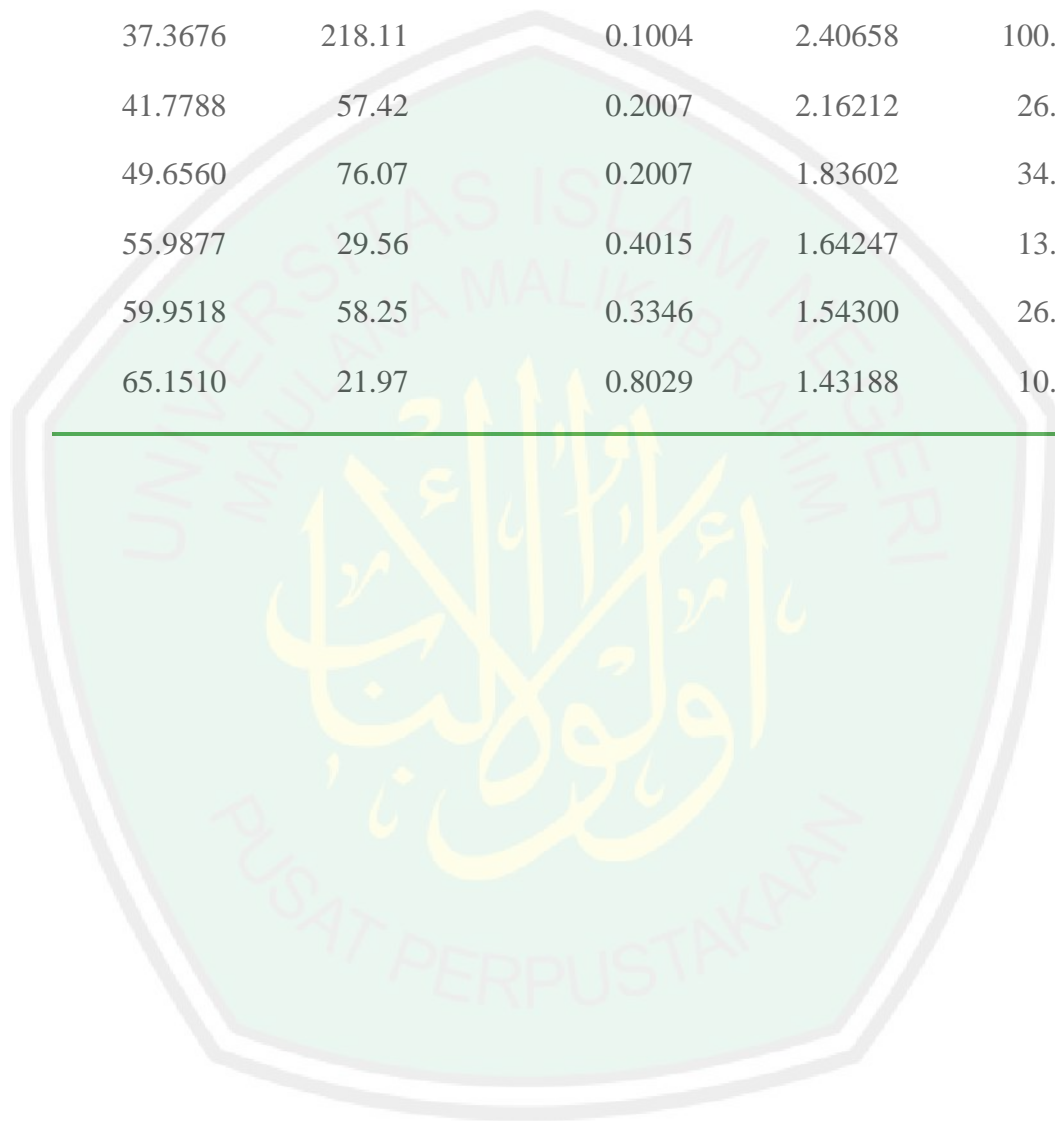
Receiving Slit Size [mm] 12.7500
Measurement Temperature [°C] -273.15
Anode Material Cu
K-Alpha1 [Å] 1.54060
K-Alpha2 [Å] 1.54443
K-Beta [Å] 1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio 0.50000
Generator Settings 30 mA, 40 kV
Diffractometer Type XPert MPD
Diffractometer Number 1
Goniometer Radius [mm] 200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm] 91.00
Incident Beam Monochromator No
Spinning No

Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
12.5340	61.28	0.2676	7.06234	28.10
17.8691	92.59	0.3346	4.96397	42.45
28.5757	133.25	0.1004	3.12381	61.09
37.3676	218.11	0.1004	2.40658	100.00
41.7788	57.42	0.2007	2.16212	26.33
49.6560	76.07	0.2007	1.83602	34.88
55.9877	29.56	0.4015	1.64247	13.55
59.9518	58.25	0.3346	1.54300	26.71
65.1510	21.97	0.8029	1.43188	10.07



Lampiran 4

Analysis rietica result

1. MnO₂

```

+-----+
|                               |
|                               |
+-----+
Phase: 1
+-----+
PHASE SCALE FACTOR = 0.884176E-05-.408589E-070.311566E-06
OVERALL TEMP. FACTOR = 0.000000 0.000000 0.000000
CELL PARAMETERS = 9.860648 -0.000097 0.000707
                  9.860648 -0.000097 0.000707
                  2.871967 0.000013 0.000186
                  90.000008 0.000000 0.000000
                  90.000008 0.000000 0.000000
                  90.000008 0.000000 0.000000
RECIPROCAL CELL = 0.101 0.101 0.348 90.000 90.000
90.000
CELL VOLUME = 279.248199 0.033609
SCALE * VOLUME = 0.002469 0.000087
MOLECULAR WEIGHT = 1391.040
DENSITY = 8.268
ABSOLUTE PHASE VALUES:
  INC = NEUTRONS ON SAMPLE/CM^2 ( in cm^-2)
  MASS = MASS OF PHASE IN BEAM (in g)
  ls/R = RATIO OF DETECTOR HEIGHT TO SAMPLE-DETECTOR
Then:
  INC*MASS*ls/R = 2344.88
+-----+
|                               |
|                               |
+-----+
Histogram: 1
+-----+
SCALE FACTOR = 1.0000 0.00000 0.00000
ZEROPOINT = 0.02600 0.00000 0.00000
SAMPLE DISPLACEMENT = -0.08450 0.00094 0.01023
BACKGROUND PARAMETER B 0 = 291.484 -0.419144
33.5559
BACKGROUND PARAMETER B 1 = 12.7094 0.257390E-01
1.71880
BACKGROUND PARAMETER B 2 = -0.327095 -0.561392E-03
0.348020E-01
BACKGROUND PARAMETER B 3 = 0.241055E-02 0.400049E-05
0.240167E-03
BACKGROUND PARAMETER B 5 = -2527.96 2.87484
215.715
PREFERRED ORIENTATION = 0.83856 0.00002 0.01270
ABSORPTION R = 0.00000 0.00000 0.00000
ASYMMETRY PARAMETERS = 0.19039 0.00085 0.00430
                        0.00000 0.00000 0.00000
HALFWIDTH PARAMETERS U = 1.500926 0.000037
0.000053
                        V = -3.000000 0.000000
0.000000
                        W = 1.100000 0.000000
0.000000

```

ANISOTROPIC GAUSSIAN BROADENING = 0.000000 0.000000
 0.000000
 PEAK SHAPE PARAMETER Gam0 = 3.968497 -0.017301 0.101988
 PEAK SHAPE PARAMETER Gam1 = -0.287000 0.000000 0.000000
 PEAK SHAPE PARAMETER Gam2 = 0.004180 0.000000 0.000000
 EXTINGUISHION PARAMETER = 0.000000 0.000000 0.000000

```

+-----+
| Hist | Rp | Rwp | Rexp | Durbin Unwght | Durbin Wght |
N-P |
+-----+
| 1 | 6.15 | 8.06 | 5.34 | 0.949 | 1.036 |
3575 |
+-----+
| SUMYDIF | SUMYOBS | SUMYCALC | SUMWYOBSSQ | GOF |
CONDITION |
+-----+
| 0.7698E+05 | 0.1252E+07 | 0.1243E+07 | 0.1252E+07 | 0.2273E+01 |
0.1916E+19 |
+-----+
DERIVED BRAGG R-FACTOR= 6.18
  
```

2. 5% Cu-MnO₂

```

+-----+
| Phase: 1 |
+-----+
PHASE SCALE FACTOR = 0.403085E-05-.223844E-070.279264E-06
OVERALL TEMP. FACTOR = 0.000000 0.000000 0.000000
CELL PARAMETERS = 9.854366 -0.000051 0.001628
                  9.854366 -0.000051 0.001628
                  2.868761 -0.000029 0.000427
                  90.000008 0.000000 0.000000
                  90.000008 0.000000 0.000000
                  90.000008 0.000000 0.000000
RECIPROCAL CELL = 0.101 0.101 0.349 90.000 90.000
90.000
CELL VOLUME = 278.581207 0.077155
SCALE * VOLUME = 0.001123 0.000078
MOLECULAR WEIGHT = 1391.040
DENSITY = 8.288
ABSOLUTE PHASE VALUES:
  INC = NEUTRONS ON SAMPLE/CM^2 ( in cm^-2)
  MASS = MASS OF PHASE IN BEAM (in g)
  ls/R = RATIO OF DETECTOR HEIGHT TO SAMPLE-DETECTOR
Then:
  INC*MASS*ls/R = 1066.45
  
```

```

+-----+
| Histogram: 1 |
+-----+
SCALE FACTOR = 1.0000 0.00000 0.00000
ZEROPOINT = 0.02600 0.00000 0.00000
  
```

```

SAMPLE DISPLACEMENT      =    0.16201    0.00120    0.02496

BACKGROUND PARAMETER B 0  =    750.605      -0.387303
31.2850
BACKGROUND PARAMETER B 1  =   -10.3140      0.216265E-01
1.59458
BACKGROUND PARAMETER B 2  =    0.789761E-01 -0.449162E-03
0.320754E-01
BACKGROUND PARAMETER B 3  =    0.239529E-04  0.304676E-05
0.219817E-03
BACKGROUND PARAMETER B 5  =   -5145.24      2.72621
201.442
PREFERRED ORIENTATION     =    0.72145  -0.00060    0.02234
ABSORPTION R              =    0.00000    0.00000    0.00000
ASYMMETRY PARAMETERS      =    0.14126  -0.00010    0.01145
                          =    0.00000    0.00000    0.00000
HALFWIDTH PARAMETERS U    =    -0.108841      0.000077
0.000069
                          V    =    -1.100000      0.000000
0.000000
                          W    =     0.570000      0.000000
0.000000
ANISOTROPIC GAUSSIAN BROADENING =    0.000000      0.000000
0.000000
PEAK SHAPE PARAMETER Gam0 =    3.089389 -0.015974  0.204049
PEAK SHAPE PARAMETER Gam1 =   -0.249100  0.000000  0.000000
PEAK SHAPE PARAMETER Gam2 =    0.004180  0.000000  0.000000
EXTINCTION PARAMETER      =    0.000000  0.000000  0.000000

```

```

+-----+
+-----+
| Hist | Rp | Rwp | Rexp | Durbin Unwght | Durbin Wght |
N-P |
+-----+
+-----+
| 1 | 5.47 | 7.07 | 5.50 | 1.378 | 1.370 |
3575 |
+-----+
+-----+
| SUMYDIF | SUMYOBS | SUMYCALC | SUMWYOBSQ | GOF |
CONDITION |
+-----+
+-----+
| 0.6459E+05 | 0.1180E+07 | 0.1174E+07 | 0.1180E+07 | 0.1649E+01 |
0.2650E+19 |
+-----+
+-----+
DERIVED BRAGG R-FACTOR= 5.79

```

3. 10%Cu-MnO₂

```

+-----+
| Phase: 1 |
+-----+
PHASE SCALE FACTOR = 0.607660E-050.752258E-080.259666E-06
OVERALL TEMP. FACTOR = 0.000000 0.000000 0.000000

```

```

CELL PARAMETERS      =    9.850950    0.000126    0.000867
                    =    9.850950    0.000126    0.000867
                    =    2.867891    0.000042    0.000264
                    =   90.000008    0.000000    0.000000
                    =   90.000008    0.000000    0.000000
                    =   90.000008    0.000000    0.000000
RECIPROCAL CELL     =    0.102    0.102    0.349    90.000    90.000
90.000
CELL VOLUME         =   278.303619    0.043089
SCALE * VOLUME      =     0.001691    0.000072
MOLECULAR WEIGHT    =     1391.040
DENSITY             =         8.296

```

ABSOLUTE PHASE VALUES:

INC = NEUTRONS ON SAMPLE/CM² (in cm⁻²)

MASS = MASS OF PHASE IN BEAM (in g)

ls/R = RATIO OF DETECTOR HEIGHT TO SAMPLE-DETECTOR

Then:

INC*MASS*ls/R = 1606.09

```

+-----+
|                               |
|                               | Histogram: 1 |
|                               |
+-----+
SCALE FACTOR              = 1.0000    0.000000    0.000000
ZEROPOINT                 =    0.02600    0.000000    0.000000

SAMPLE DISPLACEMENT      =    0.21161   -0.00168    0.01428

BACKGROUND PARAMETER B 0 =    675.151             0.738149
28.8772
BACKGROUND PARAMETER B 1 =   -13.6271             -0.391635E-01
1.46170
BACKGROUND PARAMETER B 2 =    0.191671             0.819866E-03
0.293194E-01
BACKGROUND PARAMETER B 3 =   -0.844240E-03          -0.581899E-05
0.200883E-03
BACKGROUND PARAMETER B 5 =   -3803.96             -4.76230
188.214
PREFERRED ORIENTATION    =    0.82357   -0.00015    0.01361
ABSORPTION R             =    0.00000    0.00000    0.00000
ASYMMETRY PARAMETERS     =    0.11299    0.00161    0.00602
                        =    0.00000    0.00000    0.00000
HALFWIDTH PARAMETERS U   =   -0.109824             -0.000006
0.000060
                        V   =   -1.100000             0.000000
0.000000
                        W   =     0.570000             0.000000
0.000000
ANISOTROPIC GAUSSIAN BROADENING =    0.000000    0.000000
0.000000
PEAK SHAPE PARAMETER Gam0 =    2.926888   -0.001534    0.127715
PEAK SHAPE PARAMETER Gam1 =   -0.249100    0.000000    0.000000
PEAK SHAPE PARAMETER Gam2 =    0.004180    0.000000    0.000000
EXTINCTION PARAMETER    =    0.000000    0.000000    0.000000

```

```

+-----+
-----+
| Hist | Rp | Rwp | Rexp | Durbin Unwght | Durbin Wght |
| N-P |   |     |      |                |              |

```



```

+-----+
-----+
|      1 |  5.93 |  7.63 |  5.82 |      1.292 |      1.375 |
3575 |
+-----+
-----+
|  SUMYDIF |  SUMYOBS |  SUMYCALC |  SUMWYOBSQ |  GOF |
CONDITION |
+-----+
-----+
| 0.6259E+05| 0.1055E+07| 0.1049E+07| 0.1055E+07| 0.1718E+01|
0.2770E+19 |
+-----+
-----+
DERIVED BRAGG R-FACTOR=          6.19

```

4. 15%Cu-MnO₂

```

+-----+
|                               |
|                               |
+-----+
Phase: 1
+-----+
PHASE SCALE FACTOR = 0.586879E-050.447899E-060.267995E-06
OVERALL TEMP. FACTOR = 0.000000 0.000000 0.000000
CELL PARAMETERS =
  9.849915 -0.007016 0.005130
  9.849916 -0.007014 0.005130
  2.867835 -0.001428 0.001255
  90.000008 0.000000 0.000000
  90.000008 0.000000 0.000000
  90.000008 0.000000 0.000000
RECIPROCAL CELL = 0.102 0.102 0.349 90.000 90.000
90.000
CELL VOLUME = 278.239685 0.238371
SCALE * VOLUME = 0.001633 0.000075
MOLECULAR WEIGHT = 1391.040
DENSITY = 8.298
ABSOLUTE PHASE VALUES:
  INC = NEUTRONS ON SAMPLE/CM^2 ( in cm^-2)
  MASS = MASS OF PHASE IN BEAM (in g)
  ls/R = RATIO OF DETECTOR HEIGHT TO SAMPLE-DETECTOR
Then:
  INC*MASS*ls/R = 1550.81

```

```

+-----+
|                               |
|                               |
+-----+
Histogram: 1
+-----+
SCALE FACTOR = 1.0000 0.00000 0.00000
ZEROPOINT = 0.02600 0.00000 0.00000

SAMPLE DISPLACEMENT = 0.26479 0.11600 0.06859

BACKGROUND PARAMETER B 0 = 361.353 2.37532
24.5658
BACKGROUND PARAMETER B 1 = -3.89806 -0.212017
1.23629
BACKGROUND PARAMETER B 2 = 0.689082E-01 0.483513E-02
0.246782E-01
BACKGROUND PARAMETER B 3 = -0.411457E-03 -0.326599E-04
0.168451E-03

```

```

BACKGROUND PARAMETER B 5      =   -1309.95      -8.76482
161.593
PREFERRED ORIENTATION         =    0.77482   -0.02133    0.01644
ABSORPTION R                  =    0.00000    0.00000    0.00000
ASYMMETRY PARAMETERS         =   -0.00416   -0.06748    0.02903
                               0.00000    0.00000    0.00000
HALFWIDTH PARAMETERS U       =    -0.109483      0.000209
0.000316
                               V       =    -1.100000      0.000000
0.000000
                               W       =     0.570000      0.000000
0.000000
ANISOTROPIC GAUSSIAN BROADENING =     0.000000      0.000000
0.000000
PEAK SHAPE PARAMETER  Gam0   =     3.820337    0.206685    0.120492
PEAK SHAPE PARAMETER  Gam1   =    -0.249100    0.000000    0.000000
PEAK SHAPE PARAMETER  Gam2   =     0.004180    0.000000    0.000000
EXTINCTION PARAMETER   =     0.000000    0.000000    0.000000

```

```

+-----+
| Hist | Rp | Rwp | Rexp | Durbin Unwght | Durbin Wght |
|-----|
| 1 | 5.69 | 7.26 | 6.20 | 1.489 | 1.559 |
|-----|
3575 |
+-----+
DERIVED BRAGG R-FACTOR= 2.97

```

Lampiran 5

Data RCL Meter

1. Sampel MnO₂ (Pristin) (A = 1.83E-04, d = 6.10E-2)

f	Cp 1	Cp 2	D1	D2	Rp 1	Rp 2	θ1	θ2
500	1.7765	1.7930	0.00398	0.02146	45.0710	8.2722	-89.77	-88.77
600	1.7664	1.7576	0.02069	0.01497	7.2583	7.9506	-88.81	-89.98
700	1.7501	1.7433	0.02568	0.02462	5.0581	8.9141	-88.53	-89.66
800	1.7567	1.7574	0.01966	0.01946	5.7207	5.8184	-88.88	-88.89
900	1.7614	1.7545	0.01644	0.0204	6.1069	4.9003	-89.06	-88.83
1000	1.7553	1.7454	0.02251	0.01989	4.0282	4.5836	-88.71	-88.86
2000	1.7699	1.7797	0.02180	0.02208	2.1872	2.0338	-88.81	-88.78
3000	1.7322	1.7302	0.02756	0.02804	1.1933	1.0834	-88.42	-88.38
4000	1.7197	1.7138	0.03218	0.03355	718.89	692.06	-88.16	-88.08
5000	1.7140	1.7117	0.03119	0.03407	595.52	545.83	-88.21	-88.05
6000	1.7072	1.7052	0.03396	0.03475	457.51	457.85	-88.06	-88.01
7000	1.7025	1.7012	0.03492	0.03497	382.43	382.18	-88.00	-88
8000	1.6992	1.6978	0.03704	0.0362	316.07	323.71	-87.88	-87.93
9000	1.6913	1.6911	0.03653	0.03663	286.26	285.47	-87.91	-87.9
10000	1.6873	1.6875	0.03688	0.03829	255.78	246.3	-87.89	-87.81
20000	1.6653	1.6626	0.04875	0.04737	98.021	101.05	-87.21	-87.29
30000	1.6472	1.6428	0.04916	0.04954	65.521	65.142	-87.19	-87.16
40000	1.6382	1.6332	0.05250	0.05159	45.264	47.223	-86.98	-87.05
50000	1.6304	1.6282	0.05416	0.05452	36.031	35.856	-86.90	-86.88
60000	1.6329	1.6328	0.05612	0.05728	28.947	28.385	-86.72	-86.72
70000	1.6382	1.6318	0.05962	0.05948	23.208	26.689	-86.58	-86.6
80000	1.6416	1.6393	0.06348	0.06472	19.092	23.419	-86.37	-86.33
90000	1.6497	1.6470	0.06679	0.06775	16.050	18.928	-86.18	-86.18
100000	1.6624	1.6504	0.07035	0.07108	13.608	15.716	-85.98	-85.94
200000	1.4648	1.4713	0.01906	0.00203	28.504	15.716	-91.09	-90.12
300000	1.5254	1.5134	0.02047	0.02231	16.987	15.077	-88.83	-88.72
400000	1.5234	1.5262	0.04249	0.04578	6.1084	5.6043	-87.57	-87.38
500000	1.5170	1.5097	0.05686	0.05722	3.6903	3.6845	-86.75	-86.73
600000	1.5143	1.5073	0.06088	0.05259	2.8798	2.9531	-86.52	-86.59
700000	1.5008	1.4985	0.06744	0.07045	2.2488	2.1576	-86.14	-85.97
800000	1.5047	1.5018	0.06978	0.07052	1.8948	1.8782	-86.01	-85.95
900000	1.5110	1.5090	0.07122	0.07225	1.6433	1.6212	-85.93	-85.87
1000000	1.5188	1.5158	0.07588	0.07502	1.3810	1.3826	-85.66	-85.67
2000000	1.7087	1.7050	0.19470	0.19636	239.48	237.45	-79.03	-78.89
3000000	1.7117	1.7027	0.58222	0.58041	53.234	52.774	-59.79	-59.44
4000000	0.9205	0.9036	1.46855	1.49513	29.423	29.449	-34.27	-33.78

500000	0.4342	0.4251	2.34978	2.38778	31.198	31.358	-23.05	-22.72
--------	--------	--------	---------	---------	--------	--------	--------	--------

2. Sampel 5% Cu - MnO₂ (A = 5.57E-04, d = 3.00E-02)

f	Cp 1	Cp 2	D1	D2	Rp 1	Rp 2	θ1	θ2
500	3.007	2.6663	0.23294	0.23236	103.1	116.26	-76.89	-76.92
600	2.852	2.581	0.22683	0.22776	90.722	100.01	-77.27	-77.07
700	2.7496	2.514	0.23487	0.23052	80.493	88.13	-76.78	-77.02
800	2.7046	2.4534	0.24129	0.23065	71.506	79.014	-76.43	-77.01
900	2.6207	2.4189	0.23127	0.22645	65.318	71.301	-76.97	-77.24
1000	2.5451	2.3839	0.2235	0.22485	61.029	65.137	-77.1	-77.33
2000	2.3379	2.2093	0.19878	0.19331	33.332	35.323	-78.73	-78.79
3000	2.1833	2.0617	0.1823	0.1782	23.915	25.236	-79.56	-79.32
4000	2.1551	2.0124	0.18175	0.18161	18.165	19.454	-79.7	-79.71
5000	2.0526	1.9125	0.15809	0.17054	15.313	16.493	-81.02	-80.13
6000	2.0323	1.8944	0.15391	0.18335	12.9	13.739	-81.25	-79.62
7000	2.0017	1.9233	0.16021	0.1715	11.341	11.652	-71.76	-80.27
8000	1.9747	1.9025	0.14402	0.17395	9.9719	10.302	-81.91	-80.13
9000	1.9554	1.8638	0.14147	0.16963	8.9314	9.3542	-81.34	-80.37
10000	1.9431	1.8437	0.15936	0.1639	8.0888	8.5142	-80.95	-80.87
20000	1.8223	1.6952	0.13874	0.18673	4.3254	4.6145	-82.1	-79.42
30000	1.7265	1.5286	0.15042	0.17914	3.0386	3.4208	-81.45	-79.84
40000	1.6638	1.5335	0.11592	0.15344	2.3755	2.5607	-82.38	-80.72
50000	1.7022	1.4225	0.13139	0.17145	1.8663	2.1307	-81	-80.27
60000	1.6758	1.4719	0.13211	0.1722	1.5697	1.7664	-82.73	-70.57
70000	1.6756	1.4912	0.12464	0.19314	1.3495	1.497	-82.3	-79.07
80000	1.6604	1.3178	0.13132	0.17412	1.133	1.4073	-82.9	-80.12
90000	1.6634	1.3021	0.14028	0.16021	1.0538	1.3291	-82.01	-70.49
100000	1.6651	1.3007	0.13751	0.13687	910.9	1.203	-82.07	-79.47
200000	1.4237	1.1605	0.00449	0.14578	553.51	678.9	-86.71	-81.93
300000	1.4456	1.1539	0.10862	0.14454	361.51	451.13	-86.01	-81.78
400000	1.4205	1.1509	0.11476	0.12739	273.37	341.32	-83.13	-82.26
500000	1.3758	1.1266	0.13753	0.12665	229.3	279.7	-82.09	-81.27
600000	1.353	1.105	0.12686	0.14634	194.36	236.95	-82.66	-81.67
700000	1.334	1.0953	0.12028	0.1342	169.31	205.74	-82.14	-82.74
800000	1.3253	1.0909	0.1076	0.11343	149.26	180.01	-83.96	-83.03
900000	1.3128	1.1072	0.071	0.08381	134.37	159.14	-85.93	-85.25
1000000	1.3727	1.1456	0.06303	0.07957	115.71	138.49	-86.33	-85.46
2000000	1.484	1.2297	0.26417	0.25915	51.942	82.651	-76.18	-75.33
3000000	1.455	1.2187	0.68611	0.67761	30.035	36.043	-55.58	-55.9
4000000	0.6845	0.5894	1.72971	1.68172	29.033	34.52	-30.03	-30.71

500000	0.3204	0.2852	2.64069	2.52569	34.221	41.082	-20.74	-21.6
---------------	--------	--------	---------	---------	--------	--------	--------	-------

3. Sampel 10% Cu - MnO₂ (A = 5.41E-04, d = 4.00E-2)

f	Cp 1	Cp 2	D1	D2	Rp 1	Rp 2	θ1	θ2
500	3.9686	2.9043	0.51636	0.2497	71.267	81.695	-62.69	-75.98
600	3.7937	3.138	0.48171	0.27035	62.944	81.602	-64.16	-74.87
700	3.6652	3.0177	0.4091	0.27713	57.415	72.607	-67.75	-74.51
800	3.5641	2.9467	0.39791	0.26544	51.028	60.368	-68.35	-74.04
900	3.3572	2.8204	0.33342	0.23622	49.457	60.021	-71.34	-76.71
1000	3.3078	2.8271	0.2941	0.24209	46.16	54.715	-73.61	-76.39
2000	3.0414	2.6396	0.21985	0.22041	25.554	29.441	-77.6	-77.57
3000	2.7875	2.4678	0.21855	0.20039	18.533	21.072	-77.56	-79.58
4000	2.7521	2.3232	0.2045	0.17178	14.164	16.879	-78.44	-80.25
5000	2.6242	2.2882	0.18394	0.13838	11.929	13.78	-79.58	-82.12
6000	2.607	2.2972	0.1851	0.147	10.005	11.424	-79.51	-81.84
7000	2.5487	2.2686	0.17391	0.15883	8.789	9.898	-80.13	-80.98
8000	2.4599	2.2153	0.15607	0.13808	7.9906	8.8961	-81.13	-82.14
9000	2.4267	2.1647	0.17171	0.14118	7.182	8.1109	-80.26	-81.47
10000	2.3772	2.157	0.16068	0.14434	6.6101	7.3027	-80.87	-81.79
20000	2.1671	2.0491	0.15769	0.12361	3.6272	3.8542	-81.04	-82.95
30000	2.2447	1.9925	0.11546	0.12523	2.3478	2.6419	-83.41	-82.86
40000	2.1773	1.9393	0.13767	0.12495	1.8104	2.0359	-82.18	-82.82
50000	2.1647	1.9401	0.143	0.13319	1.4536	1.6382	-81.35	-82.73
60000	2.0984	1.9046	0.1428	0.13942	1.2526	1.3794	-81.87	-82.06
70000	2.0606	1.884	0.151199	0.15353	1.0908	1.1918	-81.36	-81.39
80000	2.0592	1.86	0.16616	0.14624	953.06	1.0583	-80.57	-81.58
90000	1.9519	1.8212	0.1542	0.17853	895.38	955.87	-81.23	-79.33
100000	1.9155	1.5783	0.13578	0.17651	827.64	827.18	-82.27	-82.11
200000	1.7876	1.182	0.11247	0.0338	442.33	679.3	-83.58	-84.34
300000	1.7261	1.1878	0.15346	0.05703	304.34	445.92	-80.94	-86.74
400000	1.6725	1.1202	0.15758	0.03517	237	354.73	-81.08	-82.09
500000	1.6073	1.0958	0.1784	0.04197	196.5	290.34	-70.61	-87.6
600000	1.5634	1.1152	0.16448	0.06242	167.42	237.38	-80.66	-87.47
700000	1.5431	1.1022	0.15401	0.05921	145.63	204.06	-81.24	-86.61
800000	1.5235	1.1106	0.13113	0.06482	129.47	178.76	-82.53	-86.29
900000	1.5345	1.1268	0.08973	0.06335	114.78	157.77	-84.87	-86.43
1000000	1.597	1.135	0.08194	0.06411	99.135	140.32	-85.27	-86.37
2000000	1.6738	1.2837	0.27235	0.1905	45.887	60.943	-74.74	-73.21
3000000	1.6539	1.2704	0.68751	0.60487	26.433	35.633	-55.48	-58.82
4000000	0.7889	0.6448	1.69901	1.56643	25.685	33.157	-30.69	-32.56

500000	0.3926	0.311	2.50135	2.38474	30.073	39.577	-21.79	-22.78
---------------	--------	-------	---------	---------	--------	--------	--------	--------

4. Sampel 15% Cu – MnO₂ (A = 4.79E-2, d = 4.5E-2)

f	Cp 1	Cp 2	D1	D2	Rp 1	Rp 2	θ1	θ2
500	3.7439	3.6651	0.09489	0.085	84.64	85.536	-84.58	-85.14
600	3.6971	3.6646	0.09201	0.08371	71.773	72.131	-84.32	-85.22
700	3.7287	3.6177	0.07859	0.08624	60.79	65.615	-85.51	-85.07
800	3.6434	3.5723	0.084	0.08078	54.103	55.436	-85.16	-85.32
900	3.6138	3.5569	0.08382	0.0853	48.396	49.336	-85.21	-85.13
1000	3.5186	3.5536	0.07601	0.08507	45.089	44.645	-85.65	-85.13
2000	3.453	3.4532	0.06518	0.07383	22.997	23.009	-86.27	-85.79
3000	3.3685	3.3526	0.06398	0.07295	15.717	15.792	-86.36	-85
4000	3.3067	3.2037	0.06471	0.05506	11.005	12.021	-86.12	-86.31
5000	3.3036	3.2508	0.06302	0.06764	9.6162	9.7693	-86.39	-86.13
6000	3.2793	3.2371	0.06649	0.06839	8.0709	8.1749	-86.2	-86.04
7000	3.2353	3.2332	0.0622	0.03716	7.0139	7.0191	-86.44	-86.79
8000	3.2446	3.2114	0.06024	0.06053	6.1203	6.1835	-886.55	-86.54
9000	3.2247	3.1974	0.05771	0.06383	5.4747	5.5194	-86.7	-86.35
10000	3.1144	3.1741	0.06007	0.05632	4.9217	5.0062	-86.54	-86.76
20000	3.1676	3.123	0.06505	0.06242	2.5069	2.5432	-86.28	-86.43
30000	3.1137	2.9735	0.06115	0.07566	1.7006	1.779	-86.5	-85.07
40000	3.0811	3.0668	0.0689	0.0313	1.2805	1.2331	-86.24	-85.3
50000	3.0562	3.0391	0.06862	0.0633	1.0392	1.0487	-86.17	-86.36
60000	3.0503	3.0243	0.03023	0.07094	864.64	871.37	-85.23	-85.9
70000	2.9553	2.9596	0.05911	0.05323	765.35	730.91	-86.5	-86.37
80000	2.948	2.9358	0.05985	0.05398	673.31	671.03	-86.58	-86.52
90000	2.9395	2.9071	0.05014	0.06178	601.02	607.11	-86.57	-86.46
100000	2.918	2.899	0.05131	0.06085	544.4	547.89	-86.4	-86.57
200000	2.7619	2.7443	0.03106	0.03938	287.9	287.34	-86.2	-87.71
300000	2.8136	2.7825	0.0598	0.05476	188.03	190.38	-87.17	-86.87
400000	2.8043	2.7726	0.06937	0.06309	141.65	142.08	-86.03	-86.1
500000	2.7308	2.7641	0.07403	0.07691	114.15	114.92	-85.77	-85.6
600000	2.7613	2.7433	0.0305	0.08895	95.759	96.4	-85.46	-85.1
700000	2.7618	2.7322	0.08394	0.08933	82.035	82.004	-85.2	-85.04
800000	2.7504	2.73	0.08834	0.09009	72.092	72.492	-84.95	-84.86
900000	2.761	2.7429	0.09014	0.09179	63.737	64.201	-84.03	-84.76
1000000	2.7783	2.7531	0.09453	0.09541	57.133	57.485	-84.61	-84.57
2000000	3.0774	3.0552	0.21364	0.21742	25.288	25.453	-77.94	-77.78
3000000	3.0363	3.0028	0.60933	0.6199	14.912	15.023	-58.64	-58.24
4000000	1.5917	1.5519	1.53934	1.56372	13.618	13.783	-33.01	-32.53

500000	0.7407	0.7178	2.46324	2.5108	16.148	16.34	-21.97	-21.64
---------------	--------	--------	---------	--------	--------	-------	--------	--------

5. Sampel 20% Cu – MnO₂ (A = 5.23E-2, d = 4.21E-2)

f	Cp 1	Cp 2	D1	D2	Rp 1	Rp 2	θ1	θ2
500	10.125	10.147	0.58261	0.5894	53.96	53.041	-59.77	-59.4
600	9.5592	9.6697	0.56342	0.56938	48.903	48.185	-60.53	-60.33
700	9.2019	9.2768	0.54984	0.55782	44.934	43.937	-61.19	-60.85
800	9.8778	8.9285	0.53846	0.54305	41.618	41.031	-61.6	-61.5
900	9.6031	8.6542	0.52787	0.53205	38.94	38.406	-62.19	-61.98
1000	8.3752	8.4182	0.51832	0.52295	36.663	36.162	-62.6	-62.39
2000	7.0556	7.0926	0.46149	0.46476	24.439	24.148	-65.23	-65.07
3000	6.3824	6.4056	0.43633	0.43928	19.041	18.846	-66.43	-86.28
4000	5.9766	5.9892	0.41902	0.4211	15.888	15.777	-67.27	-67.16
5000	5.6667	5.6853	0.40579	0.40867	13.843	13.7	-67.91	-67.77
6000	5.4593	5.4736	0.39255	0.39538	12.377	12.257	-68.57	-68.43
7000	5.2878	5.3011	0.3827	0.38669	11.243	11.091	-69.01	-68.86
8000	5.1427	5.1604	0.3755	0.37627	10.302	10.246	-69.42	-69.38
9000	5.0146	5.0371	0.3681	0.3685	9.5804	9.527	-69.79	-69.77
10000	4.9274	4.9222	0.35695	0.36536	9.0489	8.8499	-70.36	-69.93
20000	4.3193	4.3173	0.32208	0.32853	5.7202	5.6106	-72.15	-71.01
30000	4.036	4.0402	0.30038	0.30218	4.376	4.3454	-73.28	-73.19
40000	3.8703	3.8752	0.28782	0.2901	3.5089	3.5391	-74.96	-73.92
50000	3.6938	3.7	0.27188	0.27372	3.1703	3.1484	-74.89	-74.75
60000	3.5953	3.5985	0.26309	0.26333	2.8043	2.7961	-75.26	-75.23
70000	3.5167	3.5133	0.25503	0.25588	2.5352	2.538	-75.69	-75.37
80000	3.4484	3.4513	0.24003	0.25125	2.3107	2.25125	-75.98	-75.9
90000	3.3914	3.3922	0.24499	0.24574	2.1284	2.1235	-76.23	-76.29
100000	3.339	3.3498	0.24131	0.24163	1.9761	1.9728	-76.44	-76.42
200000	2.9783	3.0191	0.20002	0.20146	1.3358	1.3086	-78.69	-78.31
300000	2.9262	2.9199	0.19832	0.20121	914.37	902.97	-78.78	-78.62
400000	2.8461	2.8401	0.2018	0.20507	692.77	683.16	-78.59	-78.41
500000	2.7706	2.7668	0.20924	0.21015	549.09	547.47	-78.18	-78.13
600000	2.7234	2.7193	0.20938	0.21162	465.53	460.12	-78.17	-78.06
700000	2.6759	2.6772	0.21394	0.21353	397.14	397.6	-77.92	-77.94
800000	2.6512	2.6579	0.21402	0.21466	349.54	348.36	-77.93	-77.83
900000	2.6362	2.6473	0.21392	0.21428	313.58	310.05	-77.93	-77.85
1000000	2.6303	2.6375	0.21531	0.21526	281.03	270.32	-77.85	-77.85
2000000	2.7439	2.7552	0.33151	0.33327	87.483	86.663	-71.65	-71.57
3000000	2.5209	2.5177	0.76713	0.77711	27.431	27.116	-52.5	-52.13
4000000	1.1698	1.1476	1.93858	1.98203	17.554	17.497	-27.39	-26.77

5000000	0.4908	0.4781	3.30745	3.38794	19.607	19.65	-16.82	-16.44
----------------	--------	--------	---------	---------	--------	-------	--------	--------

Lampiran 6 Perhitungan konduktivitas sampel

1. Perhitungan konduktivitas sampel MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$R = 1.3810 \times 10^4 \Omega$$

$$A = 1.83 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 6.10 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

Ditanya : $\sigma = ?$

Jawab :

$$\sigma = d / A.R$$

$$\sigma = 6.10 \times 10^{-2} / 1.83 \times 10^{-1} \times 1.3810 \times 10^4 = 1.06859 \times 10^{-05} \text{ S/cm}$$

2. Perhitungan konduktivitas sampel 5% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$R = 115.71 \times 10^3 \Omega$$

$$A = 5.41 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 4.00 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

Ditanya : $\sigma = ?$

Jawab :

$$\sigma = d / A.R$$

$$\sigma = 4.00 \times 10^{-2} / 5.41 \times 10^{-4} \times 115.71 \times 10^3 = 5.91124 \times 10^{-07} \text{ S/cm}$$

3. Perhitungan konduktivitas sampel 10% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$R = 827.64 \times 10^3 \Omega$$

$$A = 5.57 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 3.00 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

Ditanya : $\sigma = ?$

Jawab :

$$\sigma = d / A.R$$

$$\sigma = 3.00 \times 10^{-2} / 5.57 \times 10^{-4} \times 827.64 \times 10^3 = 7.4496 \times 10^{-06} \text{ S/cm}$$

4. Perhitungan konduktivitas sampel 15% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$R = 57.133 \times 10^3 \Omega$$

$$A = 4.79 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 4.50 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

Ditanya : $\sigma = ?$

Jawab :

$$\sigma = d / A.R$$

$$\sigma = 4.50 \times 10^{-2} / 4.79 \times 10^{-4} \times 57.133 \times 10^3 = 1.65 \times 10^{-05} \text{ S/cm}$$

5. Perhitungan konduktivitas sampel 20% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$R = 57.133 \times 10^3 \Omega$$

$$A = 5.23 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 4.31 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

Ditanya : $\sigma = ?$

Jawab :

$$\sigma = d / A.R$$

$$\sigma = 4.31 \times 10^{-2} / 5.23 \times 10^{-4} \times 30.460 \times 10^3 = 1.59 \times 10^{-05} \text{ S/cm}$$

Lampiran 7 Perhitungan permitivitas rill dan imajiner

1. Perhitungan permitivitas rill dan imajiner sampel MnO_2 pada frekuensi 10^6 Hz

Diketahui :

$$C = 1.5188 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 1.83 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 6.10 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$D = 0.076$$

Ditanya : ϵ' dan ϵ'' ?

Jawab :

$$\epsilon_r = C \cdot d / A \cdot \epsilon_0$$

$$\epsilon_r = 1.5188 \times 10^{-9} \cdot 6.10 \times 10^{-2} / 1.83 \times 10^{-4} \cdot 8.85 \times 10^{-12}$$

$$\epsilon_r = 0.6934 \text{ F/m}$$

$$\epsilon' = \epsilon_r^2 / (\text{sqrt}(1 + (D^2)))$$

$$\epsilon' = (0.6934)^2 / (\text{sqrt}(1 + (0.076^2)))$$

$$\epsilon' = 0.481$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot D$$

$$\epsilon'' = 0.481 \cdot 0.076 = 0.001914$$

2. Perhitungan permitivitas rill dan imajiner sampel 5% Cu - MnO_2 pada frekuensi 10^6 Hz

Diketahui :

$$C = 1.3727 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 5.57 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 3.00 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$D = 0.063$$

Ditanya : ϵ' dan ϵ'' ?

Jawab :

$$\epsilon_r = C.d/A. \epsilon_0$$

$$\epsilon_r = 1.3727 \times 10^{-9} \cdot 3.00 \times 10^{-2} / 5.57 \times 10^{-4} \cdot 8.85 \times 10^{-12}$$

$$\epsilon_r = 1.896 \text{ F/m}$$

$$\epsilon' = \epsilon_r^2 / (\text{sqrt}(1+(D^2)))$$

$$\epsilon' = (1.896)^2 / (\text{sqrt}(1+(0.063^2)))$$

$$\epsilon' = 3.691$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot D$$

$$\epsilon'' = 3.691 \cdot 0.076 = 0.859$$

3. Perhitungan permitivitas rill dan imajiner sampel 10% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$C = 1.597 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 5.41 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 4.00 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$D = 0.082$$

Ditanya : ϵ' dan ϵ'' ?

Jawab :

$$\epsilon_r = C.d/A. \epsilon_0$$

$$\epsilon_r = 1.597 \times 10^{-9} \cdot 4.00 \times 10^{-2} / 5.41 \times 10^{-4} \cdot 8.85 \times 10^{-12}$$

$$\epsilon_r = 3.432 \text{ F/m}$$

$$\epsilon' = \epsilon_r^2 / (\text{sqrt}(1+(D^2)))$$

$$\epsilon' = (3.432)^2 / (\text{sqrt}(1+(0.082^2)))$$

$$\epsilon' = 13.256$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot D$$

$$\epsilon'' = 13.256 \cdot 0.082 = 6.845$$

4. Perhitungan permitivitas rill dan imajiner sampel 15% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$C = 2.778 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 4.79 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 4.50 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$D = 0.094$$

Ditanya : ϵ' dan ϵ'' ?

Jawab :

$$\epsilon_r = C \cdot d / A \cdot \epsilon_0$$

$$\epsilon_r = 2.778 \times 10^{-9} \cdot 4.50 \times 10^{-2} / 4.79 \times 10^{-4} \cdot 8.85 \times 10^{-12}$$

$$\epsilon_r = 4.115 \text{ F/m}$$

$$\epsilon' = \epsilon_r^2 / (\text{sqrt}(1 + (D)^2))$$

$$\epsilon' = (3.432)^2 / (\text{sqrt}(1 + (0.094)^2))$$

$$\epsilon' = 17.010$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot D$$

$$\epsilon'' = 17.010 \cdot 0.094 = 1.614$$

5. Perhitungan permitivitas rill dan imajiner sampel 20% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$C = 2.418 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 5.23 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

$$d = 4.31 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$D = 0.2156$$

Ditanya : ϵ' dan ϵ'' ?

Jawab :

$$\epsilon_r = C \cdot d / A \cdot \epsilon_0$$

$$\epsilon_r = 2.418 \times 10^{-9} \cdot 4.31 \times 10^{-2} / 5.23 \times 10^{-4} \cdot 8.85 \times 10^{-12}$$

$$\epsilon_r = 0.225 \text{ F/m}$$

$$\epsilon' = \epsilon_r^2 / (\text{sqrt}(1 + (D^2)))$$

$$\epsilon' = (0.225)^2 / (\text{sqrt}(1 + (0.2156^2)))$$

$$\epsilon' = 0.0495$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot D$$

$$\epsilon'' = 0.0495 \cdot 0.094 = 0.0106$$



Lampiran 8 Perhitungan kapasitansi sampel

1. Perhitungan kapasitansi Sampel MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$C_p = 1.5188 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 1.83 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

Ditanya C = ?

$$C = C_p/A$$

$$C = 1.5188 \times 10^{-9} / 1.83 \times 10^{-4} = 8.299 \times 10^{-5} \text{ F/Cm}^2$$

2. Perhitungan kapasitansi Sampel 5% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$C_p = 1.3727 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 5.57 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

Ditanya C = ?

$$C = C_p/A$$

$$C = 1.3727 \times 10^{-9} / 5.57 \times 10^{-4} = 2.246 \times 10^{-6} \text{ F/Cm}^2$$

3. Perhitungan kapasitansi sampel 10% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$C_p = 1.597 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 5.41 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

Ditanya C = ?

$$C = C_p/A$$

$$C = 1.597 \times 10^{-9} / 5.41 \times 10^{-4} = 2.295 \times 10^{-6} \text{ F/Cm}^2$$

4. Perhitungan kapasitansi sampel 15% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$C_p = 2.778 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 4.79 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

Ditanya C = ?

$$C = C_p/A$$

$$C = 2.778 \times 10^{-9} / 4.79 \times 10^{-4} = 5.799 \times 10^{-6} \text{ F/Cm}^2$$

5. Perhitungan kapasitansi sampel 20% Cu - MnO₂ pada frekuensi 10⁶ Hz

Diketahui :

$$C_p = 2.418 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$A = 5.23 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$$

Ditanya C = ?

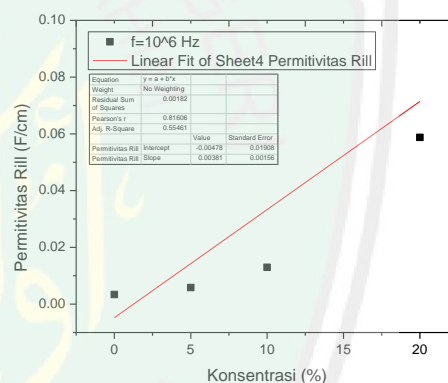
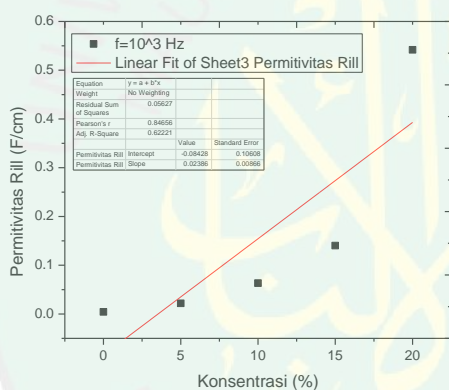
$$C = C_p/A$$

$$C = 2.418 \times 10^{-9} / 5.23 \times 10^{-4} = 4.622 \times 10^{-6} \text{ F/Cm}$$

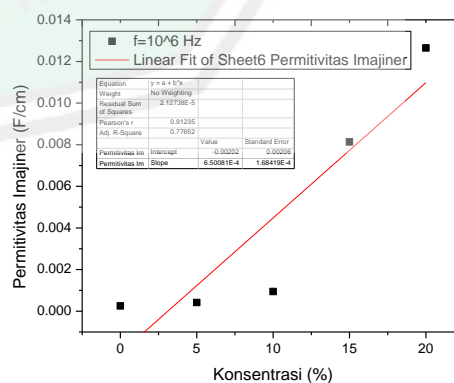
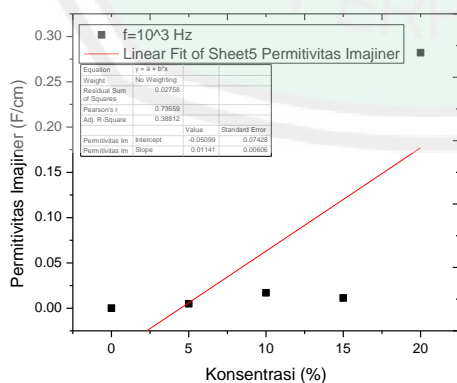
Lampiran 9

Plot grafik sifat listrik untuk mengetahui nilai optimum sampel

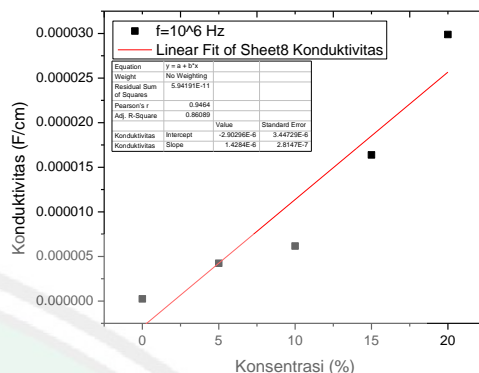
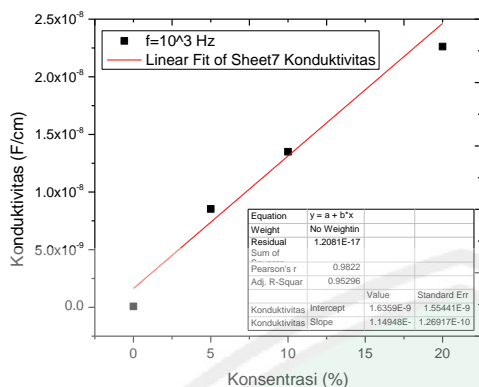
1. Plot grafik permitivitas rill pada frekuensi rendah dan tinggi



2. Plot grafik permitivitas imajiner pada frekuensi rendah dan tinggi



3. Plot grafik permitivitas konduktivitas pada frekuensi rendah dan tinggi



4. Plot grafik permitivitas kapasitansi pada frekuensi rendah dan tinggi

