

# Sintesis dan Karakterisasi $Mg_{1-x}Cu_xFOH$ sebagai Katalis Sintesis Vitamin E

*(Synthesis and Characterization of  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  for Catalyst in Synthesis of Vitamin E)*

A. Sirojul Anam Izza Rosyadi<sup>1</sup>, Irimina Kris Murwani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknologi Industri Pangan, Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember

<sup>2</sup>Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

\*Email Koresponden: sirojulanam\_izza@polije.ac.id

Received : 4 November 2023 | Accepted : 23 November 2023 | Published : 12 Februari 2024

| Kata Kunci                         | ABSTRAK                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sintesis<br>Katalis<br>Vitamin E   | Penggunaan katalis heterogen dalam sintesis vitamin E dilakukan untuk mengatasi kekurangan yang ditimbulkan oleh penggunaan katalis homogen. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis $Mg_{1-x}Cu_xFOH$ sebagai material yang berpotensi untuk digunakan sebagai katalis heterogen dalam reaksi sintesis vitamin E. Sintesis $Mg_{1-x}Cu_xFOH$ dilakukan dengan mereaksikan $Mg(OCH_3)_2$ dan $Cu(OCH_3)_2$ dengan $MgF_2$ melalui kombinasi metode <i>fluorolytic</i> dan <i>hydrolytic sol-gel</i> . Padatan hasil sintesis dikarakterisasi dengan XRD dan FTIR. Hasil karakterisasi menunjukkan keberadaan fasa amorf yang masih menyerupai struktur $MgFOH$ serta keberadaan struktur Mg-F, Mg-O, dan gugus O-H terisolasi. Hasil tersebut membuktikan bahwa $Mg_{1-x}Cu_xFOH$ telah berhasil disintesis.                                                                                                                       |
| Keywords                           | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Synthesis<br>Catalyst<br>Vitamin E | <i>The use of heterogeneous catalysts in the synthesis of vitamin E is carried out to overcome the shortcomings caused by the use of homogeneous catalysts. This research aims to synthesize <math>Mg_{1-x}Cu_xFOH</math> as a material that has the potential to be used as a heterogeneous catalyst in the vitamin E synthesis reaction. The synthesis of <math>Mg_{1-x}Cu_xFOH</math> was carried out by reacting <math>Mg(OCH_3)_2</math> and <math>Cu(OCH_3)_2</math> with <math>MgF_2</math> via a combination of fluorolytic and hydrolytic sol-gel methods. The synthesized solid was characterized by XRD and FTIR. The characterization results show the presence of an amorphous phase that still resembles the structure of <math>MgFOH</math> as well as the presence of structures of Mg-F, Mg-O, and isolated O-H groups. These results prove that <math>Mg_{1-x}Cu_xFOH</math> has been successfully synthesized.</i> |

## 1. PENDAHULUAN

Vitamin E adalah vitamin yang larut dalam lemak dan dilaporkan pertama kali ditemukan pada tahun 1922. Sejak saat itu, penelitian terhadap vitamin E terus dilakukan

hingga akhirnya Vitamin E dikenal sebagai senyawa dengan aktivitas antioksidan tinggi (Khallouki dkk. 2020). Karena itu, Vitamin E banyak dimanfaatkan sebagai senyawa antioksidan dalam produk makanan maupun kosmetik. Vitamin E juga dimanfaatkan dalam beragam produk farmasi karena terbukti dapat meningkatkan kekebalan, menjegah kanker dan penyakit jantung, serta menghambat penuaan (Pekmezci 2011). Beragam manfaat tersebut berakibat pada permintaan terhadap vitamin E yang terus meningkat (Torquato dkk. 2020). Demi memenuhi permintaan tersebut, berbagai cara dilakukan untuk mendapatkan vitamin E, baik secara alami maupun sintetis.

Vitamin E alami terdiri delapan senyawa, yaitu empat senyawa tokoferol ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , dan  $\delta$ -tokoferol) dan empat senyawa tokotrienol ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , dan  $\delta$ -tokotrienol) (Traber dan Bruno 2020). Dari delapan senyawa vitamin E tersebut,  $\alpha$ -tokoferol merupakan senyawa paling penting sekaligus senyawa dengan aktivitas biologis paling tinggi (Combs dan McClung 2017).

Vitamin E terdapat pada banyak jenis makanan dan tumbuhan, mulai dari minyak nabati, kacang, serta biji-bijian seperti gandum dan beras (Mohd Mutalip, Ab-Rahim, dan Rajikin 2018). Namun ekstraksi Vitamin E terutama diperoleh minyak nabati. Proses ekstraksi ini dapat mempertahankan aktivitas biologis vitamin E. Namun proses ini memiliki beberapa kekurangan, di antaranya adalah *yield* yang rendah serta proses ekstraksi dan pemurnian yang kompleks. Karena itu, selain vitamin E alami, vitamin E sintetis juga menjadi alternatif dalam memenuhi kebutuhan vitamin E (Ye dkk. 2022).

Berbeda dengan vitamin E alami, vitamin E sintetis umumnya hanya merujuk pada  $\alpha$ -tokoferol. Senyawa  $\alpha$ -tokoferol dalam skala industri diperoleh dari reaksi kondensasi antara trimetilhidrokuinon (TMHQ) dan isofitol (IP) dengan katalis asam Lewis, asam Brønsted, atau kombinasi keduanya. Katalis asam yang telah digunakan antara lain adalah  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{BF}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2/\text{HCl}$ , serta  $\text{FeCl}_2/\text{Fe}/\text{HCl}$ . Namun penggunaan katalis-katalis tersebut dalam skala industri menimbulkan beberapa masalah, seperti korosi dan kontaminasi limbah cair oleh ion  $\text{Zn}^{2+}$  dan  $\text{Cl}^-$ . Katalis dalam jumlah cukup besar dan IP berlebih dibutuhkan untuk mendapatkan *yield* yang tinggi. Katalis juga sulit diregenerasi karena bersifat homogen (Shi dan Zhang 2017). Permasalahan yang timbul akibat penggunaan katalis homogen tersebut dapat diatasi dengan penggunaan katalis heterogen. Salah satu material yang berpotensi untuk digunakan sebagai katalis heterogen dalam sintesis vitamin E adalah logam florida.

Senyawa logam florida dapat disintesis melalui metode *fluorolytic* sol-gel (Kemnitz dan Noack 2015). Metode *fluorolytic* sol-gel hampir serupa dengan *hydrolytic* sol-gel yang telah lebih dahulu dikenal. Pada *hydrolytic* sol-gel, logam alkoksida direaksikan dengan air. Namun pada *fluorolytic* sol-gel, senyawa logam alkoksida direaksikan dengan HF, sehingga hasil yang diperoleh adalah senyawa logam florida (Scholz dan Kemnitz 2017). Lebih lanjut, metode *hydrolytic* dan *fluorolytic* sol-gel dapat dikombinasikan untuk menghasilkan senyawa logam hidroksida florida,  $\text{LF}_m(\text{OH})_n$  ( $\text{L}$  = atom logam). Kombinasi *hydrolytic* dan *fluorolytic* sol-gel terjadi ketika konsentrasi HF yang digunakan kurang dari 100% (Célérier dan Richard 2015).

Senyawa logam hidroksida florida memiliki luas permukaan yang tinggi serta memiliki sisi asam Lewis dan sisi asam Brønsted yang dapat dimodifikasi. Kedua sifat tersebut membuat logam hidroksida florida menarik untuk digunakan sebagai katalis dalam reaksi sintesis vitamin E. Modifikasi sisi asam Brønsted dapat dilakukan dengan mengatur rasio air dan HF saat sintesis, sedangkan modifikasi sisi asam Lewis dapat dilakukan dengan doping logam lain (Kemnitz 2015).

Modifikasi sisi asam Brønsted pada senyawa logam hidroksida florida telah dilaporkan pada penelitian terdahulu, yaitu modifikasi sisi asam Brønsted senyawa aluminium hidroksida florida dan magnesium hidroksida florida melalui variasi konsentrasi HF yang digunakan

dalam proses sintesis (Kemnitz dan Coman 2016). Namun demikian, belum banyak penelitian yang melaporkan sintesis logam hidroksida florida yang disertai dengan modifikasi sisi asam Lewis. Oleh karena itu, pada penelitian ini disintesis  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  melalui kombinasi *hydrolytic* dan *fluorolytic* sol-gel sebagai bentuk modifikasi sisi asam Lewis pada  $MgFOH$  melalui doping Cu.  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  yang diperoleh selanjutnya dikarakterisasi untuk melihat pengaruh doping Cu terhadap struktur kristal  $MgFOH$ . Kemudian akan diuji aktivitas katalitik  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  dalam reaksi sintesis vitamin E, tetapi pengujian ini akan dilakukan pada penelitian berikutnya.

## 2. METODE

### 2.1 Bahan

Mg turnings (Sigma-Aldrich), Tembaga(II) asetat monohidrat (Merck), HF 48% (Merck), metanol kering (Merck).

### 2.2 Sintesis $Mg_{1-x}Cu_xFOH$

Mg turnings direaksikan dengan metanol kering selama semalam untuk menghasilkan  $Mg(OCH_3)_2$ . Kemudian ditambahkan tembaga(II) asetat monohidrat sesuai variasi x yang dibutuhkan. Campuran  $Mg(OCH_3)_2$  dan tembaga(II) direfluks pada suhu  $65^\circ C$  selama 1,5 jam. Sejumlah stoikiometrik HF 48% ditambahkan ke dalam campuran sambil terus diaduk hingga terbentuk gel  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$ . Gel kemudian didiamkan dalam wadah tertutup pada suhu kamar hingga terbentuk gel stabil. Gel stabil selanjutnya dikeringkan secara vakum pada suhu  $115^\circ C$ .

### 2.3 Karakterisasi $Mg_{1-x}Cu_xFOH$

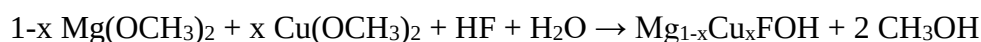
Kristalinitas diuji dengan difraktometer sinar X X'pert MPD dengan radiasi Cu- $K\alpha$  ( $\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$ ;  $2\theta \text{ range: } 20^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$ ;  $\text{step scan: } 0,017^\circ$ ,  $\text{step time: } 10,15 \text{ detik}$ ). Spektra FTIR direkam dengan spektrometer Perkin-Elmer 2000 menggunakan pelet KBr pada rentang  $4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ .

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Sintesis $Mg_{1-x}Cu_xFOH$

Sederet sampel  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  dengan  $x = 0; 0,025; 0,050; 0,075; 0,100$ ; dan  $0,150$  telah berhasil disintesis melalui kombinasi *hydrolytic* dan *fluorolytic* sol-gel. Reaksi dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah sintesis logam alkoksida prekursor dan tahap kedua adalah reaksi antara logam alkoksida dengan HF 48%. Logam alkoksida yang digunakan sebagai prekursor adalah  $Mg(OCH_3)_2$  dan  $Cu(OCH_3)_2$ . Keduanya disintesis dari reaksi Mg turnings dan tembaga(II) asetat dengan metanol kering berlebih.

Mg turnings direaksikan dengan metanol kering berlebih selama semalam untuk mendapatkan  $Mg(OCH_3)_2$ . Kemudian ditambahkan tembaga(II) asetat sejumlah variasi x yang dibutuhkan ke dalam  $Mg(OCH_3)_2$  dan campuran yang diperoleh direfluks. Produk yang diperoleh adalah campuran berwarna biru yang terdiri dari  $Mg(OCH_3)_2$  dan  $Cu(OCH_3)_2$ . HF 48% selanjutnya ditambahkan ke dalam campuran logam alkoksida sambil diaduk untuk membentuk sol  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$ . Pengadukan terus dilanjutkan hingga terbentuk gel  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$ . Reaksi pembentukan  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  secara keseluruhan dinyatakan dengan persamaan:

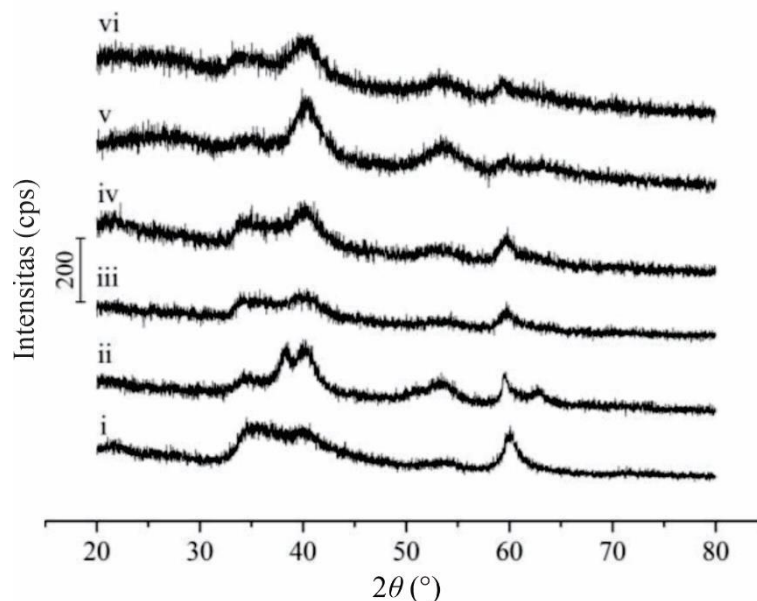


Gel  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  yang diperoleh disimpan dalam wadah tertutup dan didiamkan pada suhu kamar. Selama didiamkan, atom F yang memiliki kecenderungan kuat untuk mengikat atom logam akan membentuk jaringan Mg-F-Mg (Kemnitz 2015). Proses ini terus berlanjut hingga akhirnya terbentuk gel  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  yang stabil. Gel kemudian dikeringkan secara vakum pada suhu  $115^\circ\text{C}$  hingga diperoleh xerogel  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$ .

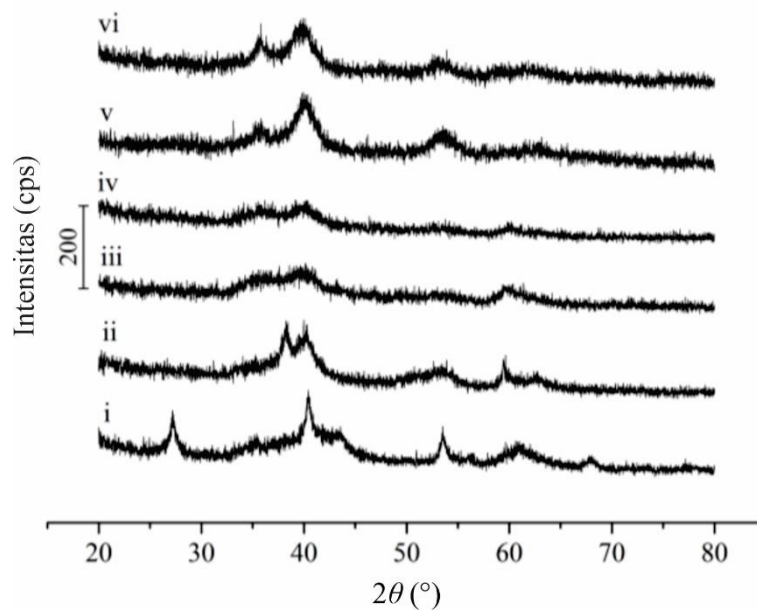
### 3.2 Karakterisasi $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$

$\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  hasil pengeringan pada suhu  $115^\circ\text{C}$  dianalisis dengan XRD. Pola XRD yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 1. Pola XRD  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  menunjukkan puncak lebar pada  $35,5$ ,  $39,8$ ,  $54,1$ , dan  $60,0^\circ$ . Dari pola XRD tersebut dapat diamati beberapa perubahan yang terjadi akibat doping Cu yang dilakukan. Perubahan pertama adalah terjadinya pergeseran puncak difraktogram pada  $35,5^\circ$  menuju  $2\theta$  yang lebih rendah dengan semakin meningkatnya jumlah doping Cu. Berdasarkan persamaan Bragg, nilai  $2\theta$  berbanding terbalik dengan nilai  $d$ -spacing kisi kristal. Ion  $\text{Cu}^{2+}$  memiliki radius sedikit lebih besar daripada ion  $\text{Mg}^{2+}$ . Akibatnya, doping Cu mengakibatkan  $d$ -spacing kisi kristal meningkat, sehingga puncak difraktogram pada  $35,5^\circ$  bergesernya menuju  $2\theta$  yang lebih rendah.

$\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  yang telah dikeringkan kemudian dikalsinasi pada suhu  $350^\circ\text{C}$  dan hasilnya dianalisis kembali dengan XRD. Pola XRD untuk  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah kalsinasi dapat dilihat pada Gambar 2. Pola XRD  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah kalsinasi menunjukkan puncak-puncak yang lebih tajam. Selain itu, muncul puncak baru pada  $27,2^\circ$  dan  $67,9^\circ$  untuk MgFOH. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kristalinitas pada struktur  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah dikalsinasi.



**Gambar 1.** Pola XRD  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah pengeringan pada suhu  $115^\circ\text{C}$ : (i)  $x = 0$ , (ii)  $x = 0,025$ , (iii)  $x = 0,05$ , (iv)  $x = 0,075$ , (v)  $x = 0,1$ , (vi)  $x = 0,15$ .

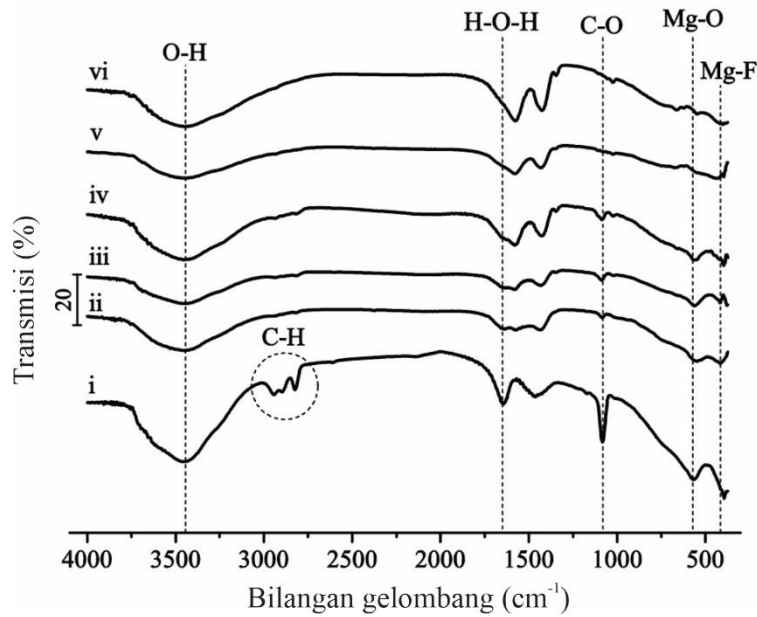


**Gambar 2.** Pola XRD  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah kalsinasi pada suhu  $350^\circ\text{C}$ : (i)  $x = 0$ , (ii)  $x = 0,025$ , (iii)  $x = 0,05$ , (iv)  $x = 0,075$ , (v)  $x = 0,1$ , (vi)  $x = 0,15$ .

Pola XRD  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah kalsinasi tidak menunjukkan puncak pada  $60^\circ$  yang semula teramati pada pola XRD setelah pengeringan. Puncak pada  $60^\circ$  merupakan puncak karakteristik polimer  $\text{Mg}(\text{OCH}_3)_2$  (Scholz dkk. 2012). Hasil pengamatan ini membuktikan bahwa kalsinasi yang dilakukan telah berhasil menghilangkan gugus metoksil dari  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$ .

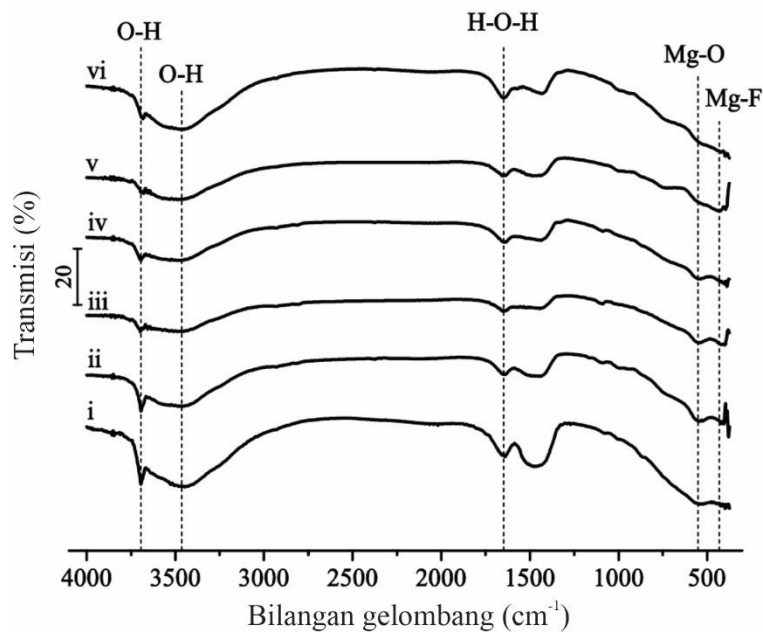
Spektra FTIR  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah pengeringan dapat dilihat pada Gambar 3. Pada spektra tersebut dapat diamati vibrasi pada  $461$  dan  $550\text{ cm}^{-1}$ . Vibrasi pada  $461\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi Mg-F, sedangkan vibrasi  $550\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi Mg-O. Vibrasi Cu-O seharusnya dapat diamati pada  $538\text{ cm}^{-1}$  (Hu dkk. 2016). Namun spektra FTIR  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah pengeringan sama sekali tidak menunjukkan vibrasi pada bilangan gelombang tersebut, bahkan untuk  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  dengan  $x \neq 0$ . Hal ini kemungkinan disebabkan karena vibrasi Cu-O terjadi pada bilangan gelombang yang berdekatan dengan vibrasi Mg-O. Akibatnya, vibrasi Cu-O tidak teramati.

$\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$  setelah pengeringan juga menunjukkan adanya molekul air yang terserap serta gugus metoksil. Keberadaan air yang terserap ditunjukkan dengan adanya vibrasi pada  $3750\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$  dan  $1600\text{ cm}^{-1}$ . Vibrasi di dua daerah bilangan gelombang tersebut secara berturut-turut merupakan vibrasi O-H *stretching* dan O-H *bending*. Keberadaan sisa gugus metoksil ditunjukkan dengan adanya vibrasi C-H *stretching* pada  $3000\text{--}2780\text{ cm}^{-1}$  dan C-O *stretching* pada  $1080\text{ cm}^{-1}$ . Vibrasi C-H *stretching* hanya teramati pada spektrum FTIR MgFOH, tetapi vibrasi C-O *stretching* teramati di semua spektra FTIR  $\text{Mg}_{1-x}\text{Cu}_x\text{FOH}$ .



**Gambar 3.** Spektra FTIR  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  setelah pengeringan pada suhu  $115^{\circ}C$ : (i)  $x = 0$ , (ii)  $x = 0,025$ , (iii)  $x = 0,05$ , (iv)  $x = 0,075$ , (v)  $x = 0,1$ , (vi)  $x = 0,15$ .

Spektra FTIR  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  setelah kalsinasi dapat dilihat pada Gambar 4. Pada spektra tersebut dapat dilihat bahwa terjadi penurunan intensitas vibrasi O-H bending pada  $1600\text{ cm}^{-1}$  dibandingkan dengan intensitas vibrasi setelah pengeringan. Selain itu, vibrasi C-H stretching dan C-O stretching juga menjadi tidak teramati. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar air yang terserap serta gugus metoksil yang terdapat pada  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  berhasil dihilangkan dengan kalsinasi.



**Gambar 4.** Spektra FTIR  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  setelah kalsinasi pada suhu  $350^{\circ}C$ : (i)  $x = 0$ , (ii)  $x = 0,025$ , (iii)  $x = 0,05$ , (iv)  $x = 0,075$ , (v)  $x = 0,1$ , (vi)  $x = 0,15$ .



Pada spektra FTIR  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  setelah kalsinasi dapat diamati vibrasi pada  $3700\text{ cm}^{-1}$  yang sebelumnya tidak teramati pada spektrum FTIR setelah pengeringan. Vibrasi tersebut merupakan vibrasi O-H stretching yang berasal dari gugus hidroksil yang terisolasi (Prescott dkk. 2005). Keberadaan vibrasi ini menunjukkan bahwa kalsinasi yang dilakukan terhadap  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  berhasil menghilangkan air yang terserap dan gugus metoksil, tetapi tidak sampai menghilangkan gugus hidroksil.

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  telah berhasil disintesis. Dengan sifat keasaman yang dimiliki,  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  memiliki potensi untuk digunakan sebagai katalis dalam reaksi sintesis vitamin E. Oleh karena itu, perlu dilakukan uji aktivitas katalitik  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  dalam reaksi sintesis vitamin E pada penelitian berikutnya.

#### 4. KESIMPULAN

Serangkaian sampel  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  telah berhasil disintesis melalui kombinasi fluorolytic dan hydrolitic sol-gel. Pola XRD menunjukkan bahwa sampel  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  yang disintesis memiliki fasa amorf dan doping Cu yang dilakukan tidak mengakibatkan perubahan struktur kristal. Keberadaan gugus hidroksil pada sampel  $Mg_{1-x}Cu_xFOH$  dapat dikonfirmasi berdasarkan spektra FTIR.

#### DAFTAR PUSTAKA

- C  lerier, St  phane, dan Fr  d  ric Richard. 2015. "Promising heterogeneous catalytic systems based on metal fluorides and oxide hydroxide fluorides: A short review." *Catalysis Communications* 67:26–30. doi: 10.1016/j.catcom.2015.04.003.
- Combs, Gerald F., dan James P. McClung. 2017. "Chapter 8 - Vitamin E." Hlm. 207–42 dalam *The Vitamins (Fifth Edition)*, disunting oleh G. F. Combs dan J. P. McClung. Academic Press.
- Hu, Zhong-Pan, Yun-Pei Zhu, Ze-Min Gao, Guoxiong Wang, Yuping Liu, Xinying Liu, dan Zhong-Yong Yuan. 2016. "CuO catalysts supported on activated red mud for efficient catalytic carbon monoxide oxidation." *Chemical Engineering Journal* 302:23–32. doi: 10.1016/j.cej.2016.05.008.
- Kemnitz, Erhard. 2015. "Nanoscale Metal Fluorides: A New Class of Heterogeneous Catalysts." *Catalysis Science & Technology* 5(2):786–806. doi: 10.1039/C4CY01397B.
- Kemnitz, Erhard, dan Simona Coman. 2016. "Chapter 6 - Nanoscaled Metal Fluorides in Heterogeneous Catalysis." Hlm. 133–91 dalam *New Materials for Catalytic Applications*, disunting oleh V. I. Parvulescu dan E. Kemnitz. Amsterdam: Elsevier.
- Kemnitz, Erhard, dan Johannes Noack. 2015. "The Non-Aqueous Fluorolytic Sol–Gel Synthesis of Nanoscaled Metal Fluorides." *Dalton Transactions* 44(45):19411–31. doi: 10.1039/C5DT00914F.
- Khallouki, Farid, Robert Wyn Owen, Mourad Akdad, Bachir El Bouhali, Sandrine Silvente-Poirot, dan Marc Poirot. 2020. "Chapter 3 - Vitamin E: an overview." Hlm. 51–66 dalam *Molecular Nutrition*, disunting oleh V. B. Patel. Academic Press.
- Mohd Mutalip, Siti Syairah, Sharaniza Ab-Rahim, dan Mohd Hamim Rajikin. 2018. "Vitamin E as an Antioxidant in Female Reproductive Health." *Antioxidants* 7(2):22. doi: 10.3390/antiox7020022.
- Pekmezci, Didem. 2011. "Chapter eight - Vitamin E and Immunity." Hlm. 179–215 dalam *Vitamins & Hormones*. Vol. 86, *Vitamins and the Immune System*, disunting oleh G. Litwack. Academic Press.

- Prescott, Hillary A., Zhi-Jian Li, Erhard Kemnitz, Jens Deutsch, dan Heiner Lieske. 2005. "New Magnesium Oxide Fluorides with Hydroxy Groups as Catalysts for Michael Additions." *Journal of Materials Chemistry* 15(43):4616–28. doi: 10.1039/B510108E.
- Scholz, G., dan E. Kemnitz. 2017. "21 - Sol–Gel Synthesis of Metal Fluorides: Reactivity and Mechanisms." Hlm. 609–49 dalam *Modern Synthesis Processes and Reactivity of Fluorinated Compounds*, disunting oleh H. Groult, F. R. Leroux, dan A. Tressaud. Elsevier.
- Scholz, Gudrun, Christoph Stosiek, Michael Feist, dan Erhard Kemnitz. 2012. "Magnesium Hydroxide Fluorides – New Materials with Adjustable Composition and Properties." *European Journal of Inorganic Chemistry* 2012(14):2337–40. doi: 10.1002/ejic.201200108.
- Shi, Huiping, dan Qingshan Zhang. 2017. "Microwave-Assisted Synthesis of All-Rac- $\alpha$ -Tocopherol Catalyzed by Ionic Liquids." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 100(1):012062. doi: 10.1088/1755-1315/100/1/012062.
- Torquato, Pierangelo, Rita Marinelli, Desirée Bartolini, dan Francesco Galli. 2020. "Chapter 23 - Vitamin E: nutritional aspects." Hlm. 447–85 dalam *Molecular Nutrition*, disunting oleh V. B. Patel. Academic Press.
- Traber, Maret G., dan Richard S. Bruno. 2020. "Chapter 7 - Vitamin E." Hlm. 115–36 dalam *Present Knowledge in Nutrition (Eleventh Edition)*, disunting oleh B. P. Marriott, D. F. Birt, V. A. Stallings, dan A. A. Yates. Academic Press.
- Ye, Ziling, Bin Shi, Yanglei Huang, Tian Ma, Zilei Xiang, Ben Hu, Zhaolin Kuang, Man Huang, Xiaoying Lin, Zhu Tian, Zixin Deng, Kun Shen, dan Tiangang Liu. 2022. "Revolution of Vitamin E Production by Starting from Microbial Fermented Farnesene to Isophytol." *The Innovation* 3(3). doi: 10.1016/j.xinn.2022.100228.