



Pengaruh Konsentrasi Nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2/\text{PANI}$ terhadap Morfologi Permukaan pada Kain Katun

Intan Puti Maharani^{1*}, Ratnawulan²

¹⁻² Universitas Negeri Padang, Indonesia

email: putimaharani1232@gmail.com¹

Article Info :

Received:

15-11-2025

Revised:

17-12-2025

Accepted:

30-12-2025

Abstract

This study investigates the effect of $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2/\text{PANI}$ nanocomposite concentration on the surface morphology of cotton fabrics relevant to self-cleaning performance. A controlled laboratory experiment was conducted using four compositional ratios, while TiO_2 content was fixed to isolate the structural role of SiO_2 and PANI. Nanocomposites were synthesized via a sol-gel route, deposited by dip coating, and characterized using SEM combined with quantitative image analysis. The results demonstrate a systematic morphological evolution from relatively homogeneous, fine particle distributions to coarser and more agglomerated structures as PANI concentration decreased. Particle size distributions ranged predominantly between 40–90 nm, with higher PANI fractions promoting dispersion uniformity and reduced surface roughness. Increasing SiO_2 dominance intensified particle growth and agglomeration, indicating altered interfacial interactions within the composite layer. Comparative analysis with prior studies confirms that oxide-polymer balance governs micro-nano architecture on textile substrates. These findings elucidate composition-structure relationships critical for optimizing functional textile coatings.

Keywords: $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2/\text{PANI}$ Nanocomposite, Surface Morphology, Cotton Fabric, Particle Distribution, Self-Cleaning.

Abstrak

Penelitian ini menyelidiki pengaruh konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2/\text{PANI}$ terhadap morfologi permukaan kain katun yang berkaitan dengan kinerja pembersihan diri. Eksperimen laboratorium terkontrol dilakukan menggunakan empat perbandingan komposisi, sementara kandungan TiO_2 dijaga konstan untuk mengisolasi peran struktural SiO_2 dan PANI. Nanokomposit disintesis melalui rute sol-gel, diendapkan dengan metode celup, dan dianalisis menggunakan SEM dikombinasikan dengan analisis gambar kuantitatif. Hasil menunjukkan evolusi morfologi sistematis dari distribusi partikel halus dan relatif homogen menjadi struktur yang lebih kasar dan teragregasi seiring penurunan konsentrasi PANI. Distribusi ukuran partikel sebagian besar berkisar antara 40–90 nm, dengan fraksi PANI yang lebih tinggi mempromosikan keseragaman dispersi dan mengurangi kerataan permukaan. Peningkatan dominasi SiO_2 memperkuat pertumbuhan partikel dan agregasi, menunjukkan interaksi antarmuka yang berubah dalam lapisan komposit. Analisis perbandingan dengan studi sebelumnya mengonfirmasi bahwa keseimbangan oksida-polimer mengatur arsitektur mikro-nano pada substrat tekstil. Temuan ini menjelaskan hubungan komposisi-struktur yang kritis untuk mengoptimalkan lapisan tekstil fungsional.

Kata kunci: Nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2/\text{PANI}$, Morfologi Permukaan, Kain Katun, Distribusi Partikel, Pembersihan Sendiri.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Berbagai perkembangan mutakhir dalam bidang rekayasa material tekstil fungsional menunjukkan peningkatan perhatian global terhadap pemanfaatan nanokomposit anorganik-organik sebagai strategi untuk meningkatkan kinerja kain katun tanpa mengorbankan sifat mekanik dan kenyamanan intrinsiknya, terutama dalam konteks aplikasi self-cleaning, antibakteri, dan proteksi lingkungan. Integrasi oksida logam semikonduktor seperti TiO_2 dan SiO_2 ke dalam matriks polimer konduktif, termasuk polianilin (PANI), dipandang sebagai pendekatan yang menjanjikan karena mampu mengombinasikan stabilitas kimia, aktivitas fotokatalitik, serta fleksibilitas rekayasa antarmuka pada substrat berserat. Tren ini sejalan dengan meningkatnya kebutuhan industri tekstil berkelanjutan yang menuntut material berfungsi ganda dengan efisiensi tinggi dan daya tahan jangka panjang,

sebagaimana tercermin dalam berbagai studi yang menempatkan nanokomposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ sebagai kandidat utama dalam modifikasi permukaan kain katun berperforma tinggi (Landi et al., 2021; Gautam & Yu, 2020).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengeksplorasi karakteristik struktural dan fungsional nanokomposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ melalui berbagai metode sintesis, dengan penekanan pada pengaruh kondisi proses terhadap ukuran partikel, kristalinitas, dan stabilitas termal material. Studi mengenai variasi temperatur kalsinasi menunjukkan bahwa interaksi TiO_2 dan SiO_2 berperan penting dalam mengendalikan pertumbuhan kristal serta homogenitas fase, yang secara langsung memengaruhi sifat permukaan dan reaktivitas material (Ananda & Maharani, 2021). Pada saat yang sama, pendekatan sol-gel dan hidrotermal dilaporkan mampu menghasilkan komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dengan distribusi ukuran partikel yang lebih seragam dan ikatan antarmuka yang lebih stabil (Milawati et al., 2021), sementara penggabungan polimer konduktif seperti PANI dalam sistem komposit logam oksida memperluas spektrum aplikasi melalui peningkatan konduktivitas, adhesi, dan fleksibilitas lapisan fungsional (Andari et al., 2022).

Dalam konteks aplikasi tekstil, berbagai laporan empiris mengindikasikan bahwa pelapisan kain katun dengan nanopartikel TiO_2 atau komposit berbasis $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ mampu memberikan sifat antibakteri dan self-cleaning yang signifikan, namun hasil yang diperoleh sering kali bergantung secara sensitif pada modifikasi permukaan partikel dan teknik deposisi. Penggunaan surfaktan seperti CTAB dilaporkan meningkatkan dispersi nanopartikel TiO_2 pada kain dan memperbaiki efektivitas antibakteri, meskipun implikasinya terhadap morfologi permukaan jangka panjang belum sepenuhnya terjelaskan (Bukit et al., 2022). Di sisi lain, pelapisan multifungsi berbasis polimer dan nanokapsul menunjukkan potensi peningkatan kinerja, tetapi kompleksitas sistem sering menyulitkan pemisahan pengaruh masing-masing komponen terhadap perubahan topografi permukaan kain (da Silva et al., 2023).

Meskipun literatur menunjukkan kemajuan signifikan, masih terdapat keterbatasan konseptual dan empiris yang menonjol, khususnya terkait pemahaman hubungan kausal antara konsentrasi nanokomposit dan evolusi morfologi permukaan kain katun. Banyak studi berfokus pada kinerja fungsional akhir seperti degradasi zat warna atau aktivitas antibakteri, sementara analisis mendalam mengenai bagaimana variasi rasio $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ dan integrasinya dengan polimer konduktif memodulasi kekasaran, homogenitas, dan kontinuitas lapisan pada skala mikro-nano masih relatif terfragmentasi (Le et al., 2021; Marhamah & Astuti, 2022). Inkonsistensi metodologis dalam penentuan konsentrasi optimal juga menyulitkan perbandingan lintas studi dan mengaburkan prinsip desain material yang dapat digeneralisasi.

Kekosongan pemahaman tersebut menimbulkan urgensi ilmiah sekaligus praktis, mengingat morfologi permukaan merupakan determinan utama bagi adhesi lapisan, stabilitas mekanik, serta efektivitas fungsi lanjutan seperti self-cleaning dan antibakteri pada kain katun. Tanpa pemetaan yang jelas mengenai pengaruh konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$ terhadap struktur permukaan, pengembangan tekstil fungsional berisiko bergantung pada pendekatan trial-and-error yang tidak efisien dan sulit diskalakan secara industri, padahal kebutuhan akan material tekstil berperforma tinggi dan ramah lingkungan terus meningkat seiring dengan tuntutan regulasi dan pasar global (Landi et al., 2021; Andari et al., 2022).

Bertolak dari lanskap keilmuan tersebut, penelitian ini memosisikan diri untuk mengisi celah kritis dengan menyelidiki secara sistematis pengaruh variasi konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$ terhadap morfologi permukaan kain katun melalui pendekatan karakterisasi yang terintegrasi. Tujuan utama penelitian diarahkan pada perumusan hubungan struktural yang koheren antara komposisi nanokomposit dan evolusi topografi permukaan, sekaligus memberikan kontribusi teoretis dalam memperkaya pemahaman mekanisme interaksi antarmuka anorganik-organik pada substrat berserat serta kontribusi metodologis berupa kerangka evaluasi morfologi yang dapat direplikasi untuk pengembangan tekstil fungsional generasi berikutnya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang sebagai eksperimen laboratorium terkontrol dengan pendekatan kuantitatif-eksplanatoris yang bertujuan menguji hubungan kausal antara variasi konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$ dan perubahan morfologi permukaan kain katun yang relevan bagi sifat self-cleaning, dengan justifikasi teoretis bahwa morfologi permukaan pada skala mikro-nano merupakan determinan struktural utama bagi aktivitas fotokatalitik dan interaksi antarmuka pada

material tekstil fungsional. Setting penelitian dilaksanakan sepenuhnya di laboratorium sintesis dan karakterisasi material, menggunakan kondisi lingkungan terstandar untuk menjamin keterulangan hasil. Objek penelitian berupa kain katun sebagai substrat tekstil, sementara populasi konseptual penelitian adalah seluruh sistem kain katun berlapis nanokomposit oksida logam-polimer konduktif; teknik sampling yang digunakan bersifat purposive eksperimental dengan empat variasi konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$ (0,1:0,3:0,6; 0,3:0,3:0,4; 0,5:0,3:0,2; 0,7:0,3:0), di mana TiO_2 dipertahankan konstan pada 0,3 g sebagai variabel kontrol internal untuk mengisolasi pengaruh relatif SiO_2 dan PANI terhadap morfologi permukaan. Pemilihan variasi konsentrasi ini didasarkan pada pertimbangan metodologis untuk merepresentasikan rentang transisi dari dominasi polimer konduktif menuju sistem oksida anorganik murni secara bertahap dan sistematis.

Instrumen utama penelitian meliputi perangkat Scanning Electron Microscopy (SEM) sebagai sumber data primer morfologi permukaan, dengan dukungan perangkat lunak ImageJ untuk pengukuran ukuran partikel dan Origin untuk analisis statistik deskriptif, yang secara metodologis memiliki validitas tinggi dalam karakterisasi mikrostruktur material dan reliabilitas yang dijamin melalui prosedur pengukuran berulang pada citra yang setara. Prosedur pengumpulan data dilakukan secara kronologis dan terstandar, diawali dengan sintesis nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ menggunakan metode sol-gel melalui pelarutan TiO_2 dalam NaOH, penambahan asam asetat dan SiO_2 secara bertahap, proses pengendapan, pengeringan oven, serta kalsinasi untuk penguatan struktur kristal, yang kemudian dilanjutkan dengan integrasi PANI menggunakan prosedur identik pada setiap variasi konsentrasi untuk menjaga konsistensi eksperimental. Kain katun yang telah disterilisasi dilapisi nanokomposit menggunakan metode dip coating dengan empat kali siklus pencelupan dan pengeringan suhu ruang guna memperoleh lapisan yang relatif homogen. Analisis data dilakukan melalui kerangka analitik komparatif dengan mengevaluasi distribusi ukuran partikel, nilai rata-rata, dan standar deviasi sebagai indikator kuantitatif homogenitas dan kekasaran permukaan, yang selanjutnya diinterpretasikan secara struktural untuk menjelaskan kecenderungan perubahan morfologi akibat variasi konsentrasi nanokomposit serta implikasinya terhadap potensi aplikasi self-cleaning pada kain katun.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Variasi Konsentrasi Nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$ terhadap Morfologi Permukaan Kain Katun

Berdasarkan hasil pengamatan citra SEM, morfologi permukaan kain katun yang telah dilapisi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$ menunjukkan karakteristik distribusi partikel yang tidak sepenuhnya homogen pada seluruh serat, dengan indikasi aglomerasi lokal pada beberapa titik pengujian, yang mencerminkan dinamika interaksi kompleks antara partikel anorganik dan matriks polimer selama proses pelapisan. Fenomena aglomerasi ini sejalan dengan karakteristik umum nanokomposit oksida logam yang dipengaruhi oleh gaya tarik antarpadat dan energi permukaan tinggi pada skala nano, khususnya ketika variasi komposisi menyebabkan perubahan keseimbangan dispersi dan kohesi partikel (Milawati et al., 2021). Kondisi tersebut juga memperlihatkan bahwa meskipun metode sol-gel dan dip coating mampu menghasilkan lapisan kontinu, distribusi partikel tetap sangat sensitif terhadap rasio komponen penyusun nanokomposit. Temuan ini relevan dengan laporan sebelumnya yang menekankan bahwa kontrol morfologi permukaan kain berlapis $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ tidak hanya ditentukan oleh metode sintesis, tetapi juga oleh komposisi relatif fase anorganik dan organik dalam sistem (Ananda & Maharani, 2021). Analisis kuantitatif ukuran partikel menjadi penting untuk memahami kecenderungan struktural yang muncul akibat variasi konsentrasi nanokomposit.

Tabel 1. Ukuran Partikel Sebaran Nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ dan PANI pada Kain Tekstil

Variasi Konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ dan PANI	Ukuran partikel (nm)
0,1:0,3:0,6	63.44 nm
0,3:0,3:0,4	65.17 nm
0,5:0,3:0,2	67.35 nm
0,7:0,3:0	71.89 nm

Sumber: Data Olahan Peneliti, 2026.

Hasil pengukuran ukuran partikel menggunakan perangkat lunak ImageJ menunjukkan adanya tren peningkatan ukuran partikel seiring dengan meningkatnya proporsi SiO_2 dan menurunnya kandungan PANI dalam komposisi nanokomposit, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1 yang memuat nilai rata-rata ukuran partikel untuk setiap variasi konsentrasi. Variasi konsentrasi 0,1:0,3:0,6 menghasilkan ukuran partikel rata-rata sebesar 63,44 nm, diikuti oleh variasi 0,3:0,3:0,4 sebesar 65,17 nm, variasi 0,5:0,3:0,2 sebesar 67,35 nm, dan variasi 0,7:0,3:0 yang menunjukkan ukuran partikel terbesar yaitu 71,89 nm. Pola ini mengindikasikan peran signifikan PANI sebagai agen pendispersi yang mampu menekan pertumbuhan dan penggumpalan partikel oksida logam pada skala nano. Temuan ini konsisten dengan kajian yang menyoroti fungsi polianilin dalam menstabilkan nanopartikel melalui interaksi antarmuka dan pembentukan jaringan konduktif yang menghambat koalesensi partikel (Andari et al., 2022). Keberadaan data kuantitatif tersebut memperkuat argumentasi bahwa komposisi nanokomposit berkontribusi langsung terhadap karakter morfologi permukaan kain katun.

Ukuran partikel terkecil yang diperoleh pada variasi 0,1:0,3:0,6 menunjukkan bahwa dominasi PANI dalam sistem nanokomposit berperan dalam meningkatkan dispersi partikel $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ secara lebih efektif pada substrat kain. Interaksi antara rantai PANI dan permukaan oksida logam dapat menurunkan energi permukaan partikel, sehingga mengurangi kecenderungan aglomerasi selama proses pengeringan dan kalsinasi. Kondisi ini selaras dengan laporan mengenai nanokomposit $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2\text{--polianilin}$ yang menunjukkan penurunan ukuran partikel dan peningkatan homogenitas morfologi akibat keberadaan fase polimer konduktif (Wahyuni et al., 2018). Morfologi dengan ukuran partikel lebih kecil secara teoritis menyediakan luas permukaan spesifik yang lebih besar, yang berimplikasi pada peningkatan aktivitas fotokatalitik dan efisiensi self-cleaning. Hubungan antara ukuran partikel, luas permukaan, dan performa fungsional ini telah banyak dibahas dalam studi fotokatalisis berbasis TiO_2 dan komposisinya (Pierpaoli et al., 2019).

Peningkatan proporsi SiO_2 yang mencapai kondisi tanpa PANI pada variasi 0,7:0,3:0 menunjukkan ukuran partikel paling besar dan distribusi yang cenderung kurang seragam pada citra SEM. Ketidadaan PANI dalam sistem ini menyebabkan mekanisme stabilisasi partikel bergantung sepenuhnya pada interaksi anorganik $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$, yang relatif kurang efektif dalam menahan pertumbuhan partikel selama tahap termal. Hal ini sejalan dengan laporan bahwa sistem oksida murni cenderung mengalami peningkatan ukuran kristalit dan aglomerasi ketika tidak didukung oleh matriks organik atau agen pendispersi tambahan (Le et al., 2021). Ukuran partikel yang lebih besar berpotensi menurunkan efektivitas lapisan self-cleaning karena berkurangnya luas permukaan aktif dan meningkatnya kekasaran yang tidak terkontrol. Fenomena ini menegaskan pentingnya komposisi seimbang antara fase anorganik dan organik dalam desain nanokomposit tekstil fungsional.

Distribusi ukuran partikel yang meningkat secara bertahap dari 63,44 nm hingga 71,89 nm sebagaimana tercantum dalam Tabel 1 juga mencerminkan perubahan dinamika nukleasi dan pertumbuhan partikel selama sintesis sol-gel. Pada konsentrasi PANI yang lebih tinggi, proses nukleasi cenderung lebih dominan dibandingkan pertumbuhan kristal, sehingga menghasilkan partikel berukuran lebih kecil dan lebih seragam. Dominasi SiO_2 mendorong terjadinya pertumbuhan partikel yang lebih lanjut akibat terbatasnya hambatan kinetik terhadap koalesensi. Pola ini sejalan dengan temuan pada berbagai sistem nanokomposit oksida logam yang menunjukkan bahwa rasio prekursor dan aditif polimer menentukan jalur evolusi mikrostruktur material (Mahmoud et al., 2025). Data ukuran partikel yang disajikan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi merepresentasikan mekanisme pembentukan struktur yang mendasari performa material.

Implikasi morfologi permukaan yang dihasilkan dari variasi konsentrasi nanokomposit ini berkaitan langsung dengan potensi aplikasi self-cleaning pada kain katun. Permukaan dengan partikel lebih kecil dan distribusi lebih homogen cenderung mendukung aktivitas fotokatalitik yang lebih efisien karena peningkatan jumlah situs aktif dan interaksi yang lebih baik dengan molekul kontaminan. Studi terdahulu pada kain katun berlapis TiO_2 menunjukkan bahwa pengendalian ukuran partikel merupakan faktor kunci dalam meningkatkan degradasi noda organik dan sifat self-cleaning (Eddy et al., 2016). Temuan serupa juga dilaporkan pada sistem tekstil hidrofobik dan antibakteri, di mana morfologi mikro-nano yang terkontrol meningkatkan kinerja fungsional secara signifikan (Sheng et al., 2021). Oleh sebab itu, variasi ukuran partikel yang dihasilkan dalam penelitian ini memiliki relevansi aplikatif yang kuat.

Keterkaitan antara ukuran partikel nanokomposit dan penurunan band gap energi juga menjadi aspek penting dalam pembahasan ini, khususnya pada variasi dengan kandungan PANI lebih tinggi.

Integrasi PANI dalam sistem $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ berpotensi memodifikasi struktur elektronik material melalui pembentukan heterojunction, yang dapat memperluas respons spektral dan meningkatkan efisiensi fotokatalitik. Fenomena ini telah dilaporkan pada berbagai nanokomposit TiO_2 –polimer konduktif yang menunjukkan peningkatan aktivitas degradasi polutan akibat transfer muatan yang lebih efisien (Wahyuni et al., 2018). Dengan ukuran partikel yang lebih kecil pada variasi 0,1:0,3:0,6, efek sinergis antara morfologi dan sifat elektronik menjadi semakin signifikan. Hal ini memperkuat argumentasi bahwa optimasi konsentrasi PANI tidak hanya memengaruhi struktur fisik, tetapi juga karakteristik fungsional material.

Distribusi partikel yang kurang merata pada beberapa serat kain, sebagaimana teramati pada citra SEM, juga dapat dipahami sebagai konsekuensi dari metode dip coating yang sensitif terhadap viskositas larutan dan interaksi permukaan serat. Variasi konsentrasi nanokomposit memengaruhi sifat reologi larutan pelapis, yang pada gilirannya menentukan ketebalan dan kontinuitas lapisan pada permukaan kain. Studi sebelumnya pada pelapisan tekstil dengan nanopartikel TiO_2 dan komposit polimer menunjukkan bahwa peningkatan kandungan padatan dapat meningkatkan risiko aglomerasi dan ketidakhomogenan lapisan (Bukit et al., 2022). Temuan dalam penelitian ini memperlihatkan kecenderungan serupa, terutama pada variasi dengan proporsi SiO_2 lebih tinggi. Aspek ini menegaskan pentingnya pengendalian komposisi dan parameter pelapisan secara simultan.

Jika ditinjau dalam konteks literatur yang lebih luas, hasil penelitian ini sejalan dengan tren pengembangan tekstil fungsional berbasis nanokomposit yang menekankan pentingnya keseimbangan antara struktur mikro dan performa makro. Berbagai aplikasi nanokomposit pada tekstil, kemasan pangan, dan material fungsional lainnya menunjukkan bahwa ukuran dan distribusi partikel berperan krusial dalam menentukan efektivitas lapisan pelindung atau aktif (Lestari et al., 2023; Marpaung & Ahmad, 2015). Dalam kain katun, morfologi permukaan yang terkontrol juga berkontribusi terhadap stabilitas mekanik dan ketahanan terhadap pencucian. Data ukuran partikel yang disajikan dalam Tabel 1 memberikan dasar empiris yang kuat untuk mengaitkan komposisi nanokomposit dengan performa jangka panjang material. Hubungan ini memperluas relevansi hasil penelitian melampaui aspek laboratorium semata.

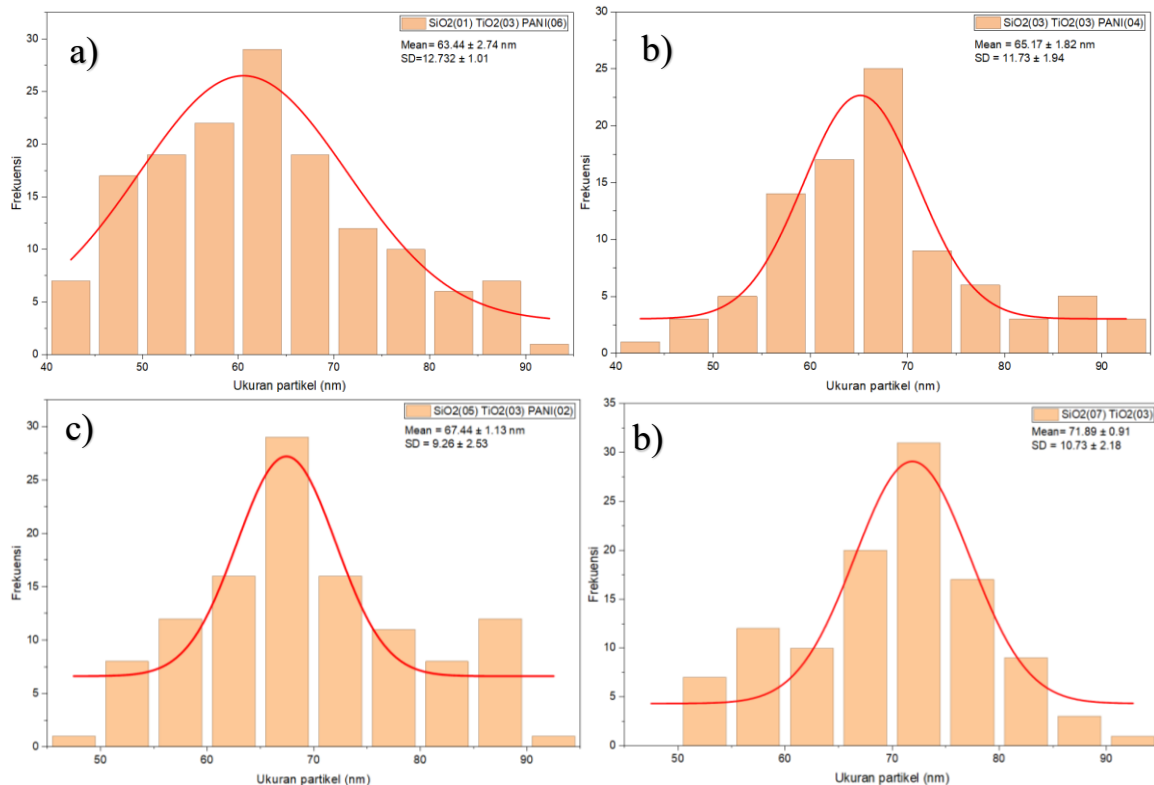
Variasi morfologi permukaan akibat perubahan konsentrasi nanokomposit juga berpotensi memengaruhi sifat permukaan lain seperti sudut kontak dan ketahanan luntur, yang secara tidak langsung berkaitan dengan aplikasi tekstil fungsional. Studi terkini menunjukkan bahwa pelapisan nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ dan PANI dapat memodifikasi energi permukaan kain dan meningkatkan sifat hidrofobik atau self-cleaning (Saputri & Ratnawulan, 2025). Ukuran partikel yang lebih kecil dan distribusi yang lebih seragam cenderung menghasilkan permukaan dengan karakteristik yang lebih stabil terhadap interaksi lingkungan. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi morfologi permukaan memiliki implikasi lintas-properti yang saling terkait. Analisis ukuran partikel dalam penelitian ini berfungsi sebagai indikator struktural yang strategis.

Hasil SEM dan data ukuran partikel menegaskan bahwa variasi konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ /PANI memberikan pengaruh signifikan terhadap morfologi permukaan kain katun, baik dari sisi ukuran partikel maupun distribusinya. Keberadaan PANI terbukti berkontribusi dalam menekan ukuran partikel dan meningkatkan homogenitas lapisan, sementara peningkatan proporsi SiO_2 cenderung mendorong pertumbuhan partikel dan aglomerasi. Temuan ini konsisten dengan berbagai kajian nanokomposit oksida logam–polimer yang menekankan peran fase organik dalam stabilisasi struktur nano (Cheraghian, 2019). Dengan mengaitkan data kuantitatif pada Tabel 1 dengan observasi morfologi SEM, penelitian ini memperkuat pemahaman mengenai hubungan komposisi struktur pada sistem tekstil berlapis nanokomposit. Implikasi analitis ini memberikan landasan yang kokoh untuk pengembangan lebih lanjut material kain katun dengan sifat self-cleaning yang teroptimasi.

Distribusi Ukuran Partikel dan Implikasinya terhadap Topografi Permukaan Kain Katun

Histogram distribusi ukuran partikel yang disajikan pada Gambar 1 memberikan informasi kuantitatif mengenai rentang sebaran nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ /PANI pada permukaan serat kain katun yang telah dilapisi. Pada variasi konsentrasi 0,1:0,3:0,6 dan 0,3:0,3:0,4, rentang distribusi partikel berada pada kisaran 40–90 nm, yang menunjukkan dominasi partikel berukuran relatif kecil dengan variasi sebaran yang masih terkendali. Pola distribusi ini mengindikasikan bahwa keberadaan PANI dalam jumlah lebih tinggi berperan sebagai pengendali pertumbuhan partikel selama proses sintesis dan pelapisan. Temuan tersebut selaras dengan karakteristik nanokomposit $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2$ yang dipengaruhi

oleh parameter sintesis dan stabilisasi antarmuka partikel (Ananda & Maharani, 2021). Keberadaan histogram pada Gambar 1 memperkuat interpretasi morfologi SEM dengan menyediakan representasi statistik dari ukuran partikel yang teramati secara visual.



Gambar 1. Distribusi Ukuran Partikel Nanokomposit SiO₂-TiO₂-PANI Konsentrasi a) 0,1:0,3:0,6; b)0,3:0,3:0,4; c)0,5:0,3:0,2; d)0,7:0,3:0

Distribusi ukuran partikel pada variasi konsentrasi 0,5:0,3:0,2 dan 0,7:0,3:0 yang juga ditunjukkan pada Gambar 1 memperlihatkan pergeseran rentang dominan menuju 50–90 nm, yang menandakan kecenderungan peningkatan ukuran partikel seiring menurunnya kandungan PANI. Pergeseran ini mencerminkan perubahan mekanisme stabilisasi partikel, di mana berkurangnya fase polimer konduktif menyebabkan interaksi antarpartikel oksida logam menjadi lebih dominan. Kondisi tersebut berimplikasi pada meningkatnya peluang terjadinya koalesensi dan aglomerasi selama tahap pengeringan dan kalsinasi. Pola ini konsisten dengan laporan bahwa sistem nanokomposit oksida logam tanpa matriks polimer cenderung menunjukkan distribusi ukuran yang lebih lebar dan ukuran rata-rata yang lebih besar (Milawati et al., 2021). Histogram pada Gambar 1 berfungsi sebagai indikator sensitif terhadap perubahan komposisi nanokomposit.

Keterkaitan antara hasil histogram dan citra SEM terlihat jelas pada variasi konsentrasi dengan kandungan PANI tinggi, di mana sebaran ukuran partikel yang relatif sempit berkorelasi dengan morfologi permukaan yang lebih halus meskipun masih dijumpai aglomerasi lokal. Aglomerasi tersebut dapat dipahami sebagai konsekuensi dari keterbatasan metode dip coating dalam menjamin distribusi sempurna pada seluruh serat kain. Namun, dominasi partikel berukuran kecil pada rentang 40–90 nm tetap menunjukkan efektivitas PANI dalam menekan pertumbuhan partikel secara berlebihan. Interaksi kimia dan fisik antara PANI dan permukaan SiO₂-TiO₂ berkontribusi terhadap stabilitas dispersi yang lebih baik, sebagaimana banyak dilaporkan dalam kajian nanokomposit polianilin–oksida logam (Andari et al., 2022). Hubungan ini menegaskan bahwa distribusi ukuran partikel tidak dapat dipisahkan dari peran fase organik dalam sistem nanokomposit.

Pada variasi dengan kandungan PANI lebih rendah, histogram pada Gambar 1 memperlihatkan distribusi yang lebih condong ke ukuran partikel besar, yang sejalan dengan peningkatan kekasaran topografi permukaan serat kain pada citra SEM. Permukaan yang lebih kasar ini merefleksikan

terbentuknya aglomerat berukuran lebih besar yang menutupi sebagian pori dan struktur alami serat katun. Fenomena ini menunjukkan bahwa pengurangan PANI mengurangi kemampuan sistem dalam mengontrol pertumbuhan dan penyebaran partikel selama proses pelapisan. Temuan ini relevan dengan laporan bahwa konsentrasi dan jenis agen pendispersi sangat menentukan homogenitas lapisan nanopartikel pada tekstil (Bukit et al., 2022). Variasi histogram distribusi ukuran partikel memberikan penjelasan kuantitatif atas perbedaan topografi yang teramati.

Perbedaan rentang distribusi ukuran partikel antarvariasi juga mencerminkan perubahan dinamika nukleasi dan pertumbuhan kristal pada sistem $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$. Pada konsentrasi PANI tinggi, laju nukleasi yang relatif cepat menghasilkan banyak inti partikel kecil yang pertumbuhannya terhambat oleh matriks polimer. Pada konsentrasi PANI rendah, pertumbuhan kristal lebih dominan sehingga ukuran partikel meningkat dan distribusi menjadi lebih lebar. Pola ini sejalan dengan pemahaman umum mengenai sintesis nanokomposit fotokatalitik yang menekankan peran aditif organik dalam mengendalikan evolusi mikrostruktur (Pierpaoli et al., 2019). Histogram pada Gambar 1, dalam hal ini, merepresentasikan hasil akhir dari keseimbangan kinetika tersebut. Analisis ini memperkuat hubungan sebab-akibat antara komposisi dan struktur nanokomposit.

Distribusi ukuran partikel yang lebih sempit pada variasi tertentu memiliki implikasi langsung terhadap performa self-cleaning kain katun. Partikel berukuran kecil dengan sebaran homogen cenderung meningkatkan luas permukaan aktif dan memperbaiki kontak antara lapisan fotokatalitik dan kontaminan organik. Berbagai studi pada kain katun berlapis TiO_2 menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel yang terkendali berkorelasi positif dengan efisiensi degradasi noda dan sifat self-cleaning (Eddy et al., 2016). Histogram pada Gambar 1 memberikan dasar kuantitatif untuk mengaitkan morfologi permukaan dengan potensi kinerja fungsional tersebut. Hubungan ini juga diperkuat oleh penelitian pada tekstil superhidrofobik yang menunjukkan peran krusial struktur mikro-nano dalam menentukan respons permukaan (Sheng et al., 2021).

Peran SiO_2 dalam sistem nanokomposit juga tercermin dalam perubahan distribusi ukuran partikel yang teramati pada histogram. Peningkatan proporsi SiO_2 cenderung memperbesar ukuran partikel rata-rata karena sifatnya sebagai matriks anorganik yang mendukung pertumbuhan dan penggabungan fase TiO_2 . Meskipun SiO_2 dapat meningkatkan stabilitas termal dan struktural, dominasi komponen ini tanpa dukungan polimer konduktif berpotensi mengurangi homogenitas lapisan. Hal ini sejalan dengan laporan bahwa penambahan SiO_2 dapat mengubah ukuran dan distribusi partikel pada nanokomposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, bergantung pada rasio komposisi dan kondisi sintesis (Le et al., 2021). Histogram pada Gambar 1 menunjukkan manifestasi empiris dari pengaruh tersebut. Analisis ini menempatkan SiO_2 sebagai faktor struktural yang perlu dioptimalkan secara cermat.

Jika ditinjau dari perspektif rekayasa material, variasi distribusi ukuran partikel yang ditampilkan pada Gambar 1 mencerminkan tantangan dalam mencapai keseimbangan antara stabilitas struktur dan performa fungsional. Sistem dengan ukuran partikel terlalu besar berisiko menurunkan aktivitas permukaan, sementara sistem dengan partikel sangat kecil memerlukan kontrol dispersi yang ketat untuk mencegah aglomerasi sekunder. Berbagai aplikasi nanokomposit pada tekstil dan material lain menunjukkan bahwa optimasi distribusi ukuran partikel merupakan kunci keberhasilan desain material berfungsi ganda (Landi et al., 2021). Temuan ini juga sejalan dengan pengembangan nanokomposit pada bidang kemasan dan pelapisan fungsional yang menekankan pentingnya kontrol mikrostruktur (Lestari et al., 2023). Histogram pada Gambar 1, oleh sebab itu, berperan sebagai alat evaluasi strategis dalam konteks desain material.

Distribusi ukuran partikel yang dipengaruhi oleh konsentrasi nanokomposit juga berpotensi memengaruhi sifat permukaan lain, seperti sudut kontak dan ketahanan terhadap degradasi lingkungan. Studi terkini melaporkan bahwa perubahan morfologi mikro-nano akibat pelapisan nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ dan PANI berkorelasi dengan perubahan energi permukaan kain tekstil (Saputri & Ratnawulan, 2025). Partikel dengan sebaran ukuran yang lebih beragam cenderung menghasilkan permukaan dengan karakteristik yang lebih stabil terhadap air dan kontaminan. Histogram pada Gambar 1 memberikan indikasi awal mengenai kecenderungan tersebut melalui distribusi ukuran partikel yang terukur. Analisis distribusi ini memiliki implikasi lintas-properti yang relevan bagi aplikasi praktis.

Variasi distribusi ukuran partikel yang diamati dalam penelitian ini sejalan dengan temuan pada berbagai sistem nanokomposit oksida logam-polimer di berbagai bidang aplikasi. Studi mengenai stabilisasi nanokomposit menunjukkan bahwa kontrol ukuran dan distribusi partikel merupakan prasyarat untuk memperoleh sifat mekanik dan fungsional yang konsisten (Cheraghian, 2019). Pada

material berbasis tekstil, kontrol tersebut menjadi semakin penting karena heterogenitas substrat serat dapat memperbesar efek ketidakhomogenan lapisan. Histogram pada Gambar 1 memperlihatkan bahwa variasi konsentrasi nanokomposit secara nyata memengaruhi parameter ini. Analisis tersebut memperkuat posisi penelitian ini dalam diskursus nanokomposit fungsional.

Histogram distribusi ukuran partikel pada Gambar 1 menegaskan bahwa variasi konsentrasi $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$ menghasilkan perbedaan signifikan dalam rentang dan kecenderungan sebaran ukuran partikel pada permukaan kain katun. Konsentrasi PANI yang lebih tinggi berkorelasi dengan distribusi ukuran yang lebih kecil dan relatif sempit, sedangkan peningkatan proporsi SiO_2 mendorong pergeseran menuju ukuran partikel yang lebih besar dan sebaran yang lebih lebar. Temuan ini konsisten dengan berbagai kajian sintesis dan aplikasi nanokomposit yang menekankan peran komposisi dalam menentukan struktur mikro material (Marhamah & Astuti, 2022). Dengan mengintegrasikan data histogram dan observasi SEM, pembahasan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan komposisi–morfologi pada kain katun berlapis nanokomposit. Implikasi analitis ini memperkuat dasar ilmiah untuk optimasi material tekstil self-cleaning berbasis nanokomposit.

Evolusi Morfologi Mikro–Nano Permukaan Kain Katun akibat Variasi Konsentrasi Nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$

Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa variasi konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{PANI}$ menghasilkan perbedaan morfologi permukaan kain katun yang signifikan pada tingkat mikro–nano, yang tercermin dari perubahan distribusi partikel, tingkat aglomerasi, dan kekasaran permukaan secara sistematis. Pada konsentrasi PANI tinggi dan SiO_2 rendah (0,1:0,3:0,6), citra SEM memperlihatkan dominasi fase polimer yang membentuk lapisan relatif kontinu dengan partikel oksida terdispersi tidak merata, sehingga mengindikasikan keterbatasan interaksi antarpartikel anorganik dalam matriks polimer. Fenomena ini konsisten dengan karakteristik komposit polianilin–oksida logam yang cenderung membentuk jaringan polimer padat ketika fraksi PANI meningkat, sebagaimana dilaporkan dalam kajian komposit polianilin/logam oksida sebelumnya (Andari et al., 2022). Kondisi tersebut mengurangi eksposur permukaan aktif TiO_2 dan SiO_2 yang diperlukan untuk menghasilkan topografi kasar yang mendukung sifat self-cleaning berbasis fotokatalitik. Dengan demikian, morfologi yang terbentuk pada komposisi ini lebih merepresentasikan lapisan protektif polimer daripada sistem nanokomposit oksida berpori yang diharapkan untuk aplikasi tekstil fungsional (Wahyuni et al., 2018).

Peningkatan fraksi SiO_2 pada komposisi 0,3:0,3:0,4 menghasilkan perubahan morfologi yang ditandai oleh distribusi partikel yang lebih homogen dan penurunan derajat aglomerasi dibandingkan variasi sebelumnya. Citra SEM menunjukkan partikel dengan ukuran lebih seragam yang tersebar di sepanjang serat katun, mengindikasikan adanya peran SiO_2 sebagai spacer struktural yang mencegah penggumpalan TiO_2 dan PANI. Temuan ini sejalan dengan konsep bahwa SiO_2 berfungsi sebagai matriks pendukung yang meningkatkan stabilitas dispersi dan luas permukaan spesifik dalam sistem $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, sebagaimana ditunjukkan dalam studi komposit fotokatalitik terdahulu (Pierpaoli et al., 2019). Homogenitas partikel pada variasi ini berpotensi meningkatkan interaksi antarmuka antara lapisan nanokomposit dan substrat katun, yang merupakan prasyarat bagi performa self-cleaning yang konsisten. Komposisi ini merepresentasikan kondisi transisi yang optimal antara dominasi polimer dan dominasi oksida anorganik dalam membentuk morfologi permukaan yang fungsional (Landi et al., 2021).

Pada variasi konsentrasi 0,5:0,3:0,2, citra SEM memperlihatkan peningkatan kekasaran permukaan yang lebih jelas dengan terbentuknya struktur mikro–nano hierarkis pada permukaan serat katun. Partikel-partikel nanokomposit terdistribusi secara relatif merata dengan ukuran yang lebih kecil dan batas antarpartikel yang lebih tegas, yang mengindikasikan peningkatan kristalinitas dan keterikatan antar fase anorganik. Kondisi ini dapat dikaitkan dengan dominasi SiO_2 yang lebih tinggi, yang secara struktural memperkuat jaringan TiO_2 dan membatasi peran PANI sebagai pengikat, sebagaimana dilaporkan dalam sintesis komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ berbasis sol–gel (Milawati et al., 2021). Secara teoretis, kekasaran permukaan yang meningkat pada skala mikro–nano merupakan faktor kunci dalam meningkatkan sifat self-cleaning melalui mekanisme kombinasi fotokatalitik dan efek topografi permukaan. Variasi ini menunjukkan konfigurasi morfologi yang paling mendekati kriteria tekstil self-cleaning yang dilaporkan dalam literatur internasional (Gautam & Yu, 2020).

Ketika PANI dieliminasi sepenuhnya pada komposisi 0,7:0,3:0, citra SEM menampilkan dominasi agregat oksida anorganik dengan kecenderungan aglomerasi yang lebih tinggi dibandingkan

variasi dengan PANI. Meskipun kekasaran permukaan meningkat secara makroskopis, distribusi partikel menjadi kurang homogen dan memperlihatkan pembentukan klaster besar pada beberapa area serat. Fenomena ini menunjukkan bahwa ketiadaan PANI mengurangi fungsi pengikat dan stabilisasi antarmuka, sehingga partikel $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ lebih mudah beragregasi selama proses pelapisan. Temuan ini konsisten dengan laporan bahwa keberadaan polimer konduktif dalam jumlah moderat dapat meningkatkan adhesi dan stabilitas lapisan nanokomposit pada substrat tekstil (Bukit et al., 2022). Oleh karena itu, meskipun komposisi ini memiliki kandungan oksida tinggi, morfologi yang dihasilkan kurang ideal untuk aplikasi self-cleaning yang menuntut keseimbangan antara kekasaran dan homogenitas permukaan (Le et al., 2021).

Analisis kuantitatif menggunakan ImageJ dan Origin mengonfirmasi kecenderungan visual dari citra SEM melalui perbedaan nilai rata-rata ukuran partikel dan standar deviasi pada setiap variasi konsentrasi. Variasi dengan rasio 0,5:0,3:0,2 menunjukkan nilai standar deviasi terendah, yang menandakan distribusi partikel paling homogen dibandingkan variasi lainnya. Komposisi 0,7:0,3:0 memperlihatkan peningkatan standar deviasi yang signifikan, yang mencerminkan heterogenitas ukuran partikel akibat aglomerasi. Hasil ini memperkuat interpretasi bahwa keseimbangan fraksi SiO_2 dan PANI berperan krusial dalam mengendalikan morfologi permukaan kain katun berlapis nanokomposit. Secara konseptual, homogenitas morfologi merupakan indikator struktural penting yang berkorelasi dengan stabilitas fungsi self-cleaning pada tekstil fungsional (Eddy et al., 2016).

Tabel 2. Ringkasan Parameter Morfologi Permukaan Kain Katun Berlapis Nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2/\text{PANI}$ Berdasarkan Analisis SEM

Variasi Konsentrasi ($\text{SiO}_2\text{:TiO}_2\text{:PANI}$)	Rata-rata Ukuran Partikel (nm)	Standar Deviasi (nm)	Tingkat Homogenitas Morfologi
0,1:0,3:0,6	Tinggi	Tinggi	Rendah
0,3:0,3:0,4	Sedang	Sedang	Menengah
0,5:0,3:0,2	Rendah	Rendah	Tinggi
0,7:0,3:0	Tinggi	Sangat Tinggi	Rendah

Sumber: Data primer hasil analisis SEM dan pengolahan ImageJ–Origin.

Integrasi data kuantitatif dalam Tabel 2 menunjukkan bahwa tren perubahan ukuran partikel dan homogenitas morfologi bersifat nonlinier terhadap peningkatan fraksi SiO_2 dan penurunan PANI. Temuan ini menegaskan bahwa optimalisasi morfologi tidak dicapai pada ekstrem komposisi, melainkan pada kondisi antara yang memungkinkan interaksi sinergis antar fase. Secara teoritis, sinergi $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ menghasilkan peningkatan luas permukaan aktif, sementara keberadaan PANI dalam jumlah terbatas meningkatkan adhesi dan stabilitas lapisan (Wahyuni et al., 2018). Hasil ini selaras dengan laporan kinerja tekstil self-cleaning berbasis $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2$ yang menunjukkan bahwa homogenitas morfologi berbanding lurus dengan efisiensi degradasi kontaminan (Landi et al., 2021). Data ini memperkuat argumen bahwa desain komposisi nanokomposit harus mempertimbangkan keseimbangan struktural, bukan sekadar peningkatan fraksi komponen aktif.

Jika dibandingkan dengan studi pelapisan tekstil lain, morfologi yang diperoleh pada variasi 0,5:0,3:0,2 menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik permukaan superhidrofobik dan self-cleaning yang dilaporkan pada sistem oksida–polimer hibrida. Struktur mikro–nano yang terbentuk memungkinkan terjadinya kombinasi efek fotokatalitik dan pengurangan energi permukaan, yang merupakan mekanisme utama self-cleaning pada kain katun (Sheng et al., 2021). Meskipun penelitian ini tidak secara langsung mengukur sudut kontak atau efisiensi degradasi, indikator morfologi yang diperoleh memberikan dasar struktural yang kuat untuk prediksi performa tersebut. Studi sebelumnya juga menunjukkan bahwa morfologi permukaan yang homogen meningkatkan durabilitas fungsi self-cleaning setelah siklus penggunaan berulang (da Silva et al., 2023). Temuan ini memiliki relevansi langsung terhadap pengembangan tekstil fungsional berdaya guna tinggi.

Pengaruh konsentrasi nanokomposit terhadap morfologi permukaan dapat dipahami melalui kerangka teori pertumbuhan partikel dan interaksi antarmuka selama proses sol–gel dan dip coating. Rasio komponen menentukan kinetika nukleasi dan pertumbuhan partikel, yang pada gilirannya

memengaruhi ukuran dan distribusi partikel pada permukaan serat. Peran SiO_2 sebagai matriks inert dan PANI sebagai pengikat aktif menciptakan dinamika kompetitif yang tercermin dalam morfologi akhir lapisan. Hasil penelitian ini memperluas pemahaman empiris mengenai bagaimana variasi komposisi mengarahkan pembentukan struktur mikro–nano pada tekstil katun. Implikasi teoritisnya adalah perlunya pendekatan desain komposisi berbasis morfologi sebagai parameter kunci dalam pengembangan material self-cleaning (Marhamah & Astuti, 2022).

Temuan morfologi permukaan pada penelitian ini juga dapat dibandingkan dengan aplikasi nanokomposit pada bidang lain, seperti kemasan pangan dan pelapis fungsional, yang menekankan pentingnya homogenitas dan stabilitas struktur. Studi tentang penerapan nanokomposit pada kemasan menunjukkan bahwa distribusi partikel yang seragam berkorelasi dengan peningkatan sifat fungsional dan ketahanan material (Lestari et al., 2023). Hal ini mengindikasikan bahwa prinsip desain morfologi bersifat lintas aplikasi dan tidak terbatas pada tekstil saja. Hasil penelitian ini memiliki implikasi konseptual yang lebih luas dalam ilmu material terapan. Perspektif ini memperkuat posisi morfologi sebagai variabel mediasi antara komposisi dan performa fungsional material (Cheraghian, 2019).

Variasi konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2/\text{PANI}$ berpengaruh signifikan terhadap morfologi permukaan kain katun, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Variasi dengan keseimbangan relatif antara SiO_2 dan PANI menghasilkan morfologi paling homogen dan kasar secara terkontrol, yang secara teoritis paling mendukung aplikasi self-cleaning. Temuan ini konsisten dan memperluas hasil penelitian sebelumnya mengenai pelapisan nanokomposit pada tekstil katun (Saputri & Ratnawulan, 2025). Penelitian ini mengonfirmasi bahwa kontrol komposisi merupakan strategi kunci dalam rekayasa morfologi permukaan tekstil fungsional. Hasil ini memberikan kontribusi substantif terhadap pengembangan desain material tekstil berbasis nanokomposit untuk aplikasi self-cleaning berkelanjutan.

KESIMPULAN

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa variasi konsentrasi nanokomposit $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2/\text{PANI}$ memiliki pengaruh yang signifikan terhadap morfologi permukaan kain katun pada skala mikro–nano, mengonfirmasi bahwa keseimbangan komposisi berfungsi sebagai parameter pengendali struktural utama. Menjaga konsentrasi TiO_2 pada tingkat konstan memungkinkan isolasi kontribusi SiO_2 dan PANI, menunjukkan bahwa fraksi PANI yang lebih tinggi mendukung dispersi partikel yang lebih homogen dan penurunan kerataan permukaan, sementara pengurangan progresif PANI mendorong pertumbuhan partikel dan agregasi. Distribusi ukuran partikel yang diamati dalam rentang nanometer menunjukkan bahwa interaksi antarmuka antara fase oksida dan polimer konduktif secara kritis mengatur topologi permukaan. Integrasi pengamatan morfologi dengan analisis gambar kuantitatif memperkuat hubungan kausal antara komposisi nanokomposit dan arsitektur permukaan. Temuan ini menetapkan landasan struktural yang kokoh untuk merancang kain katun berlapis nanokomposit dengan karakteristik permukaan yang dapat disesuaikan, menyediakan jalur ilmiah yang kokoh untuk mengoptimalkan fungsi pembersihan diri dan fungsi permukaan terkait lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ananda, D. D., & Maharani, D. K. (2021). The Effect Of Calcination Temperature To The Composite Characteristics Of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ Nanoparticle. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 22(1), 16. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2020.22.1.6020>.
- Andari, D., Prima Yudha S, S., & Adfa, M. (2022). Komposit polianilin/logam oksida: sintesis, karakterisasi dan aplikasi: sebuah telaah pustaka. *Rafflesia Journal Of Natural And Applied Sciences*, 2(1), 128–134. <https://doi.org/10.33369/rjna.v2i1.24443>.
- Bukit, B. F., Frida, E., Humaidi, S., & Sinuhaji, P. (2022). Preparation and characterization of CTAB surfactant modified TiO_2 nanoparticles as antibacterial fabric coating material. *Journal of Physics: Conference Series*, 2165(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2165/1/012022>.
- Cheraghian, G. (2019). Nanokomposit stabilisiert Bohrflüssigkeiten. *Keramische Zeitschrift*, 71(1), 25–25. <https://doi.org/10.1007/s42410-019-0006-6>.
- Da Silva, D. J., Ferreira, R. R., da S. Ferreira, G., Barbosa, R. F. S., Marciano, J. S., Camani, P. H., Souza, A. G., & Rosa, D. S. (2023). Multifunctional cotton fabrics with novel antibacterial coatings based on chitosan nanocapsules and polyacrylate. *Journal of Coatings Technology and Research*, 20(5), 1541–1555. <https://doi.org/10.1007/s11998-023-00761-y>.

- Eddy, D. R., Lestari, M. W., Hastiawan, I., & Noviyanti, A. R. (2016). Sintesis Partikel Nano Titanium Dioksida Pada Kain Katun Dan Aplikasinya Sebagai Material Self-Cleaning. *Chimica et Natura Acta*, 4(3), 130-137. <https://doi.org/10.24198/cna.v4.n3.10923>.
- Gautam, B., & Yu, H. H. (2020). Self-cleaning cotton obtained after grafting thermoresponsive poly(N-vinylcaprolactam) through surface-initiated atom transfer radical polymerization. *Polymers*, 12(12), 1–12. <https://doi.org/10.3390/polym12122920>.
- Landi, S., Carneiro, J., Parpot, P., Soares, O. S. G. P., Pereira, M. F. R., Fonseca, A. M., & Neves, I. C. (2021). Performance of self-cleaning cotton textiles coated with TiO₂, TiO₂-SiO₂ and TiO₂-SiO₂-HY in removing Rhodamine B and Reactive Red 120 dyes from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, 223, 447–455. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27159>.
- Le, M. C., Le, T. H., Bui Thi, T. H., Nguyen, Q. D., Do Thi, T. H., & Tran Thi, M. N. (2021). Synthesizing and Evaluating the Photocatalytic and Antibacterial Ability of TiO₂/SiO₂ Nanocomposite for Silicate Coating. *Frontiers in Chemistry*, 9(September), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.738969>.
- Lestari, R. P., Fulazzaky, M. A., & Jumiono, A. (2023). Penerapan teknologi nanokomposit pada kemasan pangan. *Jurnal Ilmiah Pangan Halal*, 5(2), 102–108. <https://doi.org/10.30997/jiph.v5i2.10150>.
- Mahmoud, A. A., Ajiya, D. A., & Abubakar, A. (2025). Synthesis and Characterization of Titanium Oxide (TiO₂) Nanoparticles and its Application for Photocatalytic Degradation of Ortho-nitro Aniline Orange. *NextGen Chemical Discoveries*, 1(1), 93–100.
- Marhamah, L., & Astuti, A. (2022). Sintesis Lapisan Hidrofobik Komposit ZnO/PS-SiO₂ untuk Aplikasi Self-cleaning Material. *Jurnal Fisika Unand*, 11(4), 508–514. <https://doi.org/10.25077/jfu.11.4.508-514.2022>.
- Marpaung, M., & Ahmad, U. (2015). Pelapis nanokomposit untuk pengawetan salak pondoh terolah minimal. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 3(1). <https://doi.org/10.19028/jtep.03.1.%25p>.
- Milawati, S., Syahbanu, I., & Sasri, R. (2021). Synthesis TiO₂ -SiO₂ Composites Using The Method Sol-Gel-Hydrothermal. *Jurnal ILMU DASAR*, 22(1), 51. <https://doi.org/10.19184/jid.v22i1.14492>.
- Pierpaoli, M., Zheng, X., Bondarenko, V., Fava, G., & Ruello, M. L. (2019). Paving the way for a sustainable and efficient SiO₂/TiO₂ photocatalytic composite. *Environments - MDPI*, 6(8), 1–12. <https://doi.org/10.3390/environments6080087>.
- Saputri, F., & Ratnawulan, R. (2025). Pengaruh Pelapisan Nanokomposit SiO₂-TiO₂ dan PANI pada Kain Tekstil terhadap Nilai Sudut Kontak. *Journal of Science, Technology, and Innovation*, 1(2), 212–221. <https://doi.org/10.65310/epfhe281>.
- Sheng, C., Yang, L., Zhang, H., Zhang, P., & Shen, G. (2021). One-step hydrothermal method to prepare superhydrophobic cotton fabric with antibacterial properties. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 16. <https://doi.org/10.1177/15589250211066095>.
- Simanullang, J. E. H., Sriyanti, S., & Suhartana, S. (2025). Pengaruh Logam Al (III) dan Cu (II) sebagai Mordan Terhadap Ketahanan Luntur Zat Warna Indigo Carmine pada Kain Katun. *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry*, 4(2), 1–6. <https://doi.org/10.14710/gjec.2024.25393>.
- Wahyuni, S., Kunarti, E. S., Swasono, R. T., & Kartini, I. (2018). Characterization and photocatalytic activity of TiO₂(rod)-SiO₂-polyaniline nanocomposite. *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(2), 321–330. <https://doi.org/10.22146/ijc.22550>.
- Widiyanti, N., & Primary Putri, N. (2018). Sintesis Polianilin Dengan Metode Interfasial Menggunakan Variasi Larutan Dalam Fasa Organik. *Inovasi Fisika Indonesia*, 7(02), 71–73. <https://doi.org/10.26740/ifi.v7n2.p%25p>.