

PENGARUH VARIASI SUHU KALSINASI TERHADAP PARAMETER MIKROSTRUKTUR (STRUKTUR KRISTAL DAN GUGUS FUNGSI) NANOPARTIKEL TiO₂ SEBAGAI KANDIDAT MATERIAL FOTOKATALISIS

Novita Kundiman¹, Kurnia^{1*}, I Putu Tedy Indrayana², Bayu Achil Sadjab¹

¹Jurusan Fisika, Fakultas Ilmu Alam dan Teknologi Rekayasa, Universitas Halmahera, Kabupaten Halmahera Utara, Maluku Utara
²Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Jl. Raya Kampus Unud No.9, Jimbaran, Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Bali 80361

*email: kurniakurniarahman@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu kalsinasi terhadap parameter mikrostruktur nanopartikel TiO₂. Nanopartikel TiO₂ masing-masing ditimbang dengan massa 1 gram dan dikalsinasi pada suhu 150 °C, 200 °C, 250 °C dengan waktu 3 jam setiap suhu. Powder nanopartikel TiO₂ yang telah dikalsinasi selanjutnya dikarakterisasi dengan menggunakan alat XRD untuk mengetahui parameter mikrostrukturnya. Kemudian, untuk mengetahui gugus fungsi nanopartikel TiO₂ dapat dikarakterisasi dengan spektra Transformasi Fourier Inframerah (FTIR). Karakterisasi yang dihasilkan oleh XRD berupa pola difraksi yang menunjukkan telah terbentuknya fasa TiO₂ yang memiliki struktur kristal tetragonal dengan parameter kisi kristal $a = 3,782 \text{ \AA} - 3,784 \text{ \AA}$ dan parameter kisi $c = 9,500 \text{ \AA} - 9,509 \text{ \AA}$. Nilai tersebut mendekati nilai parameter kisi TiO₂ sesuai referensi, yaitu $3,785 \text{ \AA}$ untuk a dan $9,514 \text{ \AA}$ untuk c (JCPDS 21-1272). Ukuran kristalit (t) berada pada kisaran nilai 22,99 (nm)-24,39 (nm) dan kerapatan dislokasi kristal (D) berada pada kisaran nilai $1,679 \text{ nm}^{-2} \times 10^{-3} - 1,892 \text{ nm}^{-2} \times 10^{-3}$. Sedangkan kerapatan kristal berada pada kisaran nilai yaitu $3,897 \text{ gram/cm}^3 - 3,903 \text{ gram/cm}^3$ dan Spektra FTIR memberi informasi terjadinya vibrasi gugus Ti – O – Ti berada pada interval bilangan gelombang $505 \text{ cm}^{-1} - 600 \text{ cm}^{-1}$ dengan vibrasi stretching. Gugus fungsi Ti – O berada pada interval bilangan gelombang $610 \text{ cm}^{-1} - 1000 \text{ cm}^{-1}$ vibrasi stretching. Pada interval bilangan gelombang $1700 - 3600 \text{ cm}^{-1}$ vibrasi bending. Dalam Mengoptimalkan parameter mikrostruktur sebagai material fotokatalis, bahan nanopartikel TiO₂ dapat dilakukan dengan mengontrol suhu kalsinasi.

Kata kunci: Gugus Fungsi; Kalsinasi; Mikrostruktur; Nanopartikel TiO₂.

ABSTRACT

[Title: Effect of Calcination Temperature on Microstructure (Crystal Structure and Functional Groups) Of TiO₂ Nanoparticles as a potential materials for photocatalytic] The research is to investigate study on the influence of calcination temperature on microstructure of TiO₂ nanoparticle. And further calcined at three different temperatures of 150 °C, 200 °C, 250 °C for three hours. The prepared samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), and Fourier Transform Infrared (FTIR). The X-ray diffraction patterns at different calcination demonstrated the existence of only phase of tetragonal TiO₂ with lattice parameter $a = 3,782 \text{ \AA} - 3,784 \text{ \AA}$ and lattice parameter $c = 9,500 - 9,509 \text{ \AA}$ it clearly indicates the TiO₂ Phase (JCPDS Card 21-1272), grain size 22,99 (nm)-24,39 (nm), crystal dislocation density $1,679 - 1,892 \text{ nm}^{-2} \cdot 10^{-3}$ and crystal density $3,897 \text{ gram/cm}^3 - 3,903 \text{ gram/cm}^3$. And The functional groups of the TiO₂ nanoparticles characterized by FTIR. The characterization shows that the vibration of the Ti – O – Ti at $505 \text{ cm}^{-1} - 600 \text{ cm}^{-1}$ with stretching vibration and vibration of the Ti-O at $610 - 1100 \text{ cm}^{-1}$ with stretching vibration. And vibration of the Ti-O at $1700 - 3600 \text{ cm}^{-1}$ with bending vibration. To optimize microstructure parameter as a material photocatalysis depends on calcination temperature.

Keywords: Calcination functional groups; microstructure of TiO₂; TiO₂ nanoparticles

PENDAHULUAN

TiO₂ merupakan senyawa yang sejak abad ke-20 diproduksi secara komersial, digunakan untuk banyak aplikasi karena keunggulannya baik dari segi sifat optik dan elektroniknya. Selain itu diakui sebagai salah satu material fotokatalis utama karena memiliki stabilitas jangka panjang (Listanti, 2018). Penerapan fotokatalis dengan menggunakan material TiO₂ merupakan solusi yang tepat untuk

diaplikasikan dalam pengolahan limbah dan metode alternatif cukup efektif (Yetria, 2014).

Fotokatalisis merupakan suatu proses reaksi katalis dengan bantuan cahaya tampak (*visible light*) atau UV, Permukaan semikonduktor mempunyai kemampuan menginisiasi reaksi kimiawi apabila diberi cahaya ultraviolet pada panjang gelombang ($\lambda < 405 \text{ nm}$). Aktivitas fotokatalis ini membutuhkan penyerapan sinar ultraviolet (UV)

untuk membentuk dua pasangan elektron dan lubang (*hole*), diantara oksida logam yang lain titanium dioksida dikenal memiliki stabilitas termal cukup tinggi, dan kemampuannya yang dapat dipergunakan berulang kali tanpa kehilangan sifat kataliknya, dapat menyerap cahaya ultraviolet dengan baik serta memiliki lebar pita yang besar sekitar 3,2 eV (Hari, 2009; Sturini dkk, 2012; Zhang dan Banfield, 2000).

Kemampuan dari fotokatalisis semikonduktor TiO₂ dipengaruhi oleh parameter mikrostruktur dan ukuran kristalit seperti morfologi, luas permukaan, kristalinitas dan ukuran partikel. Parameter mikrostruktur TiO₂ di pengaruhi oleh jenis prekursor, metode sintesis, waktu sintesis, dan temperatur kalsinasi. Beberapa peneliti telah melakukan variasi temperatur kalsinasi untuk memperoleh struktur TiO₂ yang mereka inginkan. Temperatur kalsinasi yang lebih tinggi dan waktu yang lebih lama mempengaruhi hasil kristal yang terbentuk. Proses kalsinasi akan menyebabkan pertumbuhan kristal maupun transformasi fasa. Fasa kristal tumbuh didalam dinding-dinding pori karena perlakuan pemanasan selama proses kalsinasi (Rofiatun, 2013). Selain itu suhu pemaasan yang tinggi akan mempengaruhi bentuk mikrostruktur serta keporian pada permukaan sampel dan menyebabkan nilai kekerasan semakin tinggi (Kurniawan, 2014). Kemudian untuk mendapatkan hasil TiO₂ yang baik pada tulisan ini, dilakukan kalsinasi untuk mengaktifkan sifat fotokataliknya. Beberapa literatur menjelaskan bahwa TiO₂ memiliki tiga struktur yaitu rutil, brokit dan anatase dari ketiga fase tersebut anatase diketahui memiliki sifat fotokatalik yang lebih baik dalam proses fotokatalis dari pada rutil dan brokit (Rudi Subagja, dkk., 2014).

Oleh karena itu pada penelitian ini, proses kalsinasi dilakukan untuk mempelajari pengaruh variasi temperatur terhadap parameter mikrostruktur dan ukuran pori pada permukaan TiO₂ struktur anatase. Pada penelitian sebelumnya dilakukan kalsinasi pada suhu 200°C, 300°C, 400°C dan 500°C untuk mendapatkan derajat kristalinitas yang tinggi (Sullivan et al, 2014; Yu et al 2017). Nuraliyah dan Maharani (2021), juga melakukan kalsinasi pada rentang suhu 400-550°C. TiO₂ dikombinasi SiO₂ disintesis dengan metode sol gel, menggunakan pemanasan biasa tanpa kalsinasi diperoleh ukuran kristal 53,1 nm (Wulandari dkk, 2018). Pada penelitian ini akan dilakukan kalsinasi pada suhu dengan rentang di bawah 300°C untuk melihat kristalinitas pada nanopartikel TiO₂.

Berdasarkan uraian tersebut, maka pada penelitian ini akan dilakukan kalsinasi TiO₂ pada temperatur 150°C, 200°C dan 250°C untuk melihat morfologi nanopartikel TiO₂ sebagai material semikonduktor yang lebih detail. Untuk mengetahui morfologi nanopartikel TiO₂ tersebut maka digunakan alat karakterisasi sampel nanopartikel TiO₂ seperti XRD (*X-Ray Diffraction*) dan FTIR (*Fourier Transform Infrared*) untuk mengetahui gugus fungsi nanopartikel TiO₂.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium IPA Terpadu Universitas Halmahera, TiO₂ yang digunakan produk yang sudah ada. Pada tahap awal kalsinasi sampel TiO₂ dengan variasi suhu 150°C, 200°C, dan 250°C. Kemudian karakterisasi sampel material dilaksanakan di Laboratorium Mineral dan Material Maju Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Malang. Parameter mikrostruktur nanopartikel TiO₂ dianalisis dengan menggunakan beberapa perhitungan parameter.

Parameter kisi kristal Tetragonal

Hukum bragg yang merupakan hubungan antara panjang gelombang, sudut difraksi dan jarak antar bidang dalam kristal dapat digunakan untuk menentukan jarak antar bidang kisi (*d*) dari sistem tetragonal melalui hubungan dimana *a* dan *c* adalah parameter kisi sel satuan dalam kristal dan *h*, *k*, dan *l* adalah indeks miler dari bidang bragg seperti pada persamaan (1) (Kurniawan., 2014)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

Melalui hubungan tersebut parameter kisi kristal Tetragonal dapat dihitung menggunakan persamaan (2) dan (3).

$$a = \sqrt{\frac{(h_1^2 + k_1^2)l_2^2}{4 \sin^2 \theta_1} \cdot \frac{(h_2^2 + k_2^2)l_1^2}{4 \sin^2 \theta_2}} \quad (2)$$

$$c = \sqrt{\frac{(h_1^2 + k_1^2)l_2^2}{4 \sin^2 \theta_2} \cdot \frac{(h_2^2 + k_2^2)l_1^2}{4 \sin^2 \theta_1}} \quad (3)$$

Keterangan :

θ_1 = Setengah sudut difraksi bidang (101)

θ_2 = Setengah sudut difraksi bidang (200)

$(h_1k_1l_1)$ = Indeks Miller bidang (101)

$(h_2k_2l_2)$ = Indeks Miller bidang (200)

= Panjang gelombang sinar-X untuk radiasi Cu, $K, \alpha_1 (1,5405980\text{\AA})$

Distorsi Tetragonal

Distorsi adalah besarnya gangguan yang terjadi pada nanopartikel TiO₂ karena perlakuan panas atau pengaruh sintesis nanopartikel tersebut. Distorsi tetragonal dapat dihitung menggunakan persamaan (4)

$$DT = a/c$$

$$DT = \sqrt{\frac{\frac{4 \sin^2 \theta}{2} \cdot (h_1^2 + k_1^2) \quad \frac{4 \sin^2 \theta}{2} \cdot (h_1^2 + k_1^2)}{\frac{4 \sin^2 \theta}{2} \cdot l_1^2 \quad \frac{4 \sin^2 \theta}{2} \cdot l_1^2}} \quad (4)$$

Volume kisi kristal tetragonal

Volume kisi kristal adalah besarnya ukuran TiO₂ tetragonal yang dapat di hitung menggunakan persamaan (5)

$$V = a^2 c \quad (5)$$

Dengan : V adalah volume kisi kristal (cm³)

a dan c adalah parameter kisi.

Mikrostrain (Regangan kisi kristal)

Besarnya regangan kisi Kristal pada nanopartikel TiO₂ akibat gangguan atau pelebaran cela pada puncak difraksi dapat dihitung menggunakan persamaan (6).

$$= \frac{FWHM \cos 101}{4} \quad (6)$$

Keterangan :

$FWHM$ = Lebar maksimum setengah puncak difraksi (101)

θ_{101} = Setengah sudut difraksi bidang (101)

Ukuran kristalit nanopartikel TiO₂

Ukuran kristalit nanopartikel TiO₂ dapat dihitung dengan menggunakan rumus Debye Scherer untuk puncak difraksi sinar-X (101), seperti persamaan 7

$$t = \frac{k}{FWHM \cos 101} (nm) \quad (7)$$

Dengan k adalah konstanta Scherer ($k = 0,89$)

Kerapatan Dislokasi kisi kristal (nm⁻²)

Kerapatan dislokasi kisi Kristal adalah besarnya perubahan posisi atom-atom pada nanopartikel TiO₂ dapat dinyatakan dengan nilai kerapatan dislokasi kisi kristal (D). nilai kerapatan dislokasi kisi kristal TiO₂ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (8).

$$D = \frac{1}{t^2} (nm^{-2}) \quad (8)$$

Dengan : t = ukuran kristalit TiO₂ (nm)

Kerapatan kristal TiO₂

Banyaknya atom Ti ataupun O yang menempati ruang volum kisi Kristal nanopartikel TiO₂ dinyatakan sebagai besaran kerapatan kisi kristal (*Crystal density*). Nilai kerapatan kisi kristal nanopartikel TiO₂ dapat dinyatakan persamaan (9).

$$= \frac{Mr \cdot Z \cdot 1,66}{V} (gram/cm^3) \quad (9)$$

Keterangan :

Mr = Massa molekul relatif TiO₂ (79,90 gram/mol)

Z = Jumlah sel satuan kristal TiO₂ terdiri dari 4 (anatase)

V = Volume kisi kristal (cm³)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian berisi tentang apa saja yang ditemukan saat melakukan penelitian. Hasil penelitian dapat berupa tabel, gambar ataupun grafik dari hasil pengolahan data mentah yang diperoleh. Pembahasan dilakukan pada setiap hasil penelitian atau dengan membandingkan hasil penelitian sebelumnya. (6)

Hasil Difraksi Sinar -X

Dari hasil analisis setelah dikarakterisasi pada sampel nanopartikel TiO₂ powder menggunakan alat *X-Ray Diffraction* yang telah dikalibrasi menggunakan suhu 150°C, 200°C dan 250°C. Diperoleh bentuk struktur polikristal dari hasil spektrum *X-Ray Diffraction* dimulai dari bidang (101), (004), (200), (211), (204), (220) dan (215) fase TiO₂ pada sampel tersebut.

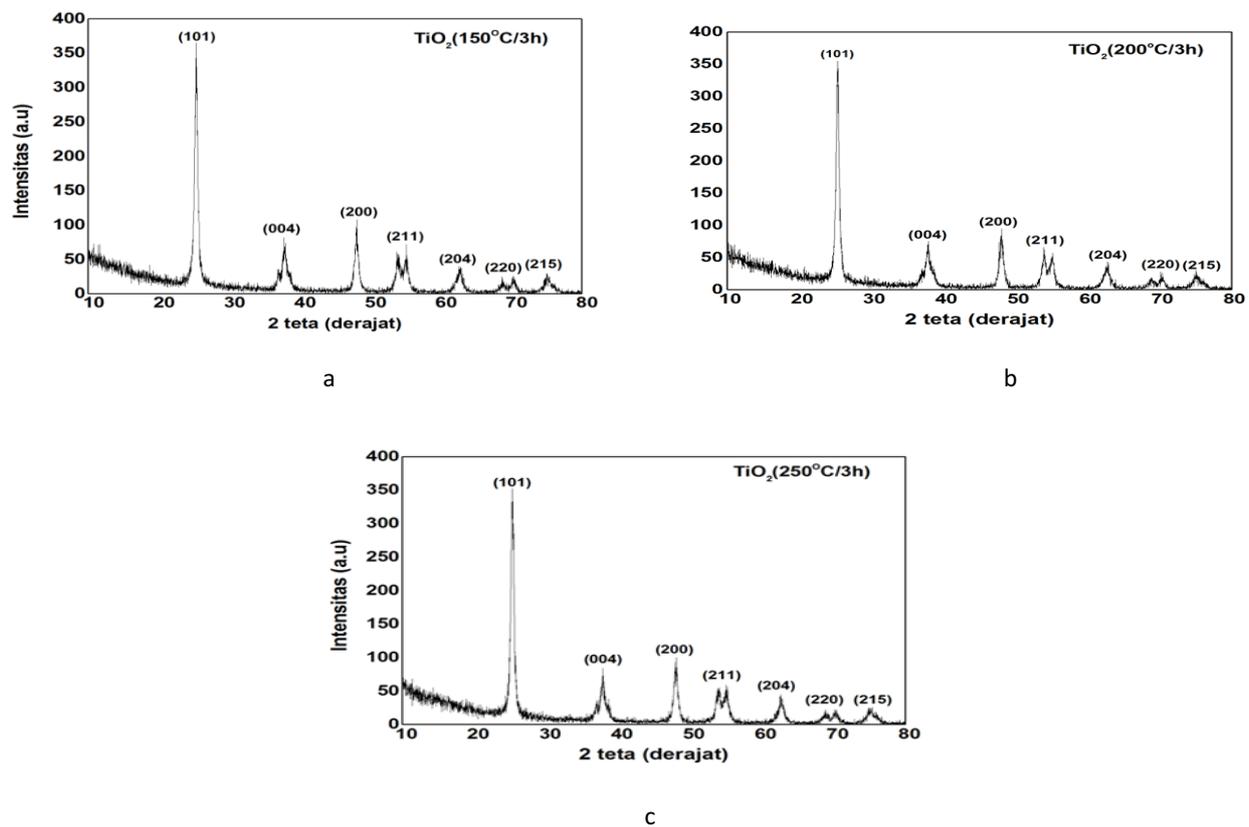
Bidang kristal (101) merupakan bidang kristal yang dominan di dalam bahan TiO₂ powder dengan intensitas paling tinggi (101) yang terbentuk secara lancip dari ke tujuh bidang difraksi.

Pada bidang 101 memiliki intensitas yang tinggi karena pada bidang inilah yang banyak terdapat banyak partikel yang terdifraksi. Intensitas yang besar menunjukkan bahwa kristal tersebut memiliki keteraturan kristal yang baik atau semakin

banyak atom-atom yang tersusun teratur (Astuti dan Sulastriya Ningsi, 2017).

Berikut adalah bidang difraksi dari ketiga sampel dengan hasil yang sama. Perhatikan Gambar

3.1. dan pada Tabel 1 ditunjukkan parameter mikrostrukturnya.



Gambar 1. Difraksi Sinar-X TiO₂ pada suhu a) 150⁰C, b) 200⁰C, c) 250⁰C

Tabel 1. Parameter Mikrostruktur TiO₂

No	Sampel	Parameter Mikrostruktur							
		a (Å)	c (Å)	DT a/c	v (Å ³)	ε (x10 ⁻⁴)	T (nm)	D (nm ⁻²) (· 10 ⁻³)	(gram /cm ³)
1.	N1 : Suhu 150°C	3,783	9,509	0.397	136,12	3,431	22,99	1,892	3,897
2.	N2 : Suhu 200°C	3,784	9,503	0.398	136,119	3,233	24,39	1,679	3,897
3.	N3 : Suhu 250°C	3,782	9,500	0.398	135,928	3,365	23,52	1,808	3,903

Jika dilihat dari Gambar (1) dapat disimpulkan bahwa ketiga sampel TiO₂ tersebut menunjukkan intensitas yang sama pada bidang (101) dan tingkat kristalinitas tidak terjadi perubahan secara signifikan. Dari proses difraksi sinar-X tersebut menghasilkan tujuh puncak difraksi yang menandakan (*hkl*) pada nanopartikel TiO₂ bidang-bidang tersebut yaitu (101), (004), (200), (211), (204), (220), dan (215).

Selain itu terdapat salah satu puncak tertinggi dari ketujuh puncak tersebut yaitu pada bidang *hkl* (101) yang menandakan bahwa puncak tersebut merupakan puncak terbentuknya kristalinitas TiO₂ dengan memiliki intensitas tertinggi. Dari hasil pembentukan pola difraksi XRD tersebut berarti sampel nanopartikel tersebut memiliki nilai kristal yang sangat baik. Berdasarkan pola XRD tersebut, secara detail dapat diketahui

puncak-puncak difraksi sampel nanopartikel TiO₂ dengan struktur anatase berdasarkan data standar (JCPDS no 21-1272). Dari hasil analisis dan perhitungan yang telah dilakukan diperoleh parameter mikrostruktur kisi kristal tersebut dapat dilihat dalam Tabel 1.

Berdasarkan data hasil eksperimen alat XRD tersebut, maka dapat dihitung ukuran kristal TiO₂ dengan cara memasukan nilai θ , β , λ dan nilai *FWHM* (*Full Width at Half Maximum*) dari puncak dengan refleksi tertinggi ke dalam persamaan Scherrer, maka diperoleh nilai ukuran kristalit (*t*) nanopartikel TiO₂ berada pada *range* 22,99nm, 23,52nm dan 24.39 nm.

parameter mikrostruktur kisi kristal nanopartikel TiO₂ yaitu 3,782 Å, 3,783 Å dan 3,784 Å untuk *a* dan 9,500 Å, 9.503 Å dan 9,509 Å untuk *c*. Nilai tersebut mendekati nilai parameter kisi TiO₂ sesuai referensi yaitu 3,785 Å untuk *a* dan 9,514 Å untuk *c* sesuai dengan (JCPDS no 21-1272). Nilai volume (*V*) kisi kristal tetragonal berada pada *range* nilai 135,928 Å³, 136,712 Å³ dan 136,119 Å³ kemudian untuk nilai mikrostrain (ϵ) kisi, yaitu $3,233 \cdot 10^{-4}$, $3,365 \cdot 10^{-4}$ dan $3,431 \cdot 10^{-4}$. Kemudian nilai dislokasi kisi (*D*) berada pada *range* yaitu $1,679 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$, $1,808 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$ dan $1,892 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$. Nilai kerapatan kristal (ρ) TiO₂, yaitu $3,897 \text{ gram/cm}^3$ dan $3,903 \text{ gram/cm}^3$.

Maka nilai yang diperoleh dari hasil eksperimen tersebut menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan parameter mikrostruktur pada permukaan nanopartikel TiO₂ yang signifikan. Karena menurut Hasil penelitian (Yetria., dkk.

2014) melaporkan bahwa suhu kalsinasi tinggi dalam sintesis TiO₂ dapat meningkatkan ukuran kristal. Dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya suhu kalsinasi tingkat kristalinitas semakin baik serta ukuran kristal yang didapatkan lebih besar sehingga pertumbuhan kristal menjadi lebih sempurna.

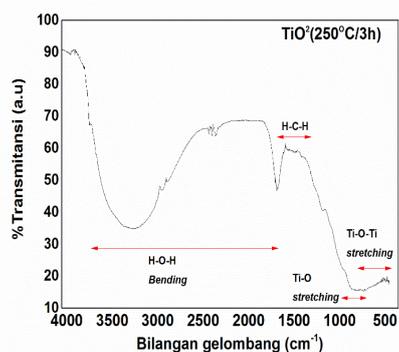
Bidang kristal (101) merupakan bidang kristal fase anatase yang dominan di dalam bahan material nanopartikel TiO₂ powder dengan intensitas paling tinggi, karena pada bidang (101) inilah banyak material TiO₂ yang terdifraksi oleh sinar- X (Hasan., 2014). Suhu pemanasan yang tinggi akan mempengaruhi mikrostruktur pada permukaan sampel serta menyebabkan nilai kekerasan semakin kuat (Kurniawan., 2014). Semakin tinggi temperatur kalsinasi semakin besar pula energi yg bekerja (Nugroho, S.H., 2011)

Gugus fungsi Nanopartikel TiO₂

Berdasarkan Hasil uji FTIR dapat memberikan informasi tentang profil serapan spektra infra merah pada sampel nanopartikel TiO₂ pada suhu 250°C/3h, karakterisasi FTIR nanopartikel TiO₂ dilakukan dari jarak interval bilangan gelombang pada kisaran 500 cm⁻¹ – 4000 cm⁻¹. Data masukan antara transmitansi terhadap bilangan gelombang (cm⁻¹) akan dihasilkan spektra infra merah berupa puncak-puncak yang tajam dengan bilangan gelombang (cm⁻¹) tertentu yang dihasilkan dari senyawa organik dengan gugus fungsi seperti disajikan pada Gambar 2 dan Tabel 2.

Tabel 2. Hasil FTIR TiO₂ pada suhu kalsinasi 250°C

No	Interval Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)	Mode Vibrasi Gugus Fungsi
1	505–600	Ti–O–Ti vibrasi <i>stretching</i>
2	610 – 1000	Ti - O vibrasi <i>stretching</i>
3	1000 – 1500	H – C – H tidak terjadi vibrasi
4	1700 – 3600	H – O – H vibrasi <i>bending</i>



Gambar 2. Hasil FTIR TiO₂ pada suhu kalsinasi 250°C

Untuk melihat bagaimana data hasil analisis dari FTIR perhatikan Tabel 2 yang menjelaskan bagaimana vibrasi yang terjadi pada rentang panjang gelombang tertentu.

Berdasarkan Tabel 2 hasil karakterisasi gugus fungsi nanopartikel TiO₂, maka gugus Ti–O–Ti berada pada interval bilangan gelombang 505 cm⁻¹ – 600 cm⁻¹ yang memiliki mode vibrasi *stretching*. Ti–O berada pada interval bilangan gelombang 610 cm⁻¹ – 1000 cm⁻¹ memiliki mode vibrasi *stretching*.

Kemudian untuk mode vibrasi *bending* berada pada bilangan interval 1700 cm⁻¹ – 3600 cm⁻¹ untuk gugus H–O–H, sedangkan pada interval bilangan gelombang 1000 cm⁻¹ – 1500 cm⁻¹ dan gugus H–C–H tidak memiliki mode vibrasi baik *stretching* atau *bending*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa sampel nanopartikel TiO₂ dikalsinasi dengan suhu 150°C, 200°C, 250 °C selama 3 jam diperoleh struktur anatase tetragonal dengan nilai parameter kisi berada pada kisaran $a = 3,782 \text{ \AA} - 3,784 \text{ \AA}$. Perlakuan suhu kalsinasi yang semakin tinggi akan membuat tingkat kristalinitasnya semakin baik pada permukaan nanopartikel TiO₂. Gugus fungsi yang diperoleh pada sampel nanopartikel TiO₂ adalah gugus Ti – O – Ti vibrasi *stretching*. Gugus fungsi Ti – O berada vibrasi *stretching*. Gugus H – C – H tidak terjadi vibrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti dan Sulastriya, N., 2017. Sintesis dan karakterisasi nanopartikel Titanium dioksida (TiO₂) menggunakan metode sonokimia. *Jurnal ilmu fisika (jif)*, Vol 9 no 1, ISSN 1979-4657.
- Hari, S., 2009. Tinjauan Mikrostruktur Kereaktifan Anatas Dan Rutil Sebagai Material Superfotohidrofil Permukaan. *Prosiding*

Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA. Jurdik Kimia, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta (UNY).

- Hasan, A., dkk., 2014. Pengaruh Temperatur Kalsinasi Terhadap Hidrotalsit Mg/Al Yang Disintesis Melalui Metode Presipitasi Tak Jenuh. *Jurnal Penelitian Sainstek*, Oktober 2014. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta. Vol. 19, Nomor 2. Hlm. 45-51.
- Kurniawan, A., dkk., 2014. Studi pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap kekerasan bentuk morfologi dan analisis porositas nanokomposit CAO/SiO₂ untuk aplikasinya biomaterial. *Untuk aplikasi bahan biomaterial*. Jurnal pendidikan fisika dan Aplikasinya (JPFA). Prosiding Seminar dan Lokakarya Nasional Fisika. Unesa. Vol. 4, No.2
- Listanti, A., dkk., 2018. Investigasi Struktur dan Energi Band Gap Partikel Nano TiO₂ Hasil Sintesis Menggunakan Metode Sol-Gel. *Journal of Science and Engineering (JPSE)*. Vol. 3, No.1, Page 8-15
- Nugroho, S.H., 2011. Pengaruh temperatur kalsinasi terhadap pembentukan nanopartikel tungsten trioksida hasil proses sol-gel. *Jurnal Teknik Material dan Metalurgi*. Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi. Institut Teknologi Sepuluh November.
- Nuraliyah, S., Maharani, D.K. 2021. Pengaruh suhu kalsinasi komposit Zn terhadap karakteristik komposit TiO₂/ZnO. *Unesa Journal of Chemistry*. Vol.10, No 01.
- Rofiatun, N., 2013. Preparasi dan Karakterisasi Titanium Dioksida dalam Lingkungan Basa Kuat Natrium. *Skripsi*. Program Studi Kimia, Universitas Negeri Yogyakarta.
- Subagja, R., dkk., 2014. Pengaruh Temperatur Dan Waktu Kalsinasi Terhadap Perubahan Fasa TiO₂. *Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI Gedung 470, Kawasan Puspipstek Serpong, Tangerang Selatan*.
- Sturini, M., dkk. 2012. Photolytic and photocatalytic degradation of fluoroquinolones in untreated river water under natural sunlight. *Applied Catalysis B: Environmental* 119, 32-32.
- Sullivan, J.A., Neville, E.M., Herron, R., Thampi, K.R., MacElroy, J.M.D. 2014. *J. Photochem. and Photobio.A*. 289,60.
- Wulandari, M., Astuti, Muldarisnur. 2018. Sintesis Nanopartikel TiO₂-SiO₂ Berpori Sebagai

- Fotokatalisis untuk Penjernihan Air Limbah Rumah Tangga. *Jurnal Fisika Unand*. Vol.7, No.1.
- Yetria, R., M.R. Resfiani, & Syukri. 2014. Sintesis dan Karakterisasi Nanokristal TiO₂- SiO₂ / Kitosan : Efek Temperatur Kalsinasi dan Surfaktan CTABr
- Yu, L., Lin Y., Huang, J., Lin, S., Li, D. 2017. *J Am Ceram Soc.*, 100,300
- Zhang, Z., and Banfield, F. 2000. Understanding Polymorphic Phase Transformation Behavior During Growth of Nanocrystalline Aggregates: Insight from TiO₂. *Journal Physic Chemistry B*, Vol. 104. P.3481-3487