

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pendahuluan

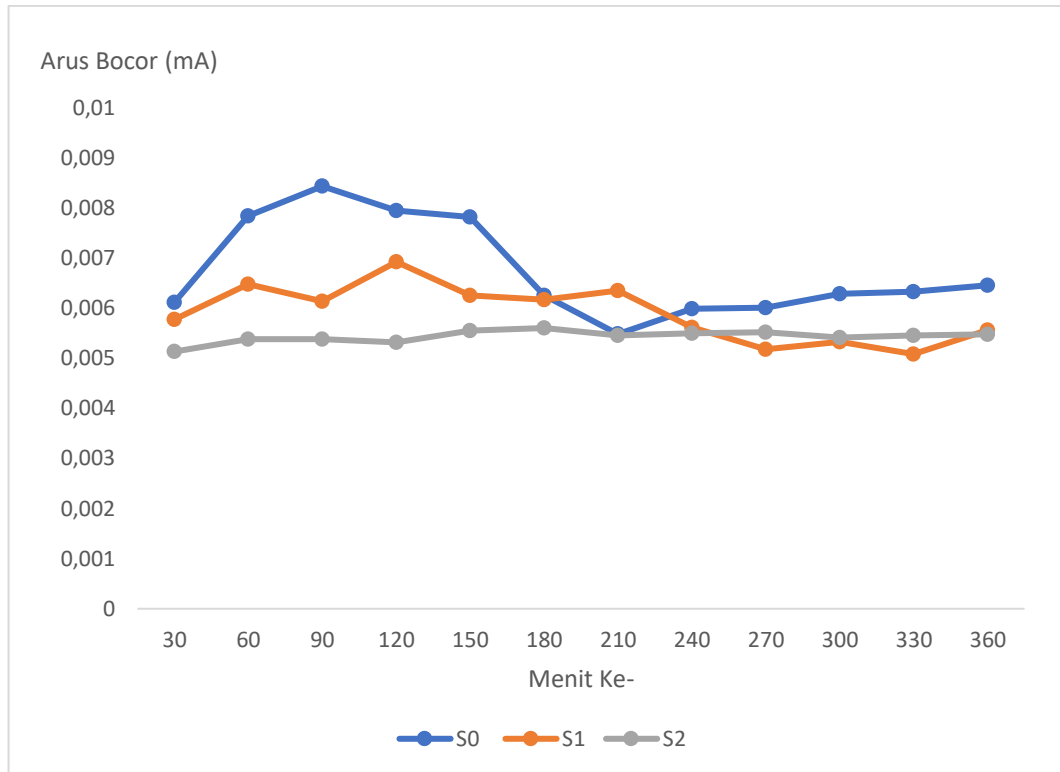
Pada bab ini menunjukkan gambaran bentuk setiap sampel setelah pengujian arus bocor pada tegangan AC 4,5 kV selama 6 jam. Setelah itu dilakukan pengujian XRD untuk melihat perubahan struktur kristal.

### 4.2 Karakteristik Arus Bocor

Data arus bocor diambil setiap 30 menit dengan waktu pengujian selama 360 menit (6 jam). Untuk variasi penambahan nanosilika 0% (S0), penambahan nanosilika 1,5% (S1), penambahan nanosilika 6% (S2).

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Arus Bocor Selama 6 Jam

Menit Ke-	S0 (mA)	S1 (mA)	S2 (mA)
30	0,00611	0,00577	0,00513
60	0,00784	0,00647	0,00538
90	0,00843	0,00613	0,00538
120	0,00794	0,00692	0,00531
150	0,00782	0,00625	0,00555
180	0,00625	0,00617	0,00560
210	0,00548	0,00635	0,00545
240	0,00599	0,00561	0,00549
270	0,00601	0,00518	0,00552
300	0,00628	0,00532	0,00541
330	0,00633	0,00508	0,00545
360	0,00643	0,00556	0,00547

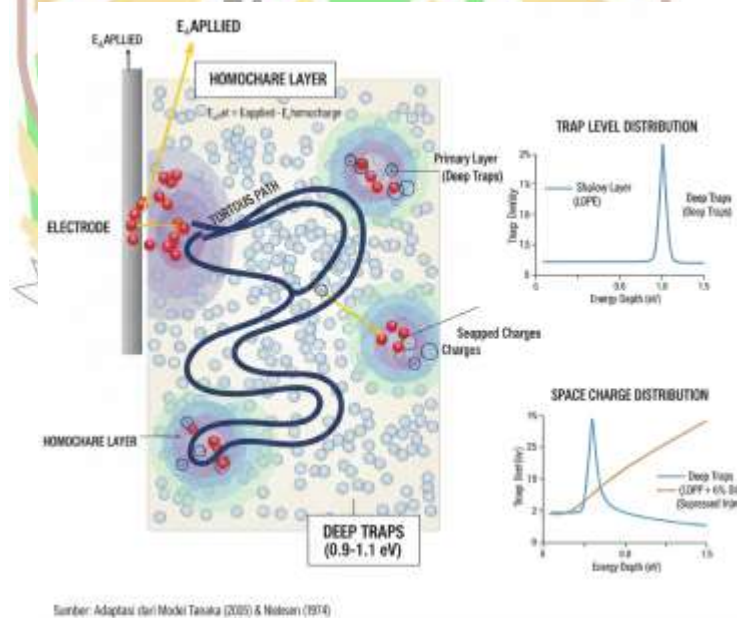


**Gambar 4.1** Grafik Perbandingan Arus Bocor

Berdasarkan data hasil pengukuran arus bocor selama 360 menit yang disajikan pada Tabel 4.1, terlihat adanya pengaruh yang signifikan dari penambahan filler nanosilika terhadap performa isolasi kabel polimer. Pada grafik, sampel S0 menunjukkan nilai arus bocor tertinggi dibandingkan kedua sampel lainnya dengan nilai puncak mencapai 0,00843 mA pada menit ke-90. Peningkatan ini disebabkan oleh pembentukan lapisan polutan cair yang kontinu di permukaan isolator. Karena S0 tidak memiliki *filler* yang memperkuat struktur permukaan, interaksi antara medan listrik dan polutan menyebabkan reorientasi gugus polar di permukaan polimer, yang menurunkan hidrofobisitas material secara sementara. Akibatnya, air menyebar lebih mudah, menurunkan resistansi permukaan[25]. Selanjutnya pada menit ke-210 terjadi penurunan secara drastis hingga 0,00548 mA. Hal ini dapat dijelaskan melalui mekanisme pembentukan pita kering (*dry band formation*). Arus bocor yang tinggi pada awal pengujian menghasilkan panas pada permukaan polimer. Panas yang terakumulasi menyebabkan penguapan kelembaban atau zat volatil pada jalur konduktif, menciptakan area kering (*dry zone*) yang memiliki resistansi sangat tinggi. Peningkatan resistansi yang tiba-tiba ini menyebabkan penurunan arus secara drastis. Namun, kondisi ini memicu risiko terjadinya *micro-arcing* melintasi pita kering tersebut, yang merupakan tahap awal dari kegagalan isolasi (*tracking*)[26]. Ketidakstabilan dari sampel S0 ini membuktikan bahwa matriks LLDPE murni rentan terhadap degradasi termal dan oksidatif akibat arus bocor[27]. Sebaliknya, pada sampel S1, mulai terlihat adanya penurunan nilai arus bocor yang cukup konsisten dengan rentang nilai antara 0,00508 mA hingga

0,00692 mA. Namun masih terdapat fluktuasi pada menit ke-120. Penambahan 1,5% nanosilika mulai memberikan ketahanan termal sehingga mencegah *dry band* yang parah. Partikel nano mulai mengisi rongga antar molekul polimer, namun konsentrasinya belum cukup padat sehingga masih ada jarak antar partikel sehingga elektron masih bisa lewat.

Kualitas isolasi terbaik ditunjukkan oleh sampel S2, yang memiliki nilai arus bocor paling rendah dan tingkat kestabilan paling tinggi di sepanjang waktu pengujian, dengan nilai rata-rata yang bertahan di kisaran 0,0054 mA. Stabilitas dan rendahnya arus bocor pada sampel S2 disebabkan oleh interaksi efektif antara partikel nanosilika dan matriks polimer. Penambahan 6% nanosilika menciptakan hambatan fisik yang dikenal sebagai *Tortuous Path* (jalur berliku), di mana elektron atau pembawa muatan dipaksa menempuh jalur yang lebih panjang dan sulit untuk menembus isolasi[28]. Selain itu, tingginya luas permukaan partikel nano menciptakan area antarmuka yang luas, yang berfungsi sebagai *Deep Traps* (perangkap dalam). *Deep traps* ini menangkap dan membatasi pergerakan elektron bebas, sehingga mengurangi konduktivitas material secara keseluruhan[29]. Kestabilan grafik S2 juga dipengaruhi oleh konduktivitas termal dari nanosilika yang lebih baik dibandingkan matriks polimer murni. Keberadaan jejaring partikel silika membantu mendistribusikan panas yang timbul akibat arus bocor ke seluruh volume material secara merata. Disipasi panas yang efektif ini mencegah terbentuknya titik panas lokal (*hotspot*), sehingga fenomena *dry band* dan degradasi termal yang terjadi pada sampel S0 dapat dihindari sepenuhnya pada sampel S2 [30].



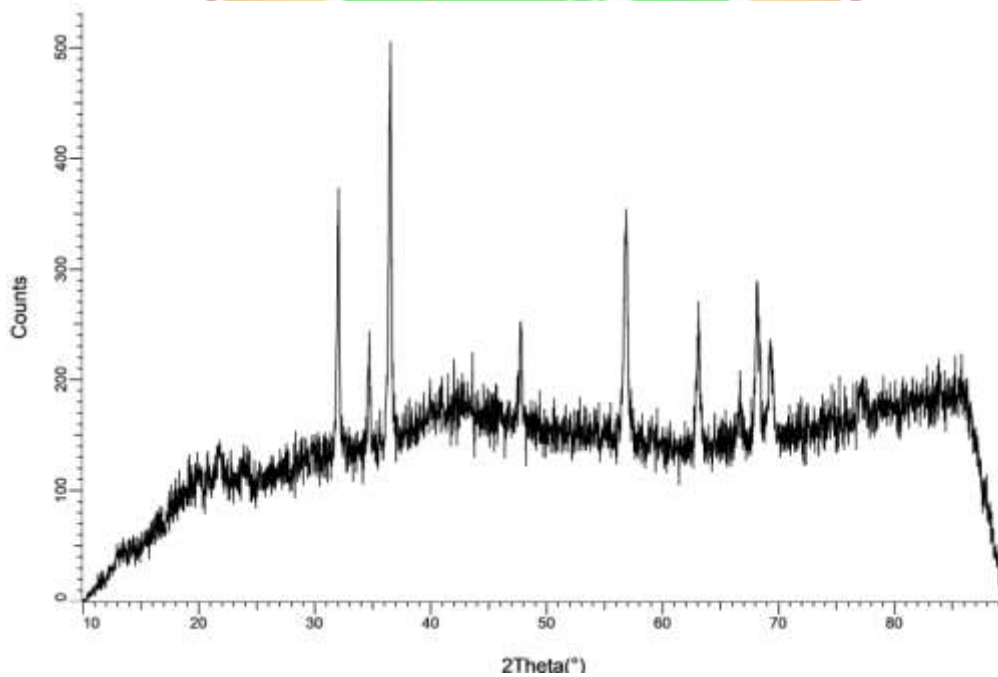
**Gambar 4. 2** Mekanisme Hambatan Fisik dan Dinamika Perangkap Pada Komposit Berbasis Silika

Pada Gambar 4.2 dapat dilihat mekanisme antarmuka antara nanopartikel dan matriks polimer. Saat elektron diinjeksikan dari elektroda atau dihasilkan dari ionisasi termal, mereka dengan cepat terperangkap dalam *deep traps* ini. Energi

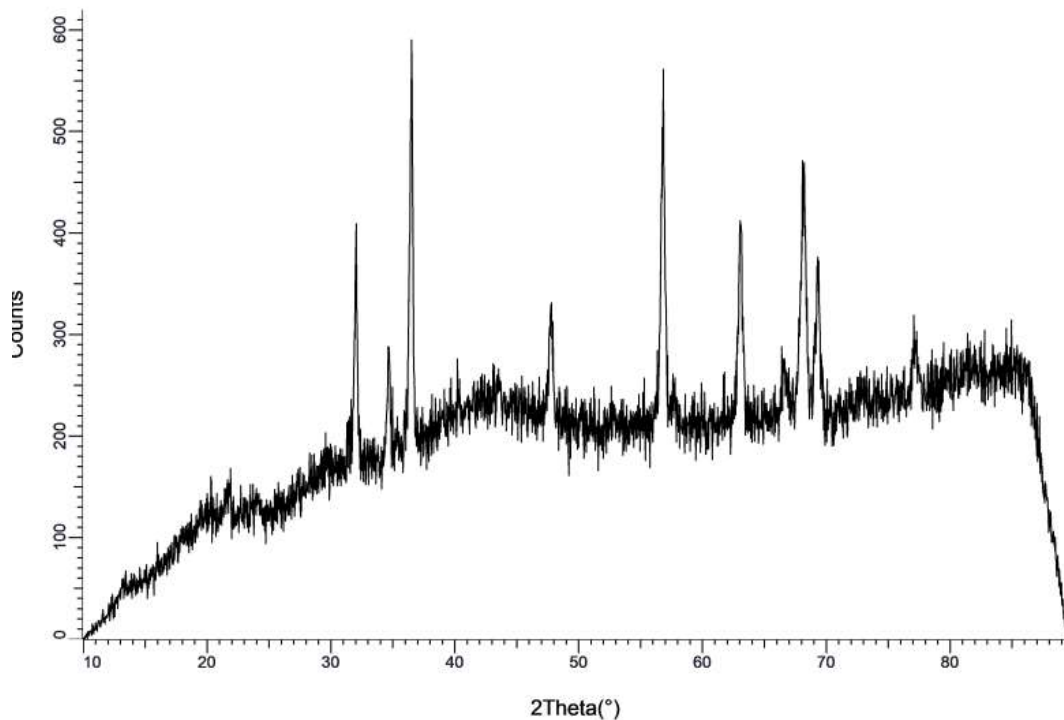
termal pada suhu operasi normal tidak cukup untuk membebaskan muatan tersebut (*detrapping*). Akibatnya, mobilitas efektif pembawa muatan menurun drastis. Berdasarkan hukum konduktivitas, penurunan mobilitas ini secara langsung mereduksi konduktivitas material dan arus bocor. Muatan yang terperangkap secara permanen di dekat elektroda membentuk lapisan muatan homopolar (*homocharge*). Lapisan ini memodifikasi distribusi medan listrik lokal, mengurangi intensitas medan di antarmuka elektroda, dan pada akhirnya menghambat injeksi muatan lebih lanjut[29].

### 4.3 Uji Karakteristik *X-Ray Diffraction* (XRD)

Indeks kristal dari material bionanokomposisi dapat diketahui menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD). Sifat dielektrik polimer semikristalin seperti LLDPE sangat dipengaruhi oleh morfologi kristalnya, karena fase kristalin dan amorf memiliki respons yang berbeda terhadap medan listrik dan transportasi muatan. Dari pengujian XRD tersebut, didapatkan data yang diplot ke dalam grafik sebagai berikut:



**Gambar 4.3** Hasil uji XRD sampel S1



**Gambar 4.4** Hasil uji XRD sampel S2

Data XRD dari sampel S1 dan S2 dianalisis untuk menentukan parameter kunci seperti posisi puncak difraksi intensitas, ukuran kristalit, dan derajat kristalinitas. Ringkasan parameter tersebut disajikan dalam Tabel 4.2

**Tabel 4.2** Parameter Kristalografi Sampel Nanosilika

Parameter	Sampel S1 (1,5%)	Sampel S2 (6,0%)
Puncak Difraksi ( $2\theta$ )	21,83°	21,91°
Posisi Amorf ( $2\theta$ )	19,86°	19,97°
Intensitas Puncak ( $I_c$ )	145,0 counts	168,0 counts
Intensitas Amorf ( $I_{am}$ )	134,0 counts	138,0 counts
FWHM ( $\beta$ )	2,733°	1,433°
Jarak Antar Atom	4,12 Å	4,10 Å
Ukuran Kristal (D)	30,94 Å	59,11 Å
Indeks Kristal (CRI)	7,59%	17,86%

Dari Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 kita dapat melihat 2 pola XRD dengan penambahan nanosilika. Untuk penambahan 1,5% nanosilika (S1) didapatkan posisi puncak difraksi adalah  $2\theta = 21,83^\circ$  dan posisi amorf  $2\theta = 19,86^\circ$ . Untuk pengujian dengan penambahan 6% nanosilika (S2) didapatkan posisi puncak

difraksi adalah  $2\theta = 21,91^\circ$  dan posisi amorf  $2\theta = 19,97^\circ$ . Terjadi pergeseran nilai  $2\theta$  dari  $21,83^\circ$  ke  $21,91^\circ$ . Hal ini membuktikan bahwa penambahan nanosilika menyebabkan penyusutan jarak antar atom dari  $4,12 \text{ \AA}$  menjadi  $4,10 \text{ \AA}$  yang berarti struktur menjadi lebih rapat. Penyusutan ini mengindikasikan terjadinya pemadatan struktur kristal. Kehadiran nanosilika dalam konsentrasi tinggi memberikan efek kompresi pada kisi kristal polimer atau membatasi volume bebas di antara rantai polimer.

Pada pengujian ini juga dapat dilihat ukuran partikel dari masing masing sampel. Parameter FWHM (*Full Width at Half Maximum*) memberikan informasi krusial mengenai kualitas dan ukuran kristalit. Data menunjukkan penurunan nilai FWHM yang tajam dari  $2,733^\circ$  pada S1 menjadi  $1,433^\circ$  pada S2. Dalam kristalografi, penyempitan puncak difraksi berbanding terbalik dengan ukuran kristalit, sebagaimana dijelaskan oleh persamaan Scherrer.

Perhitungan menggunakan persamaan ini didapatkan data untuk sampel S1 memiliki ukuran partikel  $30,94 \text{ \AA}$  dan untuk sampel S2 memiliki ukuran partikel  $59,11 \text{ \AA}$ . Peningkatan ukuran kristalit ini mengindikasikan bahwa pada konsentrasi 6%, nanosilika tidak hanya memicu pembentukan inti baru, tetapi juga memfasilitasi pertumbuhan kristal yang lebih sempurna dan berdimensi lebih besar. Hal ini mungkin disebabkan oleh efek "templat" dari permukaan silika yang memungkinkan rantai polimer tersusun lebih rapi dan panjang sebelum terganggu oleh daerah amorf[31]. Kristalit yang lebih besar dan lebih sempurna memiliki implikasi positif terhadap sifat dielektrik. Daerah kristalin dalam polietilena memiliki kerapatan yang lebih tinggi dan mobilitas pembawa muatan yang jauh lebih rendah dibandingkan daerah amorf. Oleh karena itu, domain kristal yang lebih besar berfungsi sebagai blokade yang lebih efektif terhadap pergerakan elektron dan inisiasi *electrical treeing*[32].

Untuk menentukan indeks kristalinitas dihitung dengan membandingkan area puncak kristalin terhadap area total (kristalin+amorf). Untuk sampel S1 indeks kristalinitasnya 7,59% dan untuk Sampel S2 indeks kristalinitasnya 17,86%. Dari hasil persamaan yang didapatkan dapat dilihat bahwa penambahan 6% nanosilika meningkatkan kristalinitas dari 7,59% menjadi 17,86%. Peningkatan lebih dari dua kali lipat ini memberikan bukti kuat bahwa nanosilika bertindak sebagai *nucleating agent* yang sangat efisien bagi matriks LLDPE[33]. Secara termodinamika, kristalisasi polimer dari lelehan membutuhkan barier energi untuk pembentukan inti kristal. Rantai polimer LLDPE memerlukan permukaan substrat untuk mulai melipat dan menyusun diri menjadi lamella kristal. Nanopartikel silika, dengan rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi, menyediakan densitas situs nukleasi yang masif di dalam matriks polimer. Kehadiran permukaan padat ini menurunkan energi bebas Gibbs yang diperlukan untuk pembentukan inti kristal stabil, sehingga mempercepat laju kristalisasi dan meningkatkan volume fraksi kristal yang terbentuk[34]. Temuan ini konsisten dengan literatur yang melaporkan bahwa inkorporasi *filler* anorganik dapat memicu kristalisasi pada suhu yang lebih

tinggi atau laju pendinginan yang lebih cepat, menghasilkan struktur semikristalin yang lebih teratur[35]. Peningkatan intensitas puncak kristal ( $I_c$ ) dari 145 pada S1 menjadi 168 *counts* pada S2 semakin mengonfirmasi bahwa fase kristalin menjadi lebih dominan dalam struktur material seiring bertambahnya muatan *filler*.

#### 4.4 Korelasi Arus Bocor dengan Struktur Kristal

Analisis antara arus bocor dan struktur kristal mengungkap hubungan kausalitas yang kuat.

##### 1. Kristalinitas sebagai Determinan Resistivitas

Daerah amorf dalam polimer semikristalin adalah titik lemah dielektrik. Ketidakteraturan rantai dan volume bebas yang besar di daerah amorf memudahkan injeksi dan transportasi muatan, serta lebih rentan terhadap serangan oksidasi dan tembus listrik (*breakdown*). Peningkatan kristalinitas dari 7,59% menjadi 17,86% pada S2 secara efektif mengurangi proporsi amorf dan menggantinya dengan kristal. Struktur kristal yang teratur memiliki *band gap* yang lebih stabil dan densitas trap yang berbeda, yang secara kolektif meningkatkan impedansi material terhadap arus bocor.

##### 2. Peran Ganda Antarmuka Kristal Amorf

Peningkatan ukuran kristalit pada S2 menciptakan luas antarmuka kristal-amorf yang lebih besar. Area antarmuka ini bersama dengan antarmuka partikel polimer merupakan lokasi utama keberadaan *deep traps*. Fenomena pada S2 mengintegrasikan keunggulan perangkat muatan dari nanopartikel dengan stabilitas fisik dari kristal polimer. Hal ini menciptakan sinergi dimana muatan yang mencoba bergerak tidak hanya terhambat oleh hamburan fisik partikel, tetapi juga terperangkap dalam sumur energi di perbatasan kristal, secara efektif memblokir arus bocor.

